

UNIVERSIDADE DE UBERABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÓLEO EM BATATAS
FRITAS.**

MARIA EDUARDA REIS LIMA DE PAULO

UBERABA-MG

2025

UNIVERSIDADE DE UBERABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÓLEO EM BATATAS
FRITAS**

Maria Eduarda Reis Lima de Paulo

ORIENTADORES: Prof(a). Dr(a). Ana Paula Silva
Capuci

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade de Uberaba-UNIUBE como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

UBERABA-MG

2025

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

P285t Paulo, Maria Eduarda Reis Lima de.
Técnicas para redução de absorção de óleo em batatas fritas / Maria Eduarda Reis Lima de Paulo. – Uberaba (MG), 2025.
43 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Orientadores: Profa. Dra. Ana Paula Silva Capuci e Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Batatas. 2. Frituras. 3. Massa – Transferência. 4. Óleos e gorduras. 5. Amido. I. Capuci, Ana Paula Silva. II. Finzer, José Roberto Delalibera. III. Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 635.21

MARIA EDUARDA REIS LIMA DE PAULO


**TÉCNICAS PARA REDUÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÓLEO EM BATATAS
FRITAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química
do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química - Mestrado Profissional da Universidade de
Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos
Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 29/08/2025

BANCA EXAMINADORA:



Prof(a). Dr(a). Ana Paula Silva Capuci – Orientador(a)
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA CAROLINA BORGES SILVA
Data: 12/05/2025 13:41:16-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr(a). Ana Carolina Borges Silva
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre esteve e está comigo nos momentos da minha vida me ajudando a superar os desafios.

Agradeço também aos meus familiares, em especial aos meus pais Renata e Ailton, meu marido Bernardo e minha irmã Brunna pelo apoio incondicional durante todo o programa, que fizeram presentes em todos os momentos, me incentivando e sempre me mostrando que os sonhos podem se tornar realidades. E aos meus filhos Bento e Cecília que são minha motivação diária.

Não poderia deixar de agradecer a minha orientadora Prof(a). Dr(a) Ana Paula Silva Capuci pela orientação, por toda dedicação, paciência, confiança, contribuição, incentivo e por acreditar no meu potencial profissional. Sempre guardarei em minha memória tudo que fez por mim e no coração o respeito e imensa gratidão.

Meus agradecimentos, ao Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer pelas orientações e contribuições de modo geral, por todo suporte necessário fornecido para o desenvolvimento da dissertação e pelo convite e oportunidade concedida de participar do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade de Uberaba-UNIUBE.

Aos órgãos de fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação (Processos: MPR-01119-16; APQ-01203-23).

E por fim, a todos, que colaboraram no desenvolvimento deste trabalho e fizeram parte desta conquista. Muito Obrigada!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Processamento de batatas pré-fritas e suas implicações estruturais	4
2.1.1. Recepção e pesagem.....	4
2.1.2. Lavagem	6
2.1.3. Descascamento.....	6
2.1.4. Corte.....	7
2.1.5. Branqueamento	9
2.1.6. Secagem.....	10
2.1.7. Fritura.....	11
2.2. Operação de fritura.....	12
2.2.1. Métodos de Fritura	13
2.2.2. Efeito de fritura nos alimentos.....	16
2.2.3. Equipamentos de fritura.....	17
2.3. Transferência de calor e Variação do volume da batata	18
2.3.1. Transferência de Calor Durante a Fritura.....	18
2.4. Mecanismo de absorção de óleo- Amido Gelatinoso	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Material	22
3.3. Preparação das batatas	22
3.4. Preparo da solução de amido gelatinizado	24
3.5. Pré-tratamento das batatas.....	24
3.5.1. Branqueamento e Secagem.....	24
3.5.2. Tratamento com amido gelatinizado	25
3.6. Etapa de Fritura.....	25
3.7. Quantificação da massa de óleo	26

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1. Umidade.....	27
4.2. Determinação da massa de óleo absorvida.....	27
4.3. Contração na secagem dos paralelepípedos de batata	31
4.4. Curvas de fritura dos paralelepípedos de batata	33
5. CONCLUSÃO E SUGESTÃO	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de uma linha de produção de batata palito pré-processada.	4
Figura 2- Batatas higienizadas.....	22
Figura 3- Padronização do tamanho das batatas.....	23
Figura 4- Batatas enumeradas e prontas para a próxima etapa.	23
Figura 5- Analisador de Umidade da marca Mettler Toledo, modelo HE53.	23
Figura 6- Solução de amido a 5%.....	24
Figura 7- Secador do tipo Pardal da marca New Hobby.....	25
Figura 8- Tratamento das batatas com amido gelatinizado.....	25
Figura 9- Batatas após etapa de fritura.....	26
Figura 10- Formação de cavidades em cubos de batata.....	33
Figura 11- Curvas de secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação de peso específico, teor de água, matéria seca e amido em batatas. ..	5
Tabela 2- Teor de Umidade.	27
Tabela 3- Cálculos da massa de óleo da batata Monalisa sem tratamento: 10 repetições.	28
Tabela 4- Cálculos da massa de óleo da batata Monalisa após branqueamento e desidratação: 10 repetições.	28
Tabela 5- Cálculos da massa de óleo da batata Monalisa após amido gelatinizado e desidratação: 10 repetições.	29
Tabela 6- Cálculos da massa de óleo da batata Asterix sem tratamento: 10 repetições.	29
Tabela 7- Cálculos da massa de óleo da batata Asterix após branqueamento e desidratação: 10 repetições.	30
Tabela 8- Cálculos da massa de óleo da batata Asterix após amido gelatinizado e desidratação: 10 repetições.	30

RESUMO

A batata (*Solanum tuberosum* L.) é amplamente consumida na forma frita, processo que promove incorporação significativa de óleo e elevação do valor calórico do produto. Considerando a crescente demanda por alimentos com menor teor lipídico, este estudo investigou estratégias de pré-tratamento visando reduzir a absorção de óleo durante a fritura das cultivares Monalisa (*Solanum tuberosum* L. cv. Monalisa) e Asterix (*Solanum tuberosum* L. cv. Asterix). Foram avaliados dois tratamentos de pré-fritura: (i) branqueamento a 100°C por 30 s seguido de secagem superficial a 60°C por 45 min e (ii) imersão em solução de amido gelatinizado a 5% (m/v). Após os tratamentos, os palitos de batata foram submetidos à fritura por imersão em óleo a 180°C. Determinaram-se o teor de umidade e a massa de óleo absorvida por balanço de massa. Os resultados indicaram que o branqueamento seguido de secagem promoveu redução significativa da umidade inicial; entretanto, observou-se aumento da incorporação de óleo após a fritura. Esse comportamento é atribuído ao aumento da porosidade estrutural decorrente da remoção prévia de água, favorecendo mecanismos capilares durante o resfriamento pós-fritura. O tratamento com amido gelatinizado resultou na formação de uma camada superficial gelatinosa, conferindo maior crocância ao produto, porém não reduziu de forma consistente a absorção lipídica nas condições estudadas. Observou-se ainda contração volumétrica dos paralelepípedos durante a fritura, permitindo a análise comparativa do comportamento estrutural entre as cultivares. A partir do estudo complementar de secagem de cubos de 5 mm de aresta em leito vibro-jorrado, verificou-se que dados cinéticos de secagem podem auxiliar na previsão qualitativa do comportamento durante a fritura. Conclui-se que, nas condições avaliadas, os pré-tratamentos empregados foram eficazes na redução do teor de umidade, porém não promoveram redução da absorção de óleo. Os resultados reforçam a complexidade dos mecanismos de transferência simultânea de calor e massa envolvidos na fritura e indicam a necessidade de ajustes estruturais ou de formulação para obtenção de produtos com menor teor lipídico.

Palavras-Chave: batata frita; fritura por imersão; amido gelatinizado; absorção de óleo; transferência de massa.

