

# MODELAGEM 3D DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NO ASSAMENTO DE PEITO DE FRANGO COM USO DE FOTOGRAMETRIA

## 3D MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN ROASTING CHICKEN BREAST USING PHOTOGRAMMETRY

DOI: 10.65747/conali2025v1c03

Ana Cristina Mattje Zobot<sup>1</sup>; João Pedro Ferreira<sup>2</sup>; Jhony Tiago Teleken<sup>3</sup>; Mariane Wolf<sup>4</sup>; Bruno Augusto Mattar Carciofi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Estudante do Curso de Engenharia de Materiais - CTC – UFSC; <sup>2</sup>Docente/pesquisador da Unidade Acadêmica de Belo Jardim – UABJ – UFRPE; <sup>3</sup>Docente/pesquisador da Faculdade de Engenharia Química – UNIFESSPA; <sup>4</sup>Pesquisadora do Núcleo de Ciência, Tecnologia e Inovação do Leite – NCTI – UDESC; <sup>5</sup>Docente/pesquisador do Department of Biological and Agricultural Engineering – University of California, Davis.

Contato: joaoferreira@alimentos.eng.br

**Resumo:** Este trabalho apresenta um modelo matemático para descrever a transferência de calor e massa durante o assamento de peito de frango em forno convectivo. Considerou-se que o calor é transferido entre o alimento e o ambiente por convecção e radiação, incluindo o resfriamento evaporativo decorrente da evaporação superficial. Do exterior ao centro do produto, o transporte de calor ocorre predominantemente por condução, modelada pela Lei de *Fourier*. A transferência de massa foi representada pela difusão de água no interior da carne (Lei de *Fick*) e pelos fenômenos de evaporação e gotejamento na superfície. As equações que regem esses fenômenos foram implementadas no *software COMSOL Multiphysics 5.5®*. O modelo tridimensional foi resolvido numericamente pelo método dos elementos finitos e validado com dados experimentais de temperatura no centro do produto e teor de umidade em base seca, utilizando inicialmente uma geometria simplificada. Após a validação, o modelo foi aplicado a uma geometria realista do peito de frango, obtida por técnicas de fotogrametria. O modelo forneceu informações transientes detalhadas sobre os perfis de temperatura e umidade no produto. Além disso, uma análise paramétrica evidenciou o impacto da difusividade, da taxa de gotejamento, da temperatura do forno e da umidade relativa sobre a perda de água e o tempo de cozimento. Por fim, o modelo proposto demonstrou ser uma ferramenta promissora para o estudo de condições de processo, predição de parâmetros de qualidade e desenvolvimento de produtos e equipamentos, como fornos domésticos e industriais.

**Palavras-chave:** Assamento em forno convectivo; *COMSOL Multiphysics*; Cozimento de carnes; Geometria realista; Modelagem matemática

**Abstract:** This study presents a mathematical model describing heat and mass transfer during the roasting of chicken breast in a convective oven. Heat transfer between the product and the oven environment was considered to occur by convection and radiation, including evaporative cooling due to surface water evaporation. From the surface to the core of the product, heat transport is predominantly by conduction, modeled using Fourier's Law. Mass transfer was represented by water diffusion within the meat (Fick's Law), along with evaporation and dripping phenomena at the

surface. The governing equations were implemented in COMSOL Multiphysics 5.5. The three-dimensional model was numerically solved using the finite element method and validated with experimental data on core temperature and dry basis moisture content, initially using a simplified geometry. After validation, the model was applied to a realistic chicken breast geometry obtained through photogrammetry techniques. The model provided detailed transient information on temperature and moisture profiles within the product. Additionally, a parametric analysis highlighted the influence of diffusivity, dripping rate, oven temperature, and relative humidity on water loss and cooking time. Ultimately, the proposed model proved to be a promising tool for studying process conditions, predicting quality parameters, and supporting the development of food products and equipment, including household and industrial ovens.

**Keywords:** COMSOL Multiphysics; Convection oven roasting; Cooking meat; Mathematical modeling; Realistic food modeling

## INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva brasileira de avicultura e suinocultura é um dos principais pilares da economia nacional, sendo o Brasil o maior exportador mundial de carne de frango. Apenas no ano de 2021, o Valor Bruto da Produção (VBP) de frangos e suínos superou os R\$ 140 bilhões. A tendência é que a oferta de carnes continue a acompanhar a demanda, tanto no mercado interno quanto externo (1). Nesse cenário, o setor de carnes torna-se cada vez mais competitivo e complexo, em função de fatores como o ciclo de vida dos animais, o alto grau de perecibilidade dos produtos e a necessidade de rigorosos controles sanitários. Assim, soluções técnicas que respondam a essas exigências tornam-se cada vez mais necessárias (2).

O cozimento por convecção é amplamente utilizado no preparo de produtos avícolas, sendo um processo presente em ambientes domésticos, cozinhas profissionais e na indústria de alimentos. O objetivo principal é obter um produto seguro do ponto de vista microbiológico e com alta qualidade sensorial (3). Além disso, o preparo térmico da carne torna o alimento mais palatável e facilita a digestão (4). A qualidade da carne cozida, geralmente traduzida por parâmetros como cor, textura, aroma e sabor, está intimamente relacionada aos fenômenos de transferência de calor e massa durante o processo de cocção.

Modelos matemáticos de transferência de calor e massa têm demonstrado eficácia na estimativa da distribuição de temperatura e umidade ao longo do cozimento de carnes (5, 6). Esses modelos vêm se consolidando como ferramentas viáveis para estimar parâmetros de qualidade, otimizar o processo de cocção e auxiliar no desenvolvimento de novos produtos, equipamentos e processos, como fornos industriais e domésticos (7, 9). Dessa forma, busca-se desenvolver modelos que possam contribuir para a melhoria dos processos térmicos aplicados à carne de frango, ampliando seu controle e previsibilidade.

No contexto dos métodos de cocção, os modelos frequentemente descrevem o assamento de carnes em fornos, sendo essa escolha associada às características controladas que os fornos oferecem. Trata-se de um processo que envolve a transferência simultânea de calor e massa: a

energia térmica é transferida ao alimento por convecção (do ar quente) e radiação (das superfícies aquecidas do forno), enquanto a perda de massa ocorre por evaporação e gotejamento (3, 10, 11).

Grande parte dos modelos matemáticos aplicados ao cozimento de carnes utiliza geometrias regulares, como cubos, paralelepípedos e cilindros (12, 17), seja por limitações na resolução numérica ou pela dificuldade de representar adequadamente os cortes cárneos. Para superar essa limitação, diferentes técnicas têm sido empregadas na obtenção de geometrias irregulares, como visão computacional (17), imagem por ressonância magnética (18), tomografia computadorizada de raios X (19) e scanners 3D (11, 18). No entanto, essas técnicas frequentemente requerem conhecimento técnico específico, treinamento especializado e envolvem altos custos e tempo de implementação (20).

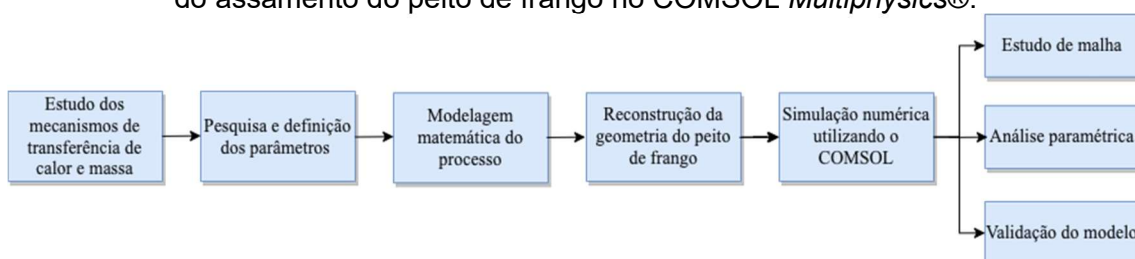
Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver um modelo multifísico capaz de descrever o processo de cocção da carne de frango em forno convectivo, visando à predição dos perfis de temperatura e umidade ao longo do processo. Para isso, utilizou-se a técnica de fotogrametria com o intuito de obter o volume e as propriedades morfológicas do peito de frango no formato em que é usualmente comercializado.

## MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo envolveu as seguintes etapas: i) estudo dos mecanismos de transferência de calor e massa; ii) levantamento e definição dos parâmetros físicos e termo-higroscópicos; iii) modelagem matemática do processo de assamento; iv) experimentos para validação do modelo; v) reconstrução tridimensional da geometria real do peito de frango por meio de fotogrametria; vi) implementação da modelagem no *software COMSOL Multiphysics®*; e vii) simulação numérica do processo. Após essas etapas, foram realizados estudos de sensibilidade da malha (*mesh refinement*), seguidos da validação do modelo com dados experimentais e de uma análise paramétrica das variáveis de processo.

A Figura 1 apresenta o fluxograma geral das etapas de construção do modelo, desde a aquisição da geometria até a implementação das equações no ambiente computacional.

Figura 1 - Fluxograma do processo de construção do modelo matemático e simulação numérica do assamento do peito de frango no *COMSOL Multiphysics®*.



Fonte: Autores, 2025

## MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

No modelo proposto, considerou-se que a transferência de calor e massa durante o assamento do peito de frango ocorre por meio de diversos fenômenos interdependentes. O transporte de líquido no interior da carne é descrito por difusão, conforme a Primeira Lei de Fick, enquanto a superfície do alimento está sujeita à evaporação de água e ao gotejamento, resultando em perda de massa. A transferência de calor do forno para a superfície do produto ocorre por convecção e radiação, sendo que, a partir da superfície, o calor é conduzido para o interior do alimento predominantemente por condução térmica, de acordo com a Lei de Fourier. Esses mecanismos foram considerados na formulação do modelo e estão representados esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática dos mecanismos de transferência de calor e massa considerados no modelo proposto para o assamento do peito de frango.



Fonte: Autores, 2025

## CONSIDERAÇÕES E HIPÓTESES

Para viabilizar a solução do modelo, algumas simplificações foram adotadas: o balanço de massa desconsiderou termos de reação, ou seja, não foram incluídas reações químicas de geração ou consumo de massa (Por considerar que a mudança de fase ocorre somente na superfície); o balanço de energia desconsiderou termos de geração interna de calor, pois no processo estudado não ocorre geração ou consumo energético interno; a transferência de calor considerou o efeito do resfriamento evaporativo, dado que a evaporação superficial consome energia em forma de calor latente para mudança de fase; a evaporação de água foi assumida ocorrer exclusivamente na superfície da carne, onde também ocorrem processos de evaporação e gotejamento; o encolhimento da carne foi desprezado, no entanto, os seus efeitos sob a transferência de calor e massa foram transmitidos para as propriedades físicas como massa específica, calor específico, condutividade térmica, coeficiente de difusão de umidade. Por fim, o transporte interno de gordura foi desconsiderado devido ao baixo teor de gordura no peito de frango (~1%) (3).

## EQUAÇÕES GOVERNANTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Com base nas hipóteses apresentadas, o modelo matemático foi fundamentado nos balanços de massa e energia, expressos pelas leis de conservação de massa e energia, respectivamente, que descrevem a dinâmica do cozimento da carne e orientam a formulação das equações governantes do processo.

### Transferência de massa

No interior do frango, a migração de água foi considerada ocorrer por difusão, descrita pela Primeira Lei de Fick, que estabelece que o movimento espontâneo das partículas de soluto é impulsionado por gradientes de concentração, oferecendo assim uma fundamentação para o entendimento da perda de água durante o cozimento do alimento (21). Dessa forma, o balanço de massa é representado pela Equação 1:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0 \quad \text{Equação 1}$$

Onde  $\nabla \cdot J$  representa o fluxo de difusão de água dentro da carne e  $J = -D \nabla_c \cdot D$ , representa o coeficiente de difusão ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) e  $c$  a concentração de água ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ). A condição de contorno é dada pela Equação 2:

$$-D \nabla_c = -h_m (c_{w_{superfície}} - c_{w_{ar}}) - \frac{K_w (X_{bu} - CRA)}{M_{H_2O}} \quad \text{Equação 2}$$

$$-D \nabla_c = -h_m \left( \frac{a_w \cdot p_{sat}}{R \cdot T} - \frac{UR \cdot p_{sat_{ar}}}{R \cdot T_{ar}} \right) - \frac{K_w (X_{bu} - CRA)}{M_{H_2O}}$$

Na Equação 2, o coeficiente de transferência de massa ( $h_m$ ,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) descreve o fluxo de umidade entre a superfície da carne e o ar do forno. A atividade de água na superfície da carne é representada por ( $a_w$ ), enquanto a umidade relativa no interior do forno é dada por ( $UR$ , %). As pressões de saturação da água na superfície e no ar são indicadas, respectivamente, por ( $p_{sat}$ ) e ( $p_{sa_{ar}}$ ,  $Pa$ ). Pela condição de contorno, observa-se que a água se movimenta do meio de maior para menor concentração, devido à secagem superficial (convecção de massa) causada pela diferença de concentração de água entre a superfície do frango e o ar do forno.

A Equação 1 considera que o transporte de água ocorre exclusivamente por difusão. Dessa forma, são desconsiderados os efeitos do transporte de umidade provocado por gradientes de pressão no interior da carne. Contudo, durante o cozimento, o aumento da temperatura promove a desnaturação térmica das proteínas, reduzindo a capacidade de retenção de água (*CRA*) do alimento (10). Esse fenômeno influencia a quantidade de água perdida, que resulta da combinação da evaporação superficial e do gotejamento, sendo estes últimos considerados na segunda parcela da Equação 2. Conforme descrito por Goñi e Salvadori (17), o balanço considera que a variação do teor de água depende da diferença entre o conteúdo instantâneo e o valor de equilíbrio, que representa a capacidade de retenção de água.

### Transferência de calor

Durante o assamento do frango em forno convectivo, a energia térmica é transferida para a carne por meio de três mecanismos principais: convecção a partir do ar quente, radiação proveniente das superfícies aquecidas da cavidade do forno, e condução térmica da superfície até o centro do alimento (7). O modelo desenvolvido considera esses três mecanismos, e o balanço de energia é representado pela Equação 3:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = 0 \quad \text{Equação 3}$$

Na qual  $q = -k_{carne} \cdot \nabla T$ , representa o fluxo de calor no interior do produto. E a condutividade térmica é representada por  $k_{carne}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) e  $c_p$  é o calor específico ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) do peito de frango.

Como o calor é transferido na superfície por radiação e convecção, as Equações 4 e 5 foram utilizadas para representar as condições de contorno do modelo:

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_{parede}^4 - T^4) \quad \text{Equação 4}$$

$$q_{conv} = h_T (T_{ar} - T) \quad \text{Equação 5}$$

Na qual  $\sigma$  é a constante de Boltzman ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ),  $\varepsilon$  é a emissividade do peito de frango e  $h_T$  é o coeficiente de transferência de calor sendo igual a  $8,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ , valor medido experimentalmente em estudo anterior realizado no laboratório. A condição de contorno é, portanto, dada pela Equação 6:

$$(q_{conv} + q_{rad}) - q_{evap} = -k\nabla_T \quad \text{Equação 6}$$

Considera-se também o fenômeno de resfriamento evaporativo, no qual a superfície do alimento sofre resfriamento devido à energia consumida pela água para a mudança de fase do líquido para o vapor. Essa transferência de calor é representada pela condição de contorno  $q_{evap}$  conforme descrito na Equação 7:

$$q_{evap} = \lambda \cdot h_m \left( \frac{UR \cdot p_{sat_{ar}}}{R \cdot T_{ar}} - \frac{a_w \cdot p_{sat}}{R \cdot T} \right) \quad \text{Equação 7}$$

## PARÂMETROS, PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E VARIÁVEIS DO MODELO

A Tabela 1 apresenta os parâmetros físicos utilizados no modelo, os quais foram obtidos por meio de experimentação própria e a partir de referências bibliográficas relevantes relacionadas ao processo de cocção.