ABSTRACT

Potato (*Solanum tuberosum* L.) is widely consumed in fried form, a process that significantly increases oil uptake and caloric content. In response to the growing demand for lower-fat food products, this study investigated pre-treatment strategies aimed at reducing oil absorption during deep-fat frying of the cultivars Monalisa (*Solanum tuberosum* L. cv. Monalisa) and Asterix (*Solanum tuberosum* L. cv. Asterix). Two pre-frying treatments were evaluated: (i) blanching at 100°C for 30 s followed by surface drying at 60°C for 45 min, and (ii) immersion in a 5% (w/v) gelatinized starch solution. After treatment, potato sticks were fried by immersion in oil at 180°C. Moisture content and oil uptake were determined by mass balance analysis. Results showed that blanching followed by drying significantly reduced the initial moisture content; however, an increase in oil incorporation after frying was observed. This behavior is attributed to the structural porosity increase resulting from prior water removal, which enhances capillary-driven oil uptake during post-frying cooling. The gelatinized starch treatment formed a superficial gel layer that improved product crispness but did not consistently reduce lipid absorption under the tested conditions. Volumetric shrinkage of the parallelepiped samples during frying was also observed, enabling comparative structural analysis between cultivars. Additionally, complementary drying experiments using 5 mm potato cubes in a vibro-spouted bed indicated that drying kinetics data may assist in qualitatively predicting frying behavior. Under the evaluated conditions, the proposed pre-treatments effectively reduced moisture content but did not decrease oil absorption. These findings highlight the complexity of simultaneous heat and mass transfer phenomena involved in deep-fat frying and suggest that structural or formulation adjustments are required to achieve meaningful lipid reduction.

Keywords: deep-fat frying; oil uptake; gelatinized starch; moisture reduction; mass transfer.

1. INTRODUÇÃO

A batata (*Solanum tuberosum* L.) destaca-se entre as principais culturas alimentares do mundo, tanto pelo volume de produção quanto pela versatilidade de aplicação culinária e industrial. Seu tubérculo apresenta elevada umidade (aproximadamente 80%), além de carboidratos, predominantemente na forma de amido, proteínas e minerais (EMBRAPA, 2015). No Brasil, parcela significativa da produção destina-se ao processamento industrial, especialmente na forma de batatas pré-fritas congeladas, chips e batata-palha (EMBRAPA, 2016).

A fritura por imersão constitui uma das principais formas de processamento, promovendo características sensoriais desejáveis, como crocância, aroma e coloração típica. Entretanto, o processo está associado à incorporação significativa de óleo ao produto final, podendo elevar substancialmente o teor lipídico, a depender das condições operacionais e das propriedades estruturais da matéria-prima (SAGUY; PINTHUS, 1995). A absorção de óleo é um fenômeno complexo, resultante de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa, envolvendo evaporação da água interna, formação de crosta superficial e desenvolvimento de uma matriz porosa.

Do ponto de vista fenomenológico, a fritura por imersão caracteriza-se como um processo altamente transiente, governado por gradientes intensos de temperatura e pressão interna. A rápida transferência de calor do óleo para a superfície do alimento promove vaporização quase instantânea da água superficial, seguida pela formação de uma crosta desidratada. Simultaneamente, ocorre migração de umidade do interior para a superfície por difusão e fluxo convectivo induzido pela pressão de vapor. A remoção de água leva à formação de uma rede porosa cuja morfologia depende da taxa de aquecimento, da composição do tecido vegetal e do histórico de pré-tratamentos térmicos. Durante o resfriamento pós-fritura, a condensação do vapor interno reduz a pressão nos poros recém-formados, estabelecendo um gradiente capilar que favorece a sucção de óleo para o interior da matriz sólida. Assim, a absorção lipídica não ocorre exclusivamente durante a etapa de imersão em óleo quente, mas também é significativamente influenciada por mecanismos estruturais e termodinâmicos subsequentes, associados à porosidade efetiva e à conectividade da rede capilar.

Estudos recentes reforçam essa abordagem mecanística, demonstrando que a absorção de óleo depende fortemente da interação entre transferência simultânea de calor e massa, propriedades microestruturais e fenômenos capilares (RANI et al., 2023). Liu et

al. (2021) evidenciaram que o perfil e a distribuição de poros formados durante a fritura influenciam diretamente a retenção de óleo, destacando o papel do gradiente de pressão estabelecido no resfriamento. De forma complementar, Del Rosario-Santiago et al. (2023) modelaram parâmetros de transferência de calor e massa para descrever quantitativamente a absorção pós-fritura, reforçando a importância da estrutura porosa e das propriedades termofísicas do alimento.

Diante da crescente demanda por produtos com menor teor de gordura, diferentes estratégias têm sido propostas para mitigar a absorção lipídica, incluindo a aplicação de revestimentos à base de amido e a realização de pré-tratamentos térmicos como branqueamento e secagem parcial. O amido gelatinizado pode atuar como barreira superficial, reduzindo a permeabilidade à penetração de óleo, enquanto o branqueamento e a secagem podem modificar a microestrutura do tecido vegetal, alterando a porosidade e, conseqüentemente, o comportamento de absorção durante a fritura.

Apesar dos avanços recentes na modelagem e compreensão mecânica do processo, ainda há lacunas quanto ao efeito combinado de pré-tratamentos térmicos e revestimentos amiláceos sobre o teor de umidade, a contração volumétrica e a absorção de óleo em diferentes cultivares de batata. A resposta pode variar em função das características estruturais específicas de cada cultivar, tornando necessária a avaliação comparativa sob condições controladas.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo investigar estratégias de pré-tratamento para redução da absorção de óleo durante a fritura por imersão das cultivares Monalisa (*Solanum tuberosum* L. cv. Monalisa) e Asterix (*Solanum tuberosum* L. cv. Asterix). Foram avaliados dois tratamentos: (i) branqueamento seguido de secagem superficial e (ii) aplicação de solução de amido gelatinizado. Além da quantificação do teor de umidade e da massa de óleo absorvida, analisou-se a contração volumétrica das amostras, buscando correlacionar modificações estruturais com o comportamento observado durante a fritura.

Para facilitar a compreensão das etapas desenvolvidas ao longo do trabalho, a Dissertação foi organizada na forma de capítulos, quais sejam:

- Capítulo 1 intitulado “**Introdução**”, que aborda o tema, o problema de pesquisa, a justificativa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

- Capítulo 2 intitulado “**Revisão Bibliográfica**”, que aborda os principais aspectos relacionados à Dissertação, fornecendo uma base geral para o entendimento de todo o trabalho;
- Capítulo 3 intitulado “**Material e Métodos**” que aborda os procedimentos experimentais realizados para a avaliação do teor de gordura em batatas.
- Capítulo 4 intitulado “**Resultados e Discussão**” que apresenta os resultados obtidos nos experimentos através de cálculos, tabelas e gráficos;
- Capítulo 5 intitulado “**Conclusão e sugestões**” que apresenta as Conclusões da Dissertação, bem como apresenta sugestões de futuras pesquisas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processamento de batatas pré-fritas e suas implicações estruturais

A batata (*Solanum tuberosum* L.) é amplamente utilizada como matéria-prima para produtos processados, destacando-se as batatas pré-fritas congeladas, devido à sua aceitação sensorial e conveniência. No processamento industrial, a qualidade do produto é definida por uma sequência de operações unitárias que influenciam diretamente a composição, a microestrutura e a resposta do alimento durante a fritura, incluindo a retenção de umidade, a formação de crosta e a incorporação de óleo (EMBRAPA, 2005).

De forma geral, o processamento de batatas pré-fritas pode ser representado pelo fluxograma apresentado na Figura 1, envolvendo etapas de recepção e seleção da matéria-prima, lavagem, descascamento, corte, branqueamento, secagem parcial e fritura. Cada uma dessas operações pode afetar propriedades críticas do produto, como teor de sólidos, açúcares redutores, porosidade e integridade estrutural, o que justifica sua descrição e discussão na presente revisão.