Tabela 1 - Parâmetros físicos constantes adotados no modelo de transferência de calor e massa durante o assamento do peito de frango.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Fonte
Temperatura do ar do forno	$T_{ar}$	200	$^{\circ}C$	Assumido
Temperatura inicial do frango	$T_0$	25	$^{\circ}C$	Assumido
Coefficiente de transferência de calor	$h_T$	8,5	$W \cdot m^{-2}K^{-1}$	Estimado segundo Feyissa (22)
Peso molecular da água	$M_{H_2O}$	18	$g \cdot mol$	(23)
Coefficiente de transferência de massa	$h_m$	$9,8 \times 10^{-2}$	$m \cdot s^{-1}$	Calculado
Calor latente de vaporização molar da água	$\lambda$	$2.3 \times 10^6$	$J \cdot mol^{-1}$	(23)
Fração de água inicial	$x_{w0}$	0,749	-	Experimental
Umidade em base seca inicial	$X_{BS0}$	2,984	$kg \cdot kg^{-1}$	Experimental
Difusividade de umidade	$D$	$10^{-9}$ e $10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	(5 e 11).
Emissividade	$\varepsilon$	0,75	-	Assumido
Constante de Boltzmann	$k_b$	$5,67 \times 10^{-8}$	$kg \cdot s^{-3}K^{-4}$	(23)
Taxa de gotejamento	$K_w$	$1 \times 10^{-3}$	$kg \cdot m^{-2}s^{-1}$	(17)
Temperatura das paredes do forno	$T_{parede}$	200	$^{\circ}C$	Assumido
Umidade Relativa	$UR$	1.0	%	Assumido
Capacidade de retenção de água	$CRA$	$\frac{x_{w0}}{1 + 30 * e^{(-0.25*(T-52)}}$	0.345	(6)

Fonte: Autores, 2025

A Tabela 2 apresenta os parâmetros adotados no modelo, obtidos por interpolação de dados extraídos da literatura.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos por interpolação a partir de dados bibliográficos para o modelo de transferência de calor e massa.

Parâmetro	Símbolo	Fonte
Densidade	$\rho$	(24)
Condutividade térmica	$k_{carne}$	
Atividade de água	$a_w$	

Fonte: Autores, 2025

Na Tabela 3, encontram-se as variáveis e parâmetros calculados em função da temperatura e da concentração, utilizados no desenvolvimento do modelo.

Tabela 3 - Variáveis e parâmetros calculados em função da temperatura e concentração para a modelagem da transferência de calor e massa.

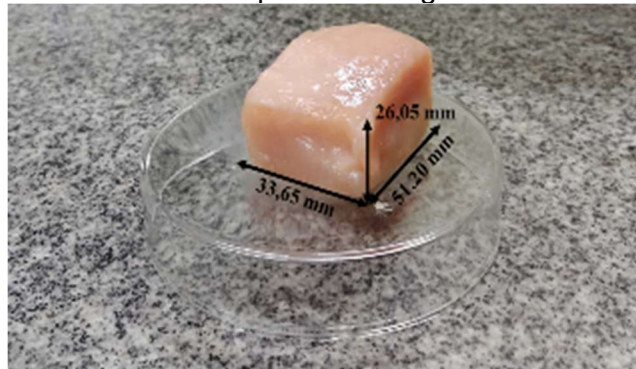
Parâmetro	Símbolo	Expressão
Umidade em base seca	$X_{BS}$	$(c * M_{H_2O}) / (\frac{m_{s0}}{V_{total}})$
Umidade em base úmida	$X_{BU}$	$(c * M_{H_2O}) / (\frac{m_{s0}}{V_{total}} + c * M_{H_2O})$
Calor Específico	$c_p$	$k_{carne}(X_{BS}) / \alpha(X_{BS}) * \rho(X_{BS})$
Pressão de saturação	$p_{sat}$	$10^3 * e^{16,3872 - 3885,7 / (T[\frac{1}{K}] - 42,98)}$
Pressão de saturação do ar	$p_{sat\_ar}$	$10^3 * e^{16,3872 - 3885,7 / (T_{ar}[\frac{1}{K}] - 42,98)}$

Fonte: Autores, 2025

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para validar o modelo desenvolvido, foram realizados ensaios experimentais de cozimento do peito de frango no Laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos (PROFI). Inicialmente, a umidade inicial das amostras foi determinada pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C por 24 horas. As peças de peito de frango resfriado foram adquiridas em mercado local (Florianópolis, SC), das quais foram extraídos blocos retangulares com dimensões médias de 33,65 ± 2,04 mm × 26,05 ± 3,53 mm × 51,20 ± 0,44 mm, e peso médio de 45,11 ± 0,8 g. A amostra utilizada na etapa experimental é apresentada na Figura 3

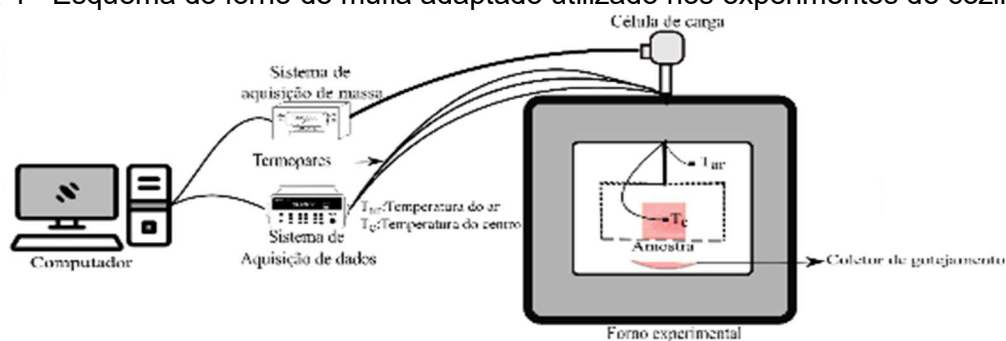
Figura 3 - Fotografia de uma amostra de peito de frango utilizada nos ensaios experimentais.



Fonte: Autores, 2025

Os experimentos de cozimento para coleta de temperatura foram realizados em quatro repetições, utilizando um forno de mufla adaptado conforme Silva et al. (25) (modelo EDG 1800 EDGCON 1P, Brasil). O esquema do equipamento utilizado está apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema do forno de mufla adaptado utilizado nos experimentos de cozimento.



Fonte: Autores, 2025

No interior do forno, foi construída uma câmara retangular de aço inoxidável com dimensões de 96 mm × 96 mm × 150 mm, cujas paredes foram pintadas de preto para melhorar a absorção térmica. O isolamento térmico foi realizado com zircônia microporosa (Zircar Ceramics, Microsil, EUA), e a temperatura do forno foi controlada por um controlador PID (modelo REX – C100). Um termopar tipo T (Iope, Modelo A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil) foi conectado a um sistema de aquisição de dados composto por uma célula de carga (Alfa Instruments, Modelo 3102, Brasil) e um módulo de termopares (Agilent Technologies, Modelo 34970A, EUA), possibilitando medições online de temperatura e massa com taxa de aquisição de 10 Hz (1/10 s). Após o forno atingir a condição estacionária de 200 °C, o termopar foi inserido no centro das amostras mostradas na Figura 3, que foram posicionadas no centro da câmara por meio de uma haste metálica acoplada ao teto, garantindo que a transferência de calor ocorresse predominantemente por convecção e radiação (25).

A coleta da perda de massa foi realizada no mesmo sistema experimental, com a célula de carga (Tedeo-Huntleigh Modelo 1006, transdutores VPG, EUA) conectada ao sistema de aquisição para monitoramento em triplicata da variação de massa durante o cozimento a 200 °C, conforme o tempo determinado nos ensaios de temperatura. A cinética de perda de massa foi expressa em termos de umidade em base seca,  $X_{BS}$  (kg de água · kg de massa seca<sup>-1</sup>), correlacionada com a temperatura das amostras (25).

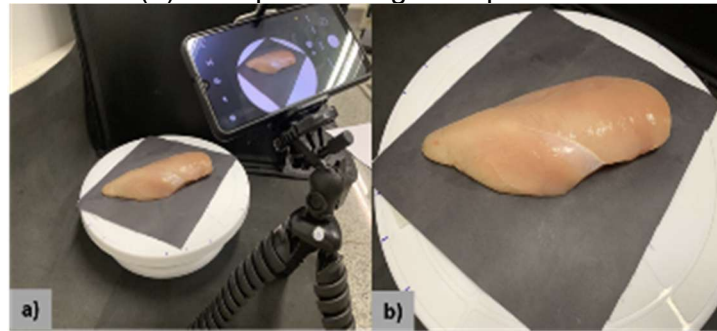
## PROCEDIMENTO DE VALIDAÇÃO DO MODELO

O domínio de cálculo representando os blocos retangulares com suas dimensões, as equações do modelo e os parâmetros citados foram implementos no software e a validação se deu pela comparação dos valores de Temperatura do centro e  $X_{BS}$  vs. tempo que foram preditos e experimentais variando os parâmetros do modelo ( $K_w$  e  $D$ ) de forma incremental visando minimizar o *RMSE* (*Root Mean Square Error - erro quadrático médio*), conforme a metodologia proposta por Porciúncula et al. (26).