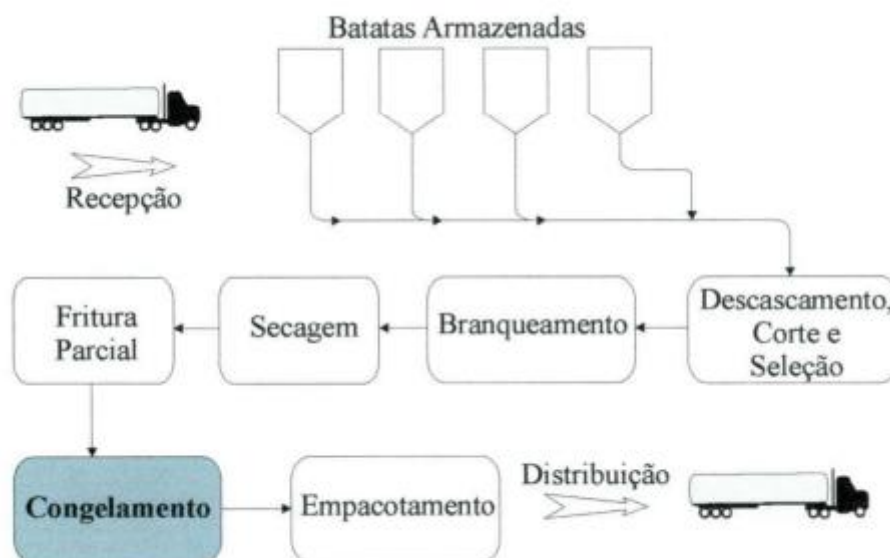


Figura 1- Esquema de uma linha de produção de batata palito pré-processada.

Fonte- Montague et al. (2003).

2.1.1. Recepção e pesagem

A recepção da matéria-prima constitui etapa crítica no processamento industrial de batatas pré-fritas, pois características físico-químicas iniciais do tubérculo influenciam diretamente o comportamento durante as etapas térmicas subsequentes. Além da inspeção

visual quanto à integridade física, ausência de defeitos fisiológicos, brotação e danos mecânicos, é fundamental a avaliação de parâmetros tecnológicos como teor de matéria seca, concentração de açúcares redutores e peso específico (EMBRAPA, 2005).

O peso específico (PE) é amplamente utilizado como indicador indireto do teor de sólidos totais da batata, especialmente do conteúdo de amido, sendo determinado pelo método hidrostático, conforme descrito na Equação (1):

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Peso da amostra ao natural}}{\text{Peso da amostra ao natural} - \text{Peso da amostra imersa em água}} \quad (1)$$

Valores mais elevados de peso específico estão associados a maior teor de matéria seca e menor fração volumétrica inicial de água. Do ponto de vista fenomenológico, essa condição pode influenciar a cinética de evaporação durante a fritura, a formação de crosta superficial e a estrutura porosa resultante. Estudos recentes indicam que a microestrutura desenvolvida durante o processamento térmico exerce papel determinante na absorção de óleo, sendo fortemente dependente do teor de sólidos e da distribuição de poros formados (LIU et al., 2021; RANI et al., 2023). Assim, a seleção de lotes com peso específico adequado contribui para maior previsibilidade do comportamento de incorporação lipídica.

A classificação das batatas segundo peso específico e teor de matéria seca, apresentada na Tabela 1, constitui ferramenta industrial relevante para direcionamento da matéria-prima ao processamento de pré-fritas.

Tabela 1- Relação de peso específico, teor de água, matéria seca e amido em batatas.

Peso específico	Água (%)	Sólidos totais (% peso seco)	Amido (%)
1,040	86,4	13,6	7,8
1,050	85,4	15,5	9,6
1,060	82,6	17,4	11,4
1,065	81,7	18,3	12,3
1,080	78,8	21,2	15,0
1,090	77,0	23,0	16,7
1,100	75,1	26,7	20,2

Fonte - Gould, 1988.

2.1.2. Lavagem

A etapa de lavagem tem como principal finalidade a remoção de impurezas físicas, como solo, resíduos orgânicos e partículas aderidas à superfície dos tubérculos. No processamento industrial, essa operação é geralmente realizada por sistemas de imersão com agitação mecânica ou por equipamentos equipados com escovas rotativas e jatos de água pressurizada (EMBRAPA, 2005).

Embora frequentemente tratada como etapa exclusivamente higiênica, a lavagem pode influenciar propriedades superficiais relevantes para o processamento subsequente. A remoção de partículas sólidas e fragmentos de solo reduz irregularidades superficiais e modifica a rugosidade externa do tubérculo, podendo afetar a transferência de calor nas etapas térmicas posteriores.

Do ponto de vista fenomenológico, a condição superficial do alimento influencia o coeficiente de transferência de calor na interface óleo–alimento durante a fritura. A formação inicial da crosta depende do equilíbrio entre fluxo de calor recebido e taxa de evaporação superficial de água, sendo sensível às condições de contorno térmicas estabelecidas na superfície do produto (SAGUY; PINTHUS, 1995; RANI et al., 2023). Superfícies mais limpas e uniformes tendem a apresentar comportamento térmico mais homogêneo, favorecendo formação uniforme da crosta inicial.

Além disso, a remoção de partículas aderidas evita a formação de microzonas de aquecimento diferencial ou pontos de ebulição localizados, que poderiam alterar a cinética de evaporação superficial e a distribuição inicial de poros na crosta formada. A integridade superficial é particularmente relevante, pois microdanos na epiderme do tubérculo podem modificar os caminhos preferenciais de difusão de umidade durante o aquecimento, influenciando a estrutura porosa resultante (LIU et al., 2021).

Embora a lavagem não altere significativamente a composição interna da batata, pode influenciar indiretamente os fenômenos de transferência simultânea de calor e massa que governam as etapas de branqueamento e fritura, reforçando a importância de controle adequado dessa operação no contexto do processamento de batatas pré-fritas.

2.1.3. Descascamento

O descascamento é a etapa responsável pela remoção da epiderme e de camadas superficiais do tubérculo, podendo ser realizado por métodos mecânicos, abrasivos ou por vapor sob pressão. No processamento industrial de batatas pré-fritas, o descascamento a

vapor é amplamente empregado devido à sua eficiência e menor perda de polpa comestível (EMBRAPA, 2005).

Do ponto de vista estrutural, a epiderme da batata atua como uma barreira natural à transferência de massa. Sua remoção expõe o parênquima subjacente, composto predominantemente por células ricas em amido e delimitadas por paredes celulares de natureza polissacarídica. Essa modificação altera as condições de contorno para os fenômenos de difusão de umidade e transferência de calor nas etapas subsequentes.

O método de descascamento pode impactar diretamente a integridade superficial do tecido vegetal. Processos abrasivos tendem a promover maior dano mecânico, aumentando a rugosidade e potencialmente expondo estruturas celulares internas. Já o descascamento por vapor provoca gelatinização parcial superficial do amido, podendo modificar a resistência estrutural da camada externa (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Essas alterações influenciam a cinética de evaporação durante a fritura, uma vez que a difusão de umidade do interior para a superfície depende da resistência oferecida pelas camadas externas do alimento. Liu et al. (2021) demonstraram que modificações estruturais superficiais afetam a formação de poros e a conectividade capilar, parâmetros diretamente relacionados à absorção de óleo. Além disso, Rani et al. (2023) destacam que a integridade inicial da superfície influencia a uniformidade da formação da crosta e os gradientes de pressão estabelecidos durante o resfriamento pós-fritura.

Assim, embora frequentemente tratada como etapa preparatória, o descascamento exerce papel relevante na definição da microestrutura inicial que condicionará os fenômenos de transferência simultânea de calor e massa nas etapas de branqueamento, secagem e fritura.