## RECONSTRUÇÃO DA GEOMETRIA DO PEITO DE FRANGO

A fotogrametria tem sido empregada com sucesso na reconstrução tridimensional de alimentos com geometrias irregulares, permitindo a estimativa precisa do volume e das características morfológicas (27). Essa abordagem é especialmente útil para a realização de simulações numéricas mais representativas em comparação às geometrias simplificadas frequentemente adotadas em modelos de cocção de carnes. Neste estudo, um peito de frango foi reconstruído por meio de imagens obtidas no Laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos (PROFI/UFSC). A amostra, previamente descongelada até 22 °C, foi posicionada sobre um prato giratório com fundo preto, enquanto uma câmera de celular de 12 MP, fixada em tripé, capturou 30 imagens em diferentes ângulos. Essa sequência de imagens foi utilizada para gerar a geometria tridimensional da amostra, que serviu como domínio de cálculo nas simulações de transferência de calor e massa. A configuração experimental está ilustrada na Figura 5.

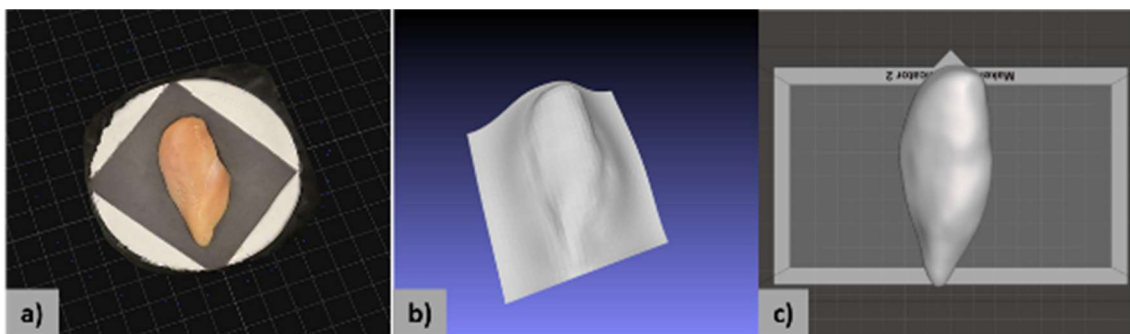
Figura 5 - (a) Configuração experimental utilizada para a captura das imagens por fotogrametria; (b) exemplo de imagem capturada.



Fonte: Autores, 2025

As fotografias obtidas foram tratadas em 3 softwares diferentes: *3DFZephyr*, *MeshLab* e *MeshMixer*, todos *open source*. Inicialmente, o *3DFZephyr* transformou todas as imagens em uma nuvem de pontos, denominada pontos esparsos, que posteriormente foi convertida em uma nuvem de pontos densos para gerar uma representação tridimensional preliminar da amostra, conforme ilustrado na Figura 6a. O objeto 3D resultante foi então importado para o *software MeshLab*, que possibilitou a construção da malha, a qual foi posteriormente redimensionada e convertida em um objeto sólido no *MeshMixer*. Este último *software* também permitiu aproximar as dimensões do objeto com base em uma medida real, preparando-o para reconstrução no *COMSOL Multiphysics®*. A malha gerada e o objeto final estão apresentados na Figura 6b e 6c, respectivamente.

Figura 6 - Etapas da reconstrução 3D e preparação do modelo para simulação: (a) nuvem de pontos esparsos gerada no *software 3DFZephyr*; (b) malha obtida no *software MeshLab*; (c) objeto final.



Fonte: Autores, 2025

## RESOLUÇÃO NUMÉRICA

A resolução numérica do modelo, baseada no método dos elementos finitos, foi realizada utilizando o *software COMSOL Multiphysics®* versão 5.5, com uso dos computadores do

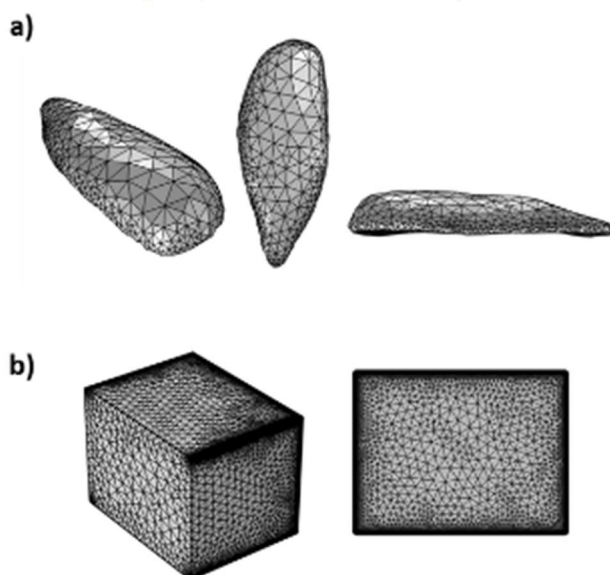
Laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos (PROFI). O equipamento utilizado apresentava as seguintes especificações: sistema operacional Windows 10 (64 bits), processador Intel(R) Core (TM) i7-6850K CPU @ 3.60 GHz, memória RAM de 128 GB e placa gráfica Quadro P600.

Para o cálculo do balanço de massa, foi utilizado o módulo “Transport of Diluted Species”, considerando a difusão de água como força motriz conforme a Lei de Fick. Já a transferência de calor foi modelada por meio do módulo “Heat Transfer in Solids”, englobando condução, convecção e radiação. A equação de temperatura aplicada ao domínio segue a forma diferencial da Lei de Fourier.

Com o objetivo de minimizar o erro numérico, foi conduzido um estudo de malha. Inicialmente, uma malha com número reduzido de elementos foi testada, sendo posteriormente refinada até alcançar-se convergência dos resultados físicos com tempo computacional viável. Para o domínio tridimensional correspondente à geometria real do peito de frango, observou-se que malhas com menos de 1.122 ou mais de 51.843 elementos apresentavam instabilidades de convergência. A malha que atendeu às condições numéricas ideais continha 40.455 elementos, sendo composta por elementos triangulares com tamanhos variando entre 0,33 cm (mínimo) e 1,85 cm (máximo), com refinamento adicional nas bordas da amostra (raio de 0,6 cm), como mostrado na Figura 7a.

Para o modelo utilizado na etapa de validação, adotou-se uma simplificação simétrica do domínio por corte longitudinal ao longo do comprimento da amostra. A malha com melhor desempenho computacional e estabilidade continha 137.971 elementos triangulares, com tamanhos variando entre 0,06 cm e 0,34 cm, também com refinamento nas bordas. Esta configuração está ilustrada na Figura 7b.

Figura 7 - Malhas utilizadas na resolução numérica do modelo no *software* COMSOL *Multiphysics*® 5.5: (a) malha tridimensional aplicada ao domínio com geometria real do peito de frango (40.455 elementos); (b) malha aplicada ao domínio simplificado simétrico utilizado para validação (137.971 elementos).



Fonte: Autores, 2025

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### VALIDAÇÃO DO MODELO

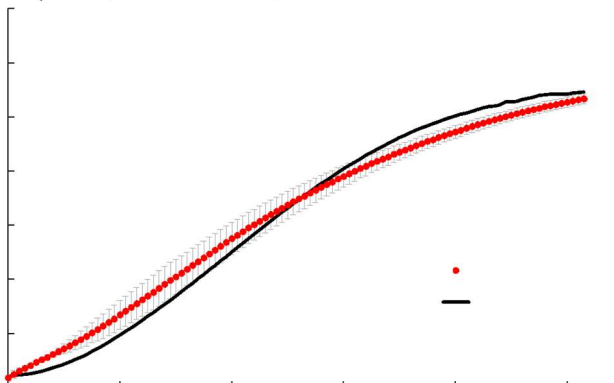
Os melhores valores para os parâmetros ( $K_w$ ) (Taxa de gotejamento) e ( $D$ ) (coeficiente de difusão) foram estimados por meio da resolução do modelo matemático e posterior ajuste da solução numérica aos dados experimentais. As curvas utilizadas para validação consistiram na evolução da temperatura no centro da amostra e no teor de umidade em base seca ( $X_{BS}$ ) ao longo do tempo de cozimento a 200 °C. O ajuste foi realizado por meio de um método exaustivo, com variação incremental dos parâmetros até a minimização do *RMSE*. Os valores ótimos obtidos foram  $K_w = 4.0 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $D = 3.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Após a validação, esses parâmetros foram empregados na simulação do modelo tridimensional utilizando o domínio de cálculo com as dimensões reais do peito de frango, obtidas por meio da técnica de fotogrametria.