2.1.4. Corte

A etapa de corte tem como finalidade padronizar o formato e as dimensões das batatas destinadas ao processamento, sendo usualmente realizada por sistemas mecânicos que produzem tiras com seção transversal retangular ou quadrada (EMBRAPA, 2005). No caso das batatas tipo palito, o controle dimensional é particularmente relevante, pois a espessura do corte influencia diretamente os fenômenos de transferência de calor e massa durante a fritura (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Do ponto de vista físico, a redução das dimensões do tubérculo altera a razão área superficial/volume (A/V), parâmetro determinante na taxa de aquecimento e na

cinética de evaporação da água. Para um sólido prismático, essa relação pode ser representada genericamente pela Equação (2):

$$\frac{A}{V} \propto \frac{1}{L} \quad (2)$$

onde L representa a dimensão característica (espessura). Assim, quanto menor a espessura do corte, maior a área superficial relativa disponível para troca térmica e maior a taxa potencial de evaporação superficial.

O aumento da razão A/V favorece aquecimento mais rápido e formação antecipada da crosta superficial. Entretanto, também pode intensificar a perda de umidade e a formação de rede porosa mais conectada, influenciando a absorção de óleo durante o resfriamento pós-fritura. Estudos recentes demonstram que a espessura do produto afeta a distribuição de poros e a conectividade capilar, parâmetros diretamente relacionados à retenção de óleo (LIU et al., 2021; RANI et al., 2023).

A espessura do corte também determina o tempo necessário para que o centro geométrico do produto atinja temperaturas próximas à ebulição da água. Produtos mais espessos apresentam maior resistência interna à condução térmica, resultando em gradientes de temperatura mais pronunciados e evaporação mais lenta no interior (SAGUY; PINTHUS, 1995). Essa dinâmica influencia a formação da estrutura porosa e os gradientes de pressão estabelecidos durante o processo, fatores críticos para a incorporação lipídica descrita na literatura recente (DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023).

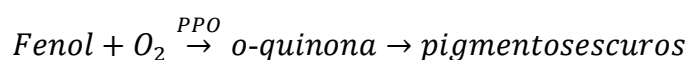
Além disso, o corte promove ruptura celular mecânica, expondo amido e componentes intracelulares à superfície. Essa exposição pode modificar a viscosidade superficial durante o aquecimento e interferir na adesão inicial do óleo à superfície do alimento (RANI et al., 2023).

Dessa forma, o controle dimensional na etapa de corte não apenas padroniza o produto do ponto de vista comercial, mas também condiciona os fenômenos estruturais e de transporte que governam a formação de crosta, a perda de umidade e a absorção de óleo.

2.1.5. Branqueamento

O branqueamento consiste na aplicação de tratamento térmico em meio aquoso ou por vapor, geralmente em temperaturas entre 70 e 100 °C, por tempo controlado. No processamento de batatas pré-fritas, essa etapa é empregada para inativação enzimática, redução de açúcares redutores e modificação estrutural do tecido vegetal (EMBRAPA, 2005).

Do ponto de vista bioquímico, o principal alvo do tratamento térmico é a polifenoloxidase (PPO), enzima responsável pela oxidação de compostos fenólicos na presença de oxigênio molecular. A reação catalítica conduz à formação de o-quinonas altamente reativas, que subsequentemente polimerizam originando pigmentos escuros. O mecanismo simplificado pode ser representado como:



A inativação térmica da PPO ocorre por desnaturação proteica induzida por temperatura, resultando na perda de conformação tridimensional necessária à atividade catalítica (TOMÁS-BARBERÁN; ESPÍN, 2001). A eficiência da inativação depende do binômio tempo–temperatura, sendo que tratamentos insuficientes podem permitir atividade residual enzimática.

Sob a perspectiva fenomenológica, entretanto, o branqueamento não deve ser interpretado apenas como etapa de controle bioquímico. A elevação da temperatura promove gelatinização parcial do amido superficial, solubilização de pectinas da lamela média e aumento da permeabilidade celular. Essas modificações alteram a difusividade efetiva de umidade no tecido vegetal, que pode ser descrita pela Equação (3), segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (3)$$

onde X representa o teor de umidade e D_{eff} a difusividade efetiva.

A alteração de D_{eff} influencia a cinética de remoção de água nas etapas subsequentes de secagem e fritura. Modificações estruturais promovidas pelo

branqueamento podem favorecer maior conectividade de microcanais ou, dependendo das condições aplicadas, promover colapso parcial de estruturas celulares. Estudos recentes demonstram que pré-tratamentos térmicos afetam a morfologia da rede porosa formada durante a fritura, impactando a conectividade capilar e, conseqüentemente, a absorção de óleo no resfriamento pós-fritura (LIU et al., 2021; RANI et al., 2023; DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023).

Assim, o branqueamento atua simultaneamente como etapa de estabilização bioquímica e como operação de modificação estrutural, redefinindo propriedades difusivas e mecânicas que condicionam os fenômenos de transferência simultânea de calor e massa nas etapas subseqüentes do processamento.

2.1.6. Secagem

A secagem parcial é aplicada após o branqueamento com o objetivo de reduzir o teor superficial de umidade antes da fritura. No processamento industrial de batatas pré-fritas, essa etapa contribui para maior estabilidade térmica inicial e pode influenciar a absorção de óleo, ao modificar as condições de transferência de massa durante a imersão em óleo quente (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Do ponto de vista estrutural, a remoção controlada de água altera a fração volumétrica de umidade e modifica a organização da matriz celular. A cinética de secagem em tecidos vegetais é predominantemente governada por mecanismos difusivos, sendo a difusividade efetiva dependente da temperatura, da porosidade e da integridade das paredes celulares (FELLOWS, 2009). Alterações nesses parâmetros impactam a distribuição de umidade residual e a formação de microcanais estruturais.

A redução do teor inicial de água modifica a dinâmica térmica durante a fritura. Amostras com menor umidade superficial apresentam menor geração instantânea de vapor na interface óleo-alimento, o que pode alterar o regime de ebulição inicial e a formação da crosta (SAGUY; PINTHUS, 1995). No entanto, secagens mais intensas podem induzir contração volumétrica significativa e rearranjos estruturais que aumentam a conectividade capilar.

Estudos recentes indicam que modificações na microestrutura prévia à fritura afetam diretamente a morfologia da rede porosa formada durante o aquecimento, influenciando a retenção de óleo no resfriamento subseqüente (LIU et al., 2021; RANI et al., 2023). Del Rosario-Santiago et al. (2023) demonstraram que variações no teor inicial

de umidade alteram os gradientes de pressão estabelecidos no resfriamento, modificando a magnitude da sucção capilar.

Assim, o efeito da secagem parcial sobre a absorção de óleo não é linear. Reduções moderadas de umidade podem diminuir a incorporação lipídica ao reduzir a fração evaporável inicial, enquanto secagens excessivas podem favorecer a formação de microestruturas mais permeáveis, intensificando a absorção capilar (LIU et al., 2021).

O controle das condições operacionais de secagem, temperatura, tempo e velocidade do ar, torna-se, portanto, determinante para o equilíbrio entre remoção de umidade e preservação estrutural, influenciando diretamente o desempenho do produto na etapa subsequente de fritura (FELLOWS, 2009).

2.1.7. Fritura

A fritura por imersão é um processo térmico intensivo caracterizado pela transferência simultânea de calor do óleo quente para o alimento e de massa do alimento para o meio externo. O mecanismo inicia-se com rápido aquecimento da superfície, promovendo vaporização quase instantânea da água superficial e formação de uma camada desidratada, denominada crosta (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Durante a imersão, o fluxo de calor pode ser descrito, em primeira aproximação, por difusão transiente no interior do sólido (Equação 4):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (4)$$

em que T representa a temperatura e α a difusividade térmica. Simultaneamente, a evaporação da água gera fluxo convectivo interno induzido por pressão de vapor, contribuindo para a formação de rede porosa progressivamente conectada.

A fritura ocorre sob regime de ebulição nucleada na interface óleo-superfície, sendo o coeficiente de transferência de calor influenciado pela temperatura do óleo, propriedades físico-químicas do meio lipídico e características superficiais do alimento (SAGUY; PINTHUS, 1995). A geração de vapor atua inicialmente como barreira parcial à penetração de óleo, reduzindo o contato direto entre a fase lipídica e a matriz sólida.