### Cinética de temperatura

De acordo com o *United States Department of Agriculture* (USDA) (28), a temperatura mínima de segurança a ser atingida no interior de produtos avícolas, incluindo o peito de frango, é de 74 °C. Com base nesse valor de referência, a temperatura no centro das amostras foi monitorada durante o cozimento experimental até atingir 74 °C, o que ocorreu, em média, após 1.020 segundos (17 minutos). A temperatura média no centro das quatro amostras ( $T_c$ ) foi comparada com os valores

preditos pela simulação numérica realizada no COMSOL *Multiphysics*®. A cinética de aquecimento ( $T_c$  vs. *tempo*) para os dados experimentais e simulados é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Comparação entre os valores experimentais e preditos pelo modelo para a cinética de aquecimento do centro do peito de frango durante o cozimento a 200 °C.



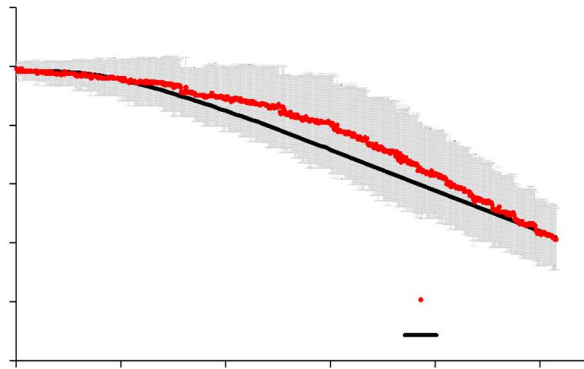
Fonte: Autores, 2025

Os valores preditos pelo modelo (linha preta) apresentaram boa concordância com os dados experimentais médios (pontos vermelhos), considerando o desvio padrão representado pela faixa cinza (variando entre 0,25 e 3,36 °C). O *RMSE* mínimo obtido foi de 2,70 °C, indicando que o modelo matemático desenvolvido — com suas hipóteses, condições de contorno e parâmetros — foi eficaz na descrição da evolução da temperatura central durante o cozimento do peito de frango. O perfil da curva de temperatura é típico de processos de cocção em forno, conforme também observado nos estudos de Feyissa et al. (5), Rabeler e Feyissa (3) e Goñi e Salvadori (17) para produtos cárneos como carne suína, frango e bovina, respectivamente.

### Cinética de perda de massa

A partir do tempo estimado para que o produto atingisse a temperatura de 74 °C no centro, a umidade global em base seca ( $X_{Bs}$ ) foi monitorada durante o mesmo período de 1.020 segundos. Os valores médios obtidos experimentalmente, juntamente com o desvio padrão (variando entre 0,0210 e 0,1845 kg de água·kg de sólido seco<sup>-1</sup>), representado pela faixa cinza, foram comparados com os valores preditos pelo modelo matemático, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Comparação entre os valores experimentais e preditos para a umidade em base seca ( $X_{BS}$ ) do peito de frango durante o cozimento.



Fonte: Autores, 2025

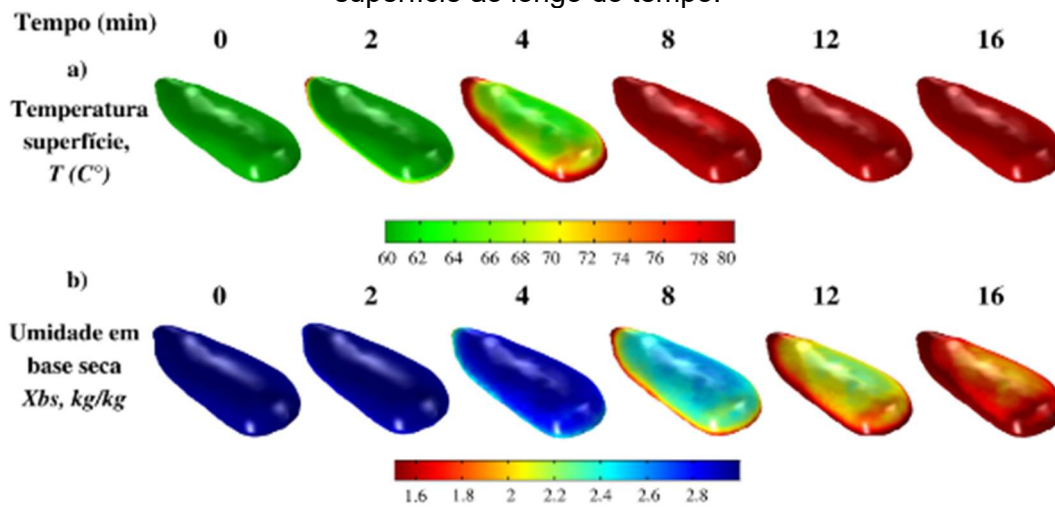
Assim como o perfil de temperatura os resultados experimentais do  $X_{BS}$  também mostraram boa concordância com os preditos pelo modelo, obtendo-se um  $RMSE$  menor que  $0,05 \text{ kg de água} \cdot \text{kg de sólido seco}^{-1}$ . Esse resultado validou o modelo na descrição dos fenômenos de transferência de calor e massa simultâneos no processo de cocção do peito de frango.

#### PERFIS DE TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DO PEITO DE FRANGO

Após a validação do modelo e a estimativa dos parâmetros que minimizaram o erro de predição, o modelo matemático foi aplicado considerando o domínio de cálculo tridimensional, representando as dimensões reais do peito de frango. As simulações foram conduzidas sob condição de cozimento com a temperatura do ar do forno ( $T_{ar}$ ) fixada em  $200^{\circ}\text{C}$ .

Os perfis transientes de temperatura e concentração de água na superfície do produto foram obtidos para um tempo total de 1.030 segundos (pouco mais de 17 minutos), conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Resultados da simulação utilizando a geometria real do peito de frango: (a) perfil de temperatura superficial ao longo do tempo de cozimento; (b) perfil de concentração de água na superfície ao longo do tempo.

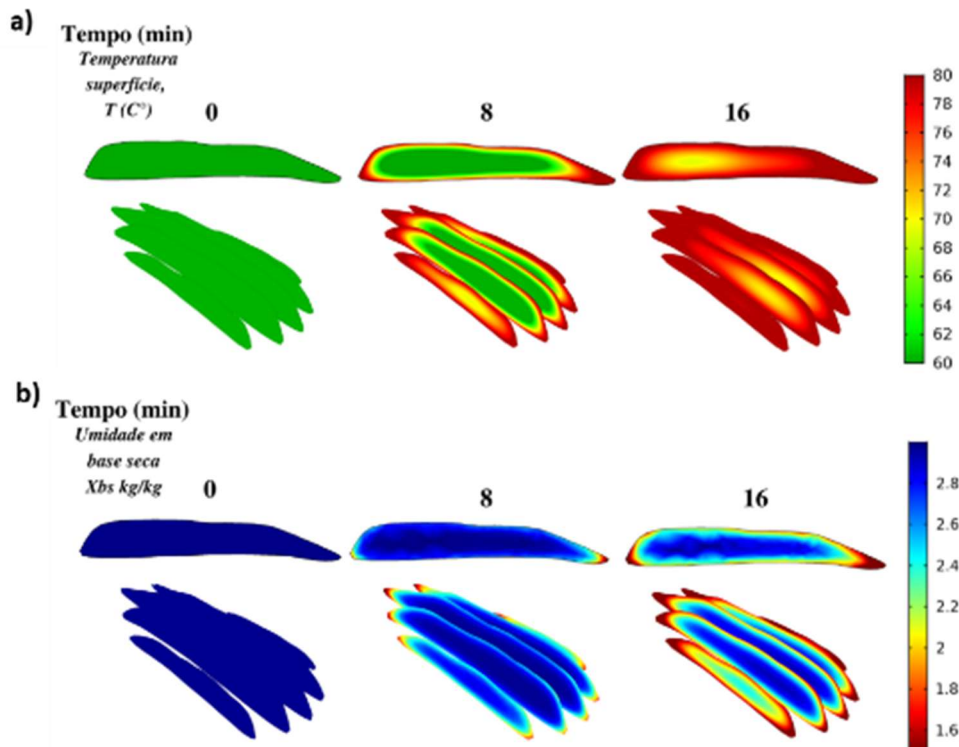


Fonte: Autores, 2025

Inicialmente, toda a superfície do peito de frango apresentava temperatura homogênea de 25 °C. Com o avanço do tempo de cozimento, observou-se que as regiões menos espessas do produto atingiram temperaturas mais elevadas. Esse comportamento pode ser atribuído à menor resistência térmica nessas regiões, o que resulta em uma maior taxa de transferência de calor, conforme previsto pela física do processo.

O comportamento térmico é ilustrado na Figura 11a, que apresenta o perfil de temperatura simulada ao longo do tempo. Nota-se aquecimento mais rápido nas extremidades. A Figura 11b mostra a distribuição espacial da concentração de água, evidenciando a diminuição do teor de umidade nas regiões mais expostas e superficiais devido à evaporação e ao gotejamento. Esses resultados confirmam a coerência física e a robustez do modelo ao representar simultaneamente os fenômenos de transferência de calor e massa durante o assamento.

Figura 11 - Perfis simulados no domínio tridimensional do peito de frango ao longo do tempo de cozimento: (a) distribuição de temperatura na superfície e no centro da amostra; (b) distribuição da concentração de água na superfície e no centro da amostra.



Fonte: Autores, 2025

Como os mecanismos de transferência de calor e massa ocorrem de forma simultânea, o aquecimento da superfície do peito de frango gera um gradiente de temperatura que, por sua vez, induz um gradiente de concentração de umidade. Com o avanço do tempo, observa-se uma redução da concentração de água nas regiões superficiais, especialmente nas áreas menos espessas do produto. Nessas regiões, o aquecimento é mais rápido, promovendo maior evaporação e gotejamento, resultando em maior perda local de umidade.

Adicionalmente, nota-se que a região central do peito de frango mantém maior teor de umidade e atinge temperaturas mais baixas ao longo do processo. Por esse motivo, a temperatura do centro do produto é comumente utilizada como parâmetro de controle para garantir a segurança microbiológica, sendo necessário que atinja, no mínimo, 74 °C. O modelo desenvolvido mostrou-se eficaz para prever o tempo necessário para alcançar essa temperatura crítica, podendo ser utilizado como ferramenta de apoio na definição de condições adequadas de cocção.

## ESTUDO PARAMÉTRICO E DE CONDIÇÕES DE PROCESSO

Após a validação do modelo e a verificação de sua capacidade preditiva, foi conduzido um estudo paramétrico com o objetivo de avaliar o impacto da variação de parâmetros-chave sobre o comportamento do sistema. Os parâmetros analisados foram a difusividade da água no interior da

carne ( $D$ ) e a taxa de gotejamento na superfície do produto ( $K_w$ ), cujos valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise paramétrica conduzida no modelo

Parâmetros	Valores utilizados			Avaliações conduzidas
Difusividade de umidade ( $D$ ) ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	Temperatura do centro e umidade em base seca ao longo de 1030 segundos.
Taxa de Gotejamento ( $K_w$ ) ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	

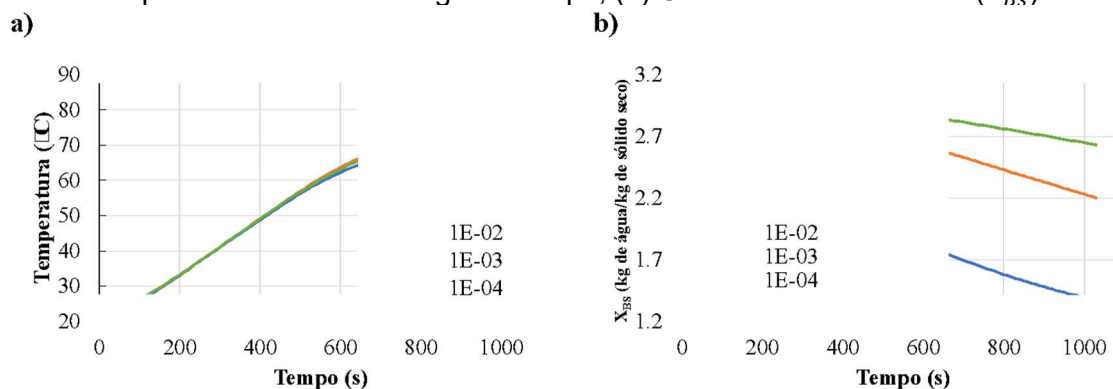
Fonte: Autores, 2025

A escolha desses parâmetros justifica-se por sua influência direta nos mecanismos de perda de massa durante o processo de cocção e pela ampla faixa de valores relatada na literatura. O estudo visou identificar a sensibilidade do modelo a essas variáveis, contribuindo para uma melhor compreensão de seu papel no controle do tempo de cozimento e na retenção de umidade do produto.

Os resultados da análise paramétrica são apresentados nas Figuras 12 e 13, nas quais se comparam os perfis de temperatura central e de umidade em base seca ( $X_{BS}$ ) para diferentes valores de  $D$  e de  $K_w$ . As simulações foram conduzidas variando  $D$  entre  $10^{-7}$  -  $10^{-9}$  e da  $K_w$  variando entre  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$ , mantendo todos os demais parâmetros conforme o modelo validado.

Na Figura 12, observam-se os resultados da variação da difusividade. A alteração de  $D$  na faixa estudada não impactou significativamente a temperatura do centro do produto (Figura 12a), sugerindo que a transferência de calor é predominantemente governada pela condução térmica e não afetada por esse parâmetro.

Figura 12 - Estudo paramétrico: efeito da difusividade ( $D$ ) na cocção do peito de frango. (a) Temperatura central ao longo do tempo; (b) Umidade em base seca ( $X_{BS}$ ).

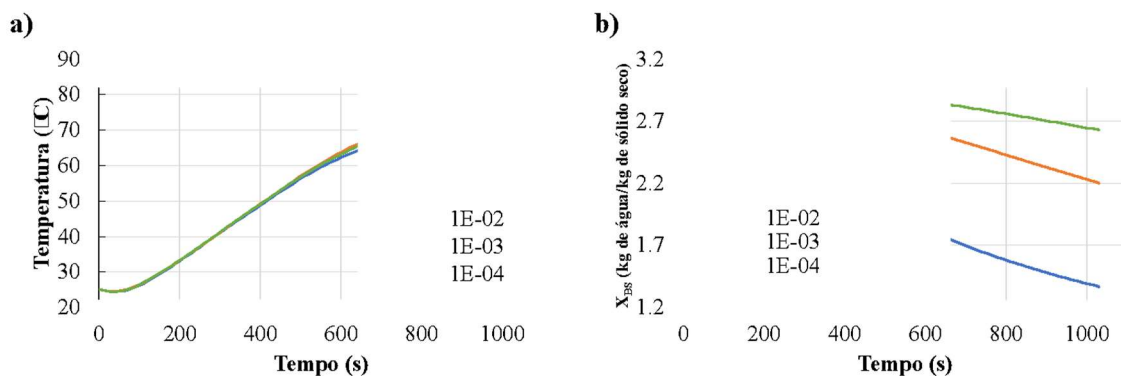


Fonte: Autores, 2025

No entanto, a variação de  $D$  teve influência considerável na perda de umidade, como evidenciado na Figura 12b. Difusividades maiores resultaram em maiores perdas de massa ao longo do tempo, especialmente após 500 segundos de cozimento. Esse comportamento é explicado pela intensificação dos mecanismos de transferência de massa promovida pelo aquecimento progressivo do produto, que aumenta os gradientes de concentração e favorece a migração de umidade.

Na Figura 13, são apresentados os resultados da variação da taxa de gotejamento. Nota-se uma leve redução na temperatura central para a maior taxa simulada ( $10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), como mostrado na Figura 13a. A redução ocorre devido ao efeito do resfriamento evaporativo e da perda acelerada de água. A Figura 13b evidencia que taxas de gotejamento mais elevadas levam a perdas de massa mais intensas e precoces, com queda acentuada do teor de umidade logo nos primeiros minutos de cocção. Esse comportamento está relacionado à intensificação do fluxo de umidade da superfície, que compromete a retenção de água no produto.