Com o avanço do processo e redução do teor de umidade, ocorre aumento da porosidade e consolidação da crosta. A estrutura formada é determinante para o comportamento posterior de absorção lipídica. Estudos recentes demonstram que a morfologia e conectividade dos poros são fatores críticos na retenção de óleo, especialmente durante o resfriamento subsequente (LIU et al., 2021; RANI et al., 2023).

A absorção de óleo não ocorre predominantemente durante a fase de imersão sob intensa geração de vapor, mas principalmente no estágio de resfriamento, quando a condensação do vapor interno reduz a pressão nos poros recém-formados, estabelecendo gradiente capilar favorável à sucção de óleo para o interior da matriz (DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023). Esse mecanismo pode ser interpretado como fluxo capilar em meio poroso, governado por diferenças de pressão interfacial.

Além da dinâmica térmica e estrutural, fatores como espessura do produto, teor inicial de umidade, intensidade de pré-tratamentos térmicos e características da cultivar influenciam a formação da microestrutura e, conseqüentemente, a magnitude da absorção de óleo.

Dessa forma, a fritura deve ser compreendida como processo acoplado de transferência simultânea de calor e massa, no qual as modificações estruturais progressivas condicionam a incorporação lipídica final. A compreensão desses mecanismos é essencial para o desenvolvimento de estratégias de pré-tratamento voltadas à redução do teor de gordura em batatas pré-fritas.

2.2. Operação de fritura

A fritura por imersão é uma operação de processamento térmico na qual o alimento é submerso em óleo a temperaturas tipicamente entre 160 e 190 °C, promovendo simultaneamente transferência de calor do meio lipídico para o sólido e transferência de massa do alimento para o meio, sobretudo pela evaporação de água (SAGUY; PINTHUS, 1995). Em batatas tipo palito, a fritura é responsável por desenvolver atributos sensoriais desejáveis, como crocância e coloração característica, ao mesmo tempo em que pode levar à incorporação significativa de óleo, com implicações nutricionais e tecnológicas.

Do ponto de vista fenomenológico, a etapa inicial da fritura é marcada por aquecimento rápido da superfície e intensa ebulição nucleada na interface óleo–alimento, resultando em remoção acelerada de água superficial e formação de uma crosta

desidratada (SAGUY; PINTHUS, 1995). À medida que a crosta se desenvolve, estabelece-se um sistema poroso cuja morfologia depende da temperatura do óleo, do tempo de processo, do teor inicial de umidade, da espessura do corte e do histórico de pré-tratamentos. A literatura recente enfatiza que a microestrutura formada durante a fritura controla a conectividade capilar e, conseqüentemente, a retenção de óleo no produto final (RANI et al., 2023).

A absorção de óleo, embora frequentemente atribuída ao período de imersão, tem sido amplamente associada ao estágio pós-fritura. Durante o resfriamento, a condensação do vapor interno reduz a pressão nos poros e microcanais recém-formados, favorecendo sucção capilar e retenção de óleo no interior da matriz (LIU et al., 2021; DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023). Assim, a operação de fritura deve ser compreendida como processo acoplado, em que o desempenho final em termos de teor de óleo é fortemente influenciado pela combinação entre remoção de umidade, formação de crosta e evolução estrutural do meio poroso.

Do ponto de vista operacional, parâmetros como temperatura do óleo, tempo de fritura, razão massa de produto/volume de óleo, agitação e condição do óleo (histórico térmico e degradação) afetam o coeficiente de transferência de calor, o regime de ebulição e a estabilidade da crosta (SAGUY; PINTHUS, 1995). A escolha dessas condições deve considerar não apenas o desenvolvimento sensorial, mas também sua influência sobre a microestrutura e os mecanismos de incorporação lipídica descritos na literatura (RANI et al., 2023). Dessa forma, o controle criterioso da operação de fritura é determinante para reduzir variabilidade entre lotes e para viabilizar estratégias de pré-tratamento voltadas à minimização da absorção de óleo.

No contexto deste trabalho, essas relações são discutidas com base na variação de umidade e na absorção de óleo estimada por balanço de massa, correlacionando-se as alterações estruturais induzidas por pré-tratamentos ao comportamento na fritura.

2.2.1. Métodos de Fritura

Os dois métodos principais de fritura comercial distinguem-se pelo método de transferência de calor. São a fritura superficial e a fritura por imersão na gordura.

A fritura superficial, também denominada fritura por contato, caracteriza-se pela transferência de calor predominantemente por condução a partir de uma superfície aquecida revestida com fina camada de óleo. Diferentemente da fritura por imersão, o

alimento não é completamente submerso no meio lipídico, havendo contato térmico direto com a superfície metálica aquecida (FELLOWS, 2009).

Nessa configuração, o aquecimento ocorre de forma assimétrica, sendo mais intenso na face em contato com a superfície quente. O regime térmico é dominado por condução transiente no interior do alimento, conforme discutido anteriormente na Seção 2.1.7, porém com menor contribuição convectiva externa quando comparado à fritura por imersão.

A ausência de imersão total implica menor intensidade de ebulição na interface externa e menor geração de vapor na superfície exposta ao ar. Como consequência, a remoção de umidade tende a ser menos uniforme e a formação de crosta ocorre de maneira gradual e espacialmente heterogênea (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Do ponto de vista estrutural, essa assimetria térmica pode resultar em gradientes internos mais pronunciados e em diferenças na microestrutura formada entre as faces do produto. A formação da rede porosa é, portanto, menos homogênea quando comparada à fritura profunda.

Em relação à absorção de óleo, a disponibilidade limitada de fase lipídica reduz a magnitude da incorporação. A retenção ocorre predominantemente por adesão superficial e infiltração localizada nos pontos de contato, sendo menos dependente de mecanismos capilares extensivos associados ao resfriamento em fritura por imersão (RANI et al., 2023).

Devido à menor uniformidade térmica e à dificuldade de controle preciso das condições de processo, a fritura superficial possui aplicação industrial restrita no processamento de batatas pré-fritas, sendo mais comum em contextos culinários ou em equipamentos específicos de contato contínuo.

A fritura por imersão consiste na submersão completa do alimento em óleo aquecido, geralmente entre 160 e 190 °C, promovendo intensa transferência de calor por convecção na interface óleo-superfície e condução no interior do sólido (SAGUY; PINTHUS, 1995). Essa configuração proporciona maior uniformidade térmica quando comparada à fritura superficial, devido ao contato integral com o meio lipídico.

No estágio inicial da imersão, o rápido aquecimento da superfície induz ebulição nucleada da água superficial, gerando fluxo vigoroso de vapor que se desloca do interior para o exterior do alimento. Esse fluxo de vapor atua como barreira temporária à

penetração de óleo, reduzindo o contato direto entre a fase lipídica e a matriz sólida durante a fase de intensa evaporação (SAGUY; PINTHUS, 1995).

À medida que o teor de umidade diminui e a taxa de geração de vapor decresce, ocorre consolidação de uma crosta desidratada cuja espessura aumenta progressivamente. A formação dessa camada está associada à criação de rede porosa interconectada, cuja morfologia depende do teor inicial de umidade, espessura do corte, intensidade de pré-tratamentos e condições operacionais de fritura (LIU et al., 2021; RANI et al., 2023).

A incorporação de óleo, embora limitada durante a fase de ebulição intensa, torna-se mais significativa no estágio de resfriamento pós-fritura. A condensação do vapor interno reduz a pressão nos poros recém-formados, estabelecendo gradiente de pressão capilar que favorece a sucção de óleo para o interior da matriz. A força motriz desse fenômeno pode ser interpretada pela relação de pressão capilar, demonstrada na Equação (5):

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (5)$$

em que γ representa a tensão superficial do óleo, θ o ângulo de contato e r o raio efetivo do poro.