Figura 13. Estudo paramétrico: efeito da taxa de gotejamento ( $K_w$ ) na cocção do peito de frango. (a) Temperatura central ao longo do tempo; (b) Umidade em base seca ( $X_{Bs}$ ).



Fonte: Autores, 2025

No entanto, valores excessivamente elevados de  $K_w$  como  $10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , podem não representar adequadamente o fenômeno físico real. Esse mecanismo de gotejamento está fortemente associado à desnaturação térmica das proteínas e à consequente redução da capacidade de retenção de água (CRA), sendo mais bem descrito em faixas realistas, como indicam Feyissa et al. (5) e Goñi e Salvadori (6).

Outro estudo realizado envolveu a avaliação do impacto das condições operacionais do forno, com foco em dois parâmetros críticos: a temperatura do ar do forno ( $T_{ar}$ ) e a umidade relativa do ar ( $UR$ ). Esses fatores influenciam diretamente os mecanismos de transferência de calor e massa, afetando tanto a cinética de aquecimento quanto a taxa de evaporação e, consequentemente, a perda de umidade do produto.

As condições simuladas foram definidas com base em faixas operacionais comuns em processos de cocção, sendo os níveis de  $T_{ar}$  e  $UR$  combinados de forma a representar diferentes

cenários industriais e domésticos. Os valores adotados para o estudo estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Condições de processo avaliadas na simulação do assamento do peito de frango.

Parâmetros	Valores utilizados			Avaliações conduzidas
Temperatura do forno ( $T_{ar}$ )	180° C	200°C	220°C	Temperatura do centro e umidade em base seca ao longo de 1030 segundos.
Umidade relativa ( $UR$ )	1,0%	2,0%	3,0%	

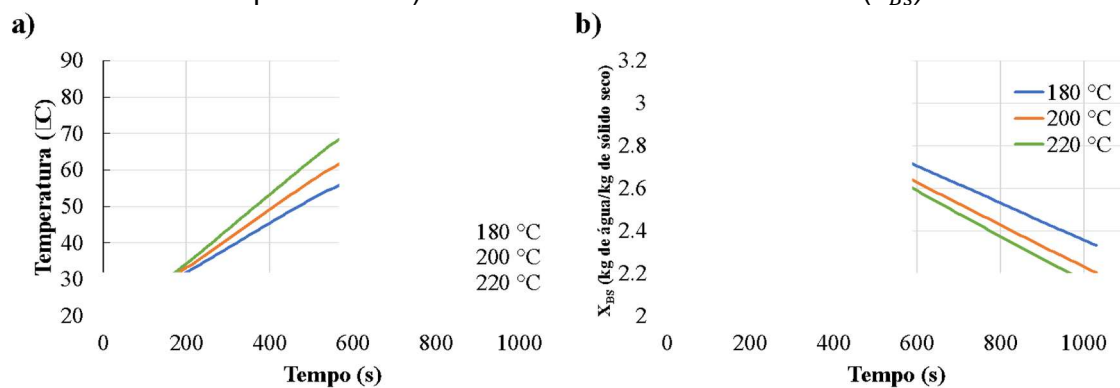
Fonte: Autores, 2025

Na Figura 14 são apresentados os resultados da análise do efeito da temperatura do ar do forno sobre o processo de cocção do peito de frango, mantendo a umidade relativa do ar constante em 1%. Os perfis de temperatura central e de umidade em base seca ( $X_{BS}$ ) foram simulados para diferentes valores de  $T_{ar}$ , visando avaliar seu impacto nos tempos de aquecimento e nas perdas de massa do produto.

Conforme ilustrado na Figura 14a, temperaturas mais elevadas do ar do forno aceleram o aquecimento do centro do frango, resultando em uma redução significativa do tempo necessário para atingir o patamar de segurança microbiológica de 74 °C. Esse comportamento é esperado, uma vez que o gradiente de temperatura entre o ar do forno e o alimento se intensifica, promovendo maior fluxo de calor por convecção e radiação.

Na Figura 14b, observa-se que a elevação da temperatura do forno também intensifica a perda de umidade do produto. Isso ocorre devido ao aumento da taxa de evaporação superficial, promovido pelas maiores temperaturas, o que reduz o teor de água na carne de forma mais rápida e intensa. A combinação desses efeitos reforça a importância do controle de  $T_{ar}$ , no processo de assamento, uma vez que ele afeta simultaneamente o tempo de cocção e a suculência do produto final.

Figura 14 - Estudo de Condições de Processo (Temperatura do forno ( $T_{ar}$ )): a) Perfil de temperatura e b) Perfil de Umidade em base seca ( $X_{BS}$ )



Fonte: Autores, 2025

Como esperado, a temperatura do forno ( $T_{ar}$ ) influenciou significativamente os perfis de temperatura e umidade durante o processo de cocção. Temperaturas mais elevadas resultaram em um aumento mais rápido da temperatura interna do frango, conforme também observado por Rabeler et al. (3), que demonstraram que o aumento de  $T_{ar}$  intensifica o fluxo de calor do ar para a superfície do alimento, devido à elevação do gradiente térmico, acelerando o aquecimento do centro do produto.

O tempo necessário para que a temperatura central atingisse o valor de segurança microbiológica (74 °C) diminuiu com o aumento da temperatura do forno, reduzindo-se de aproximadamente 17 minutos a 180 °C para 11 minutos a 220 °C. Este comportamento permite estabelecer condições de cocção otimizadas que garantam a segurança térmica e qualidade sensorial do produto, além de sugerir potencial de economia energética devido à diminuição do tempo de processo.

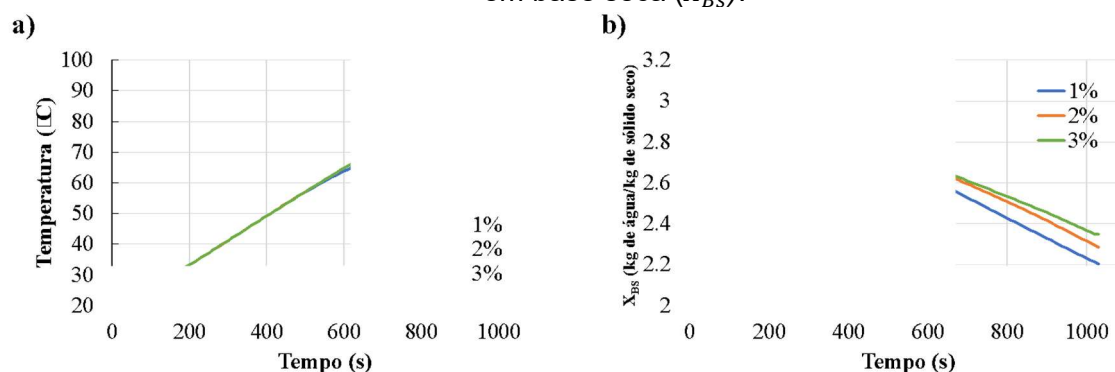
A Figura 15 apresenta os resultados do estudo do efeito da umidade relativa do ar no forno, mantendo a temperatura constante em 200 °C. Observa-se na Figura 15a que a variação da  $UR$  do ambiente não impactou significativamente o perfil de temperatura central do produto. No entanto, a Figura 15b mostra que o aumento da  $UR$  reduz a perda de umidade do frango ao longo do processo de cocção.

Esse efeito é atribuído à diminuição do gradiente de pressão de vapor entre a superfície da carne e o ar do forno, reduzindo a taxa de evaporação da água na superfície. Ambientes com maior  $UR$  atuam como uma barreira à secagem superficial, permitindo maior retenção de água e, conseqüentemente, maior suculência no produto final. Este resultado reforça a importância do controle da umidade do ar no interior do forno como uma estratégia para otimizar a qualidade do alimento assado.

Nas Figuras 15a e 15b, observa-se o efeito da elevação da  $UR$  de 1,0% para 3,0% sobre o comportamento térmico e a perda de massa do peito de frango durante o cozimento. Verifica-se que tanto o teor de umidade quanto a temperatura da amostra são afetados por essa variação, evidenciando que a  $UR$  influencia simultaneamente os mecanismos de transferência de calor e massa.