Pelos termos da expressão, observa-se que poros de menor raio apresentam maior potencial de sucção capilar, o que explica a maior retenção lipídica em estruturas caracterizadas por microcanais finos e altamente conectados (RANI et al., 2023; DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023).

Além dos aspectos estruturais, fatores operacionais como temperatura do óleo, tempo de imersão e razão produto/óleo influenciam o coeficiente de transferência de calor, a estabilidade da crosta e o perfil de umidade final, afetando indiretamente a magnitude da absorção de óleo (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Portanto, a fritura por imersão deve ser compreendida como processo acoplado e dinâmico, no qual transferência térmica, evaporação, formação de microestrutura e fenômenos capilares interagem de forma não linear, determinando o teor de gordura final do produto.

2.2.2. Efeito de fritura nos alimentos

A fritura provoca alterações simultâneas na composição, microestrutura e propriedades sensoriais dos alimentos, resultantes do acoplamento entre aquecimento rápido, evaporação de água e interações químicas induzidas por alta temperatura. Em matrizes amiláceas como a batata, os efeitos mais relevantes incluem redução do teor de umidade, formação de crosta superficial, desenvolvimento de porosidade, mudanças de textura (crocância) e incorporação de lipídios (SAGUY; PINTHUS, 1995).

Do ponto de vista microestrutural, a remoção de água e a expansão/colapso de cavidades internas levam à formação de uma rede porosa cuja conectividade controla tanto a transferência de massa durante o processo quanto a retenção de óleo no produto. A literatura recente enfatiza que a morfologia da porosidade (poros abertos, tortuosidade e distribuição de raios) é determinante para a sucção capilar de óleo durante o resfriamento pós-fritura, etapa associada à maior fração de óleo retido (LIU et al., 2021; DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023).

Além dos fenômenos físicos, a fritura desencadeia mudanças químicas relevantes. A temperaturas elevadas, ocorrem reações de escurecimento não enzimático, especialmente a reação de Maillard, favorecida pela presença de açúcares redutores e aminoácidos, contribuindo para cor e aroma característicos. Na batata, a intensidade do escurecimento depende do teor de açúcares redutores do tubérculo e das condições tempo-temperatura do processo, justificando o uso de pré-tratamentos como branqueamento para reduzir essa variabilidade (FELLOWS, 2009).

A textura final do alimento é fortemente condicionada pelo equilíbrio entre a rigidez da crosta desidratada e a umidade residual do miolo. Produtos com crosta mais espessa e menor umidade superficial apresentam maior crocância; entretanto, secagens excessivas ou formações porosas altamente conectadas podem intensificar a incorporação de óleo durante o resfriamento, devido ao aumento do potencial capilar da estrutura (RANI et al., 2023).

Adicionalmente, a qualidade do óleo de fritura pode afetar tanto a transferência de calor quanto a incorporação lipídica. A degradação térmica e oxidativa do óleo modifica viscosidade e tensão superficial, podendo alterar molhabilidade e dinâmica de retenção de óleo na superfície e nos poros do alimento (SAGUY; PINTHUS, 1995). Assim, a operação de fritura não deve ser analisada apenas como etapa de cocção, mas como processo de engenharia em que parâmetros operacionais, propriedades do meio

lipídico e evolução estrutural do alimento determinam conjuntamente a qualidade sensorial e o teor de gordura do produto.

2.2.3. Equipamentos de fritura

Os equipamentos de fritura utilizados no processamento de batatas pré-fritas podem ser classificados, de forma geral, em sistemas descontínuos (batelada) e contínuos. Em escala industrial, predominam fritadeiras contínuas com esteiras transportadoras, que permitem controle preciso de temperatura, tempo de residência e razão produto/óleo, garantindo maior uniformidade térmica e reprodutibilidade do processo (FELLOWS, 2009).

Em sistemas contínuos, o alimento é conduzido por correias submersas em banho de óleo aquecido, com circulação forçada e controle automatizado de temperatura. A estabilidade térmica do óleo é fator crítico, uma vez que flutuações podem alterar o coeficiente de transferência de calor e modificar a taxa de evaporação de água na interface alimento-óleo (SAGUY; PINTHUS, 1995).

A razão entre massa de produto e volume de óleo exerce influência significativa na dinâmica térmica do sistema. Cargas elevadas de alimento provocam queda momentânea de temperatura do óleo, alterando o regime de ebulição e a cinética de formação de crosta. Esse efeito pode impactar indiretamente a estrutura porosa desenvolvida e, conseqüentemente, a absorção de óleo no produto final.

Outro aspecto relevante é o sistema de renovação e filtração do óleo. A degradação térmica e oxidativa do meio lipídico modifica propriedades como viscosidade e tensão superficial, influenciando molhabilidade e comportamento capilar do óleo na matriz porosa do alimento (SAGUY; PINTHUS, 1995). Assim, a manutenção da qualidade do óleo não apenas preserva atributos sensoriais, mas também contribui para controle mais consistente da incorporação lipídica.

Fritadeiras industriais modernas incorporam sistemas de controle de temperatura com precisão elevada, circulação uniforme do óleo e remoção contínua de partículas sólidas desprendidas do alimento, reduzindo degradação acelerada do meio lipídico. Esses elementos são particularmente relevantes quando se busca avaliar experimentalmente efeitos de pré-tratamentos sobre absorção de óleo, pois minimizam variáveis externas associadas ao equipamento.

Portanto, a escolha e o controle adequado do equipamento de fritura são determinantes para garantir reprodutibilidade experimental e coerência entre condições operacionais e fenômenos estruturais discutidos nas seções anteriores.

2.3. Transferência de calor e Variação do volume da batata

A fritura de batatas caracteriza-se como processo transiente no qual a transferência de calor e a variação volumétrica da matriz vegetal ocorrem de forma acoplada. O aquecimento rápido induz evaporação de água, formação de crosta e alterações estruturais progressivas que afetam tanto a dinâmica térmica quanto a microestrutura final do produto (SAGUY; PINTHUS, 1995).

2.3.1. Transferência de Calor Durante a Fritura

Na fritura por imersão, o alimento é submetido a intenso gradiente térmico entre o óleo aquecido e o interior inicialmente frio da batata. O calor é transferido predominantemente por convecção na interface óleo-superfície e por condução no interior da matriz sólida, conforme discutido na Seção 2.1.7.

Durante os instantes iniciais do processo, a temperatura superficial atinge rapidamente valores próximos à do óleo, promovendo ebulição nucleada da água e intensa geração de vapor. Esse fenômeno altera continuamente as propriedades térmicas efetivas do material, uma vez que a fração volumétrica de água — principal contribuinte para a capacidade térmica do tecido vegetal — diminui progressivamente (FELLOWS, 2009).

À medida que a umidade é removida e a crosta se consolida, ocorre redução da condutividade térmica efetiva da camada superficial, o que modifica a resistência térmica do sistema. Assim, o aquecimento do núcleo passa a depender tanto da espessura remanescente do miolo quanto da integridade estrutural da crosta formada.

A espessura característica do corte exerce influência direta no tempo necessário para que o centro geométrico atinja temperaturas elevadas. Produtos mais espessos apresentam maior resistência térmica interna, prolongando o tempo de evaporação completa da água interna e alterando o perfil de formação da rede porosa (LIU et al., 2021).

Portanto, a transferência de calor na fritura deve ser interpretada como fenômeno dinâmico e dependente da evolução estrutural do alimento, sendo fortemente influenciada pela geometria do produto, pelo teor inicial de umidade e pelas condições operacionais.

2.3.2. Variação do Volume e Contração Estrutural

A variação volumétrica da batata durante a fritura está intimamente associada à remoção de água e às transformações físicas da matriz celular. Inicialmente, a geração de vapor interno pode provocar expansão localizada; entretanto, com o avanço da perda de umidade, predomina o fenômeno de contração volumétrica devido ao colapso estrutural parcial da matriz (RANI et al., 2023).

A contração volumétrica pode ser expressa como a variação relativa entre o volume inicial e o volume final do produto, conforme Equação (6):

$$\text{Contração} = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (6)$$

em que V_0 representa o volume inicial e V o volume após o processamento térmico.

A magnitude da contração depende de fatores como teor inicial de umidade, intensidade do aquecimento, taxa de evaporação e histórico de pré-tratamentos (LIU et al., 2021). Estruturas submetidas a secagem parcial prévia tendem a apresentar comportamento distinto durante a fritura, podendo reduzir deformações abruptas e alterar a conectividade dos poros formados.

Do ponto de vista microestrutural, a contração influencia diretamente a distribuição e o tamanho dos poros. Estruturas que sofrem contração moderada podem gerar rede porosa estável, enquanto contração excessiva pode resultar em colapso estrutural e redução da permeabilidade interna. Essas modificações são determinantes para o comportamento capilar durante o resfriamento, etapa associada à retenção de óleo (DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023).

Além disso, a relação entre perda de umidade e redução volumétrica não é necessariamente linear. Em estágios iniciais, pequenas perdas de água podem não produzir variação significativa de volume; contudo, após determinado limiar estrutural, a remoção adicional de umidade pode intensificar a contração devido ao enfraquecimento das paredes celulares (RANI et al., 2023).

Assim, a análise integrada da transferência de calor e da variação volumétrica é essencial para compreender a evolução estrutural da batata durante a fritura e sua relação com a formação da rede porosa responsável pela incorporação lipídica.

2.4. Mecanismo de absorção de óleo- Amido Gelatinoso

A incorporação de óleo em produtos fritos é fenômeno governado por interações entre transferência de calor, remoção de umidade e evolução estrutural da matriz alimentar. Em sistemas ricos em amido, como a batata, a gelatinização desempenha papel central na formação da microestrutura responsável pela retenção lipídica (BOUCHON, 2009; RANI et al., 2023).

Durante o aquecimento na presença de água, os grânulos de amido sofrem intumescimento, perda de organização cristalina e lixiviação parcial de amilose, formando matriz viscoelástica contínua. Esse processo, conhecido como gelatinização, ocorre tipicamente entre 60 e 80 °C, faixa rapidamente atingida nas etapas iniciais da fritura (FENNEMA; DAMODARAN; PARKIN, 2017). A transição estrutural altera significativamente as propriedades reológicas e a permeabilidade da matriz superficial.

A formação da crosta durante a fritura está intimamente associada à gelatinização e subsequente desidratação do amido. À medida que a água é removida, a matriz gelatinizada sofre rearranjos estruturais, podendo resultar tanto em estrutura relativamente coesa quanto em formação de microcanais e fissuras, dependendo da intensidade térmica e da taxa de perda de umidade (BOUCHON, 2009).

A morfologia final da rede porosa influencia diretamente o mecanismo capilar de incorporação de óleo. Como discutido anteriormente, a sucção lipídica durante o resfriamento está associada à diferença de pressão capilar, inversamente proporcional ao raio efetivo dos poros.

Assim, alterações microestruturais decorrentes da gelatinização impactam indiretamente a magnitude da absorção de óleo. Estruturas com poros finos e interconectados podem intensificar o potencial capilar, enquanto camadas contínuas e pouco fissuradas podem atuar como barreiras à penetração lipídica (LIU et al., 2021; DEL ROSARIO-SANTIAGO et al., 2023).

Além disso, o amido gelatinizado pode contribuir para aumento da viscosidade superficial, reduzindo mobilidade do óleo na interface alimento–meio lipídico. Estudos indicam que revestimentos à base de amido ou hidrocolóides podem reduzir significativamente a absorção de óleo ao formar filmes coesos que limitam a permeabilidade da superfície durante a fritura (BOUCHON, 2006; RANI et al., 2023).

Entretanto, a atuação do amido não é unidirecional. Gelatinização excessiva seguida de contração volumétrica intensa pode gerar fissuração estrutural, favorecendo a

formação de microcanais altamente conectados e aumentando a sucção capilar no resfriamento. Dessa forma, o papel do amido gelatinizado no mecanismo de absorção de óleo é dual: pode atuar como barreira física ou como mediador da formação de rede porosa favorável à retenção lipídica.

A compreensão desse equilíbrio estrutural é fundamental para interpretar os efeitos dos pré-tratamentos térmicos e das condições operacionais avaliadas neste estudo, especialmente no que se refere à variação volumétrica e à microestrutura desenvolvida durante a fritura.

Dessa forma, a absorção de óleo não deve ser interpretada como fenômeno isolado, mas como consequência emergente da interação entre transferência térmica, perda de umidade, contração estrutural e reorganização da matriz amilácea.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Neste trabalho foram integrados os seguintes equipamentos e materiais: Analisador de Umidade da marca Mettler Toledo, modelo HE53; Balança Analítica; Bandeja; Béquer; Chapa Aquecedora; Cortador Doméstico; Panela de Alumínio; Paquímetro; Secador do tipo Pardal da marca New Hobby.

3.2. Metodologia Experimental

A unidade experimental foi montada no Laboratório de Engenharia Química da Universidade de Uberaba- UNIUBE, onde foram realizados os experimentos para o estudo de absorção de óleo em revestimento de produtos empanados nas batatas do tipo Monalisa e Asterix. A seguir são descritas as etapas do procedimento experimental.

3.3. Preparação das batatas

Foram utilizadas duas cultivares de batatas (*Solanum tuberosum* L.): Monalisa e Asterix. As batatas foram adquiridas no comércio local da cidade de Uberaba-MG. Elas foram lavadas e colocadas em uma solução de hipoclorito de sódio a 2,5% de cloro ativo (15 mL de hipoclorito de sódio para cada 1000 mL de água) por 15 minutos (ANVISA. Agência de Nacional de Vigilância Sanitária. Cartilha sobre boas práticas para serviços de alimentação. Resolução - RDC nº 216/2004) e em seguida foram enxaguadas em água corrente, conforme Figura 2.



Figura 2- Batatas higienizadas.

Fonte- Autor, 2025.

Em seguida, foram cortadas com cortador doméstico e padronizadas, com ajuda de um paquímetro, para o tamanho de 8 cm de comprimento, 0,5 cm de largura, (secção transversal quadrada) conforme Figura 3.



Figura 3- Padronização do tamanho das batatas.

Fonte- Autor, 2025.

Após a padronização do tamanho, as batatas foram pesadas e transferidas para uma bandeja e cada batata foi enumerada de 1 a 10, para que fizesse o controle de cada amostra, como pode ser verificado na Figura 4. Também foi realizado teste de umidade das batatas in natura, utilizando o Analisador de Umidade da marca Mettler Toledo, modelo HE53, conforme Figura 5.



Figura 4- Batatas enumeradas e prontas para a próxima etapa.

Fonte- Autor, 2025.



Figura 5- Analisador de Umidade da marca Mettler Toledo, modelo HE53.

Fonte- Autor, 2025.

3.4. Preparo da solução de amido gelatinizado

Um volume de 95 mL de água destilada em um béquer de 250 mL foi aquecido, em uma chapa aquecedora, até atingir a temperatura de 65°C. Em seguida, 5 g de amido foi adicionado a água a fim de se obter uma solução de 5% (m/v) de amido. A mistura foi continuamente agitada para que não se formasse grumos e se tornasse homogênea (Figura 6). Essa concentração foi selecionada após testes com diversas concentrações diferentes.

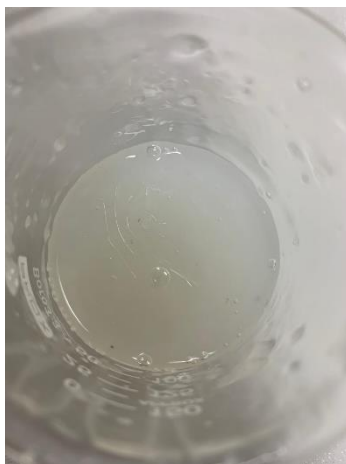


Figura 6- Solução de amido a 5%.