Com o aumento da  $UR$ , a perda de umidade do produto foi significativamente reduzida, uma vez que o gradiente de pressão de vapor entre a superfície da carne e o ar do forno diminuiu, restringindo o processo de evaporação. Esse efeito limita o resfriamento evaporativo, o que favorece um aquecimento mais eficiente da carne e acelera a elevação da temperatura interna, conforme demonstrado nos perfis simulados.

Figura 15. Estudo das condições de processo: efeito da umidade relativa do ar ( $UR$ ) no assamento do peito de frango. (a) Temperatura central ao longo do tempo; (b) Umidade em base seca ( $X_{BS}$ ).



Fonte: Autores, 2025

A influência da  $UR$  sobre a temperatura central do produto também foi notável. Em ambientes com maior  $UR$ , observou-se um aquecimento mais rápido, condizente com a menor dissipação de energia pela evaporação de água superficial. Este resultado está em concordância com o estudo de Chen et al. (9), que relatou tempos de cocção reduzidos em ambientes com  $UR$  elevada, atribuídos ao aumento do fluxo de calor líquido transferido para o alimento sob essas condições.

## CONCLUSÕES

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional para descrever os fenômenos de transferência de calor e massa durante o assamento de peito de frango em forno por convecção natural. Diferentemente de trabalhos anteriores, que frequentemente adotam geometrias simplificadas ou modelos bidimensionais, este estudo incorporou técnicas de fotogrametria para reconstruir a geometria realista do produto, aproximando as simulações das condições reais de cocção industrial e doméstica.

As equações de conservação de energia e massa, associadas a parâmetros físico-químicos e condições iniciais e de contorno, foram implementadas e resolvidas numericamente no software *COMSOL Multiphysics®*. O modelo demonstrou boa capacidade preditiva ao reproduzir com precisão os perfis de temperatura e umidade em diferentes regiões do alimento ao longo do tempo. Outra contribuição inédita foi a avaliação paramétrica integrada da difusividade da água, taxa de gotejamento, temperatura do forno e umidade relativa do ar, permitindo identificar os fatores mais críticos tanto para a eficiência do processo quanto para a qualidade final do alimento.

Portanto, mesmo com as simplificações assumidas, o modelo proposto se mostrou eficaz para descrever os principais fenômenos físicos envolvidos na cocção de carnes e se diferencia dos modelos tradicionais ao integrar geometria real, análises paramétricas múltiplas e potencial de acoplamento com cinéticas de qualidade. Ele pode ser utilizado como ferramenta preditiva inédita

para estimar tempo de cozimento, perda de umidade e otimizar condições de processo, além de apresentar potencial para prever atributos como cor, textura, encolhimento e inativação microbiana, contribuindo diretamente para o desenvolvimento de produtos e equipamentos em ambientes industriais e domésticos.

## REFERÊNCIAS

1. ABPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. *Relatório anual 2022*. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2022/05/Relatorio-Anual-ABPA-2022-1.pdf>.
2. PEREIRA, S. Gerenciamento de cadeia de suprimentos: análise da avaliação de desempenho de uma cadeia de carne e produtos industrializados de frango no Brasil [tese]. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas; 2003. 357 p. <https://doi.org/10.1590/s1981-67232013005000033>.
3. 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*. 2018;237:60–8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.016>.
4. PATHARE, P. B.; ROSKILLY, A. P. Quality and energy evaluation in meat cooking. *Food Engineering Reviews*. 2016;8(4):435–47. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9143-5>.
5. FEYISSA, A. H. *Robust modelling of heat and mass transfer in processing of solid foods* [tese]. Lyngby: Technical University of Denmark; 2013.
6. VAN DER SMAN, R. G. M. Moisture transport during cooking of meat: an analysis based on Flory–Rehner theory. *Meat Science*. 2007;76(4):730–8. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.02.014>.
7. BISCEGLIA, B. et al. Food cooking process: numerical simulation of the transport phenomena. *COMSOL Conference*, 2013. Disponível em: <https://www.comsol.com/paper/food-cooking-process-numerical-simulation-of-the-transport-phenomena-15441>.
8. RABELER, F. *Mechanistic modelling of heat and mass transfer in processing of solid and semi-solid foods* [tese]. Lyngby: Technical University of Denmark; 2020.
9. CHEN, H.; MARKS, B. P.; MURPHY, R. Y. Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. *Journal of Food Engineering*, London, v. 42, n. 3, p. 139–146, 2000.
10. FEYISSA, A. H.; ADLER-NISSEN, J.; GERNAEY, K. Model of heat and mass transfer with moving boundary during roasting of meat in convection-oven. In: *COMSOL European Conference*, 2009.
11. VAN DER SMAN, R. G. M. Modeling cooking of chicken meat in industrial tunnel ovens with the Flory-Rehner theory. *Meat Science*. 2013;95(4):940–57. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.05.037>.
12. AHMAD, S.; KHAN, M. A.; KAMIL, M. Mathematical modeling of meat cylinder cooking. *LWT – Food Science and Technology*. 2015;60(2):678–83. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.061>.
13. DATTA, A.; RAKESH, V. *An introduction to modeling of transport processes*. Cambridge: Cambridge University Press; 2010.
14. OILLIC, S.; PEÑA, M.; BOLTE, J. Kinetic analysis of cooking losses from beef and other animal muscles heated in a water bath – effect of sample dimensions and prior freezing and ageing. *Meat Science*. 2011;88(3):338–46. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.01.001>.
15. CHIAVARO, E.; MAGNANI, A.; RINALDI, M.; ROSE, C.; BACCI, M. Cooking of pork Longissimus dorsi at different temperature and relative humidity values: effects on selected physico-chemical properties. *Journal of Food Engineering*. 2009;93(2):158–65. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.010>.
16. VAN KOERTEN, K. N.; DE JONG, P.; BUS, M.; VAN DER POL, C.; VAN DER SCHOOT, B.; LAMMERTINK, R. G. H. Modelling water evaporation during frying with an evaporation dependent heat transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*. 2017;197:60–7. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.11.007>.

17. GOÑI, S. M.; SALVADORI, V. O. Vision system for 3D reconstruction of irregular food products. *Journal of Food Engineering*. 2010;99(3):327–33. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.021>.
18. GOÑI, S. M.; PURLIS, E.; SALVADORI, V. O. Geometry modelling of food materials from magnetic resonance imaging. *Journal of Food Engineering*. 2008;88(4):561–7. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.020>.
19. SCHOEMAN, M.; LORENZ, K.; ENGELHARDT, M.; DREYER, M.; BAUER, S. Imaging food microstructure using X-ray computed tomography. *Food Research International*. 2016;89:195–210. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.004>.
20. DATTA, A. K. Toward computer-aided food engineering: mechanistic frameworks for evolution of product, quality and safety during processing. *Journal of Food Engineering*. 2016;176:9–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.010>.
21. ZHOU, L.; NYBERG, K.; ROWAT, A. C. Understanding diffusion theory and Fick's law through food and cooking. *Advances in Physiology Education*. 2015;39(3):192–7. <https://doi.org/10.1152/advan.00133.2014>.
22. FEYISSA, A. H.; ADLER-NISSEN, J.; GERNAEY, K. Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. *Journal of Food Engineering*. 2011;106(3):228–35. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.014>.
23. SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à termodinâmica da engenharia química*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2007.
24. PEREIRA, T. E. J.; SANTOS, J. P. dos; SOUZA, C. S. de; ARAUJO, M. A. M. Propriedades termofísicas da carne branca de frango: efeito da temperatura e do conteúdo de umidade. *Brazilian Journal of Food Technology*. 2013;16(4):278–84.
25. SILVA, T. H. L.; MONTEIRO, R. L.; SALVADOR, A. A.; LAURINDO, J. B.; CARCIOFI, B. A. M. Kinetics of bread physical properties in baking depending on actual finely controlled temperature. *Food Control*. 2022;137:108898. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108898>.
26. PORCIUNCULA, B. D. A.; HUBINGER, M. D.; HENRIQUES, J. A. Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. *Journal of Food Engineering*. 2013;119(3):490–6. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.011>.
27. ALINOVI, M.; MUCCHETTI, G. A coupled photogrammetric–finite element method approach to model irregular shape product freezing: mozzarella cheese case. *Food and Bioproducts Processing*. 2020;122:98–110. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.03.010>.
28. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Safe minimum internal temperature chart*. Washington, D.C.: USDA; 2020. Disponível em: <https://www.fsis.usda.gov/food-safety/safe-food-handling-and-preparation/food-safety-basics/safe-temperature-chart>.