Fonte- Autor, 2025.

3.5. Pré-tratamento das batatas

As batatas higienizadas e cortadas no tamanho padronizado foram submetidas a dois pré-tratamentos diferentes antes da fritura:

- Branqueamento seguido de secagem e,
- Embebição na solução 5% amido seguido de secagem.

Para cada tipo de batata, Monalisa e Asterix, foi adotada uma “testemunha” que consistiu na fritura das batatas sem qualquer tratamento. Ou seja, as batatas foram higienizadas, cortadas no tamanho padrão e em seguida foram submetidas a fritura.

3.5.1. Branqueamento e Secagem

As batatas Monalisa e Astérix, foram submetidas a etapa de branqueamento, que consiste em adicioná-las em água destilada a 100°C por um período de 30 s, e em seguida colocadas em água gelada com gelo ($\pm 0^\circ\text{C}$) também por 30 s.

Após o branqueamento, as batatas permaneceram por 45 minutos a 60°C em um secador do tipo Pardal da marca New Hobby (Figura 7), com intuito de diminuir umidade. A umidade foi verificada após a secagem, bem como a massa de cada indivíduo.



Figura 7- Secador do tipo Pardal da marca New Hobby.

Fonte- Google Imagens, 2025.

3.5.2. Tratamento com amido gelatinizado

As espécies de batatas Monalisa e Asterix foram mergulhadas uma a uma em uma solução de amido gelatinizado a 5% (m/v), conforme demonstrado na Figura 8.



Figura 8- Tratamento das batatas com amido gelatinizado.

Fonte- Autor, 2025.

Em seguida, as batatas permaneceram por 45 minutos a 60°C em um secador do tipo Pardal da marca New Hobby, com intuito de diminuir umidade. A umidade foi verificada após a secagem, bem como a massa de cada indivíduo.

3.6. Etapa de Fritura

A unidade experimental de fritura foi composta de uma panela de alumínio contendo óleo de soja até altura de 11 cm, cerca de 1 L de óleo; um fogão de 4 bocas; uma colher do tipo escumadeira de inox e um termômetro.

A fritura foi iniciada quando o óleo de soja atingiu a temperatura de 180°C. Cada batata foi frita por imersão completa durante 60 s separadamente. Após a fritura, as batatas foram transferidas para bandeja enumeradas e resfriadas à temperatura ambiente. Em seguida, foram pesadas em balança analítica, conforme Figura 9.



Figura 9- Batatas após etapa de fritura.

Fonte – Autor, 2025.

3.7. Quantificação da massa de óleo

A análise da massa de óleo absorvida em cada amostra foi realizada por balanço de massa. Para tal, considerou-se que água foi perdida por evaporação durante a etapa de fritura.

O procedimento para determinação da massa de óleo absorvida foi o seguinte:

- Primeiro, utilizando a massa e a umidade inicial da batata, determinou-se a massa seca (sólidos) e massa de água, de acordo com a Equação (2):

$$m_{\text{sólidos}} = m_{T_{\text{inicial}}} \times (1 - \text{umidade}_{\text{inicial}})$$

$$m_{\text{água}_{\text{inicial}}} = m_{T_{\text{inicial}}} - m_{\text{sólidos}}$$
(2)

- Em seguida, com a umidade final, após a fritura, e massa de sólidos, foi calculada a umidade que restou em cada amostra, conforme Equação (3):

$$\text{Umidade} = \frac{m_{\text{água}_{\text{final}}}}{m_{\text{água}_{\text{final}}} + m_{\text{sólidos}}}$$
(3)

- Para determinar a massa de óleo, utilizou-se a massa final da batata, a massa de sólidos e a massa final de água, como demonstrado na Equação (4) a seguir:

$$m_{T_{\text{final}}} = m_{\text{sólidos}} + m_{\text{água}_{\text{final}}} + m_{\text{óleo}}$$
(4)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Umidade

O teor de umidade foi determinado para cada espécie de batata, em três momentos distintos: in natura, após desidratação e após fritura. Os resultados estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2- Teor de Umidade.

Batata	In Natura	Desidratação após Branqueamento	Desidratação após Amido Gelatinizado	Após Fritura		
				In Natura	Desidratação após Branqueamento	Desidratação após Amido Gelatinizado
Monalisa	75%±1	68%±1	66%±1	55%±1	36%±1	46%±1
Asterix	72%±1	67%±1	71%±1	50%±1	36%±1	49%±1

Fonte – Autor, 2025.

Nota-se que, a maior perda de umidade se deu nas batatas que passaram pelo branqueamento seguido de desidratação.

4.2. Determinação da massa de óleo absorvida

A Tabela 3 apresenta os resultados dos experimentos realizados com a batata Monalisa sem qualquer tratamento. A Tabela 4 apresenta os resultados da batata Monalisa submetida a branqueamento e a Tabela 5 mostra os resultados da batata Monalisa submetida a tratamento com amido gelatinizado.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos experimentos realizados com a batata Asterix sem qualquer tratamento. A Tabela 7 apresenta os resultados da batata Asterix submetida a branqueamento e a Tabela 8 mostra os resultados da batata Asterix submetida a tratamento com amido gelatinizado.

Tabela 3- Cálculos da massa de óleo da batata Monalisa sem tratamento: 10 repetições.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Sólidos (g)	Massa água inicial (g)	Massa após fritura (g)	Massa água após fritura (g)	Massa óleo (g)
1	7,643	1,911	5,732	4,859	2,335	0,613
2	7,827	1,957	5,870	5,308	2,392	0,960
3	7,93	1,983	5,948	5,573	2,423	1,167
4	7,711	1,928	5,783	5,233	2,356	0,949
5	7,767	1,942	5,825	5,478	2,373	1,163
6	7,901	1,975	5,926	5,772	2,414	1,383
7	7,566	1,892	5,675	5,392	2,312	1,189
8	7,748	1,937	5,811	5,476	2,367	1,172
9	7,578	1,895	5,684	5,249	2,316	1,039
10	7,713	1,928	5,785	5,366	2,357	1,081
Média	7,738	1,935	5,804	5,371	2,365	1,071
Desvio	0,124	0,031	0,093	0,241	0,038	0,205

Fonte – Autor, 2025.

Tabela 4- Cálculos da massa de óleo da batata Monalisa após branqueamento e desidratação: 10 repetições.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Sólidos (g)	Massa água inicial (g)	Massa após fritura (g)	Massa água após fritura (g)	Massa óleo (g)
1	7,791	1,948	5,843	4,978	1,096	1,935
2	7,753	1,938	5,815	4,836	1,090	1,807
3	7,643	1,911	5,732	4,709	1,075	1,723
4	7,393	1,848	5,545	4,534	1,040	1,646
5	7,652	1,913	5,739	4,82	1,076	1,831
6	7,321	1,830	5,491	4,467	1,030	1,607
7	7,529	1,882	5,647	4,613	1,059	1,672
8	7,441	1,860	5,581	4,58	1,046	1,673
9	7,391	1,848	5,543	4,601	1,039	1,714
10	7,352	1,838	5,514	4,508	1,034	1,636
Média	7,527	1,882	5,645	4,665	1,058	1,725
Desvio	0,172	0,043	0,129	0,166	0,024	0,103

Fonte – Autor, 2025.

Tabela 5- Cálculos da massa de óleo da batata Monalisa após amido gelatinizado e desidratação: 10 repetições.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa c/ amido (g)	Massa Sólidos (g)	Massa água inicial (g)	Massa após fritura (g)	Massa água após fritura (g)	Massa óleo (g)
1	7,603	8,428	1,942	5,661	4,822	1,654	1,226
2	7,725	8,507	1,970	5,755	4,877	1,678	1,228
3	7,725	8,604	1,975	5,750	4,916	1,683	1,258
4	7,957	8,836	2,033	5,924	5,138	1,732	1,373
5	7,871	8,872	2,018	5,853	4,929	1,719	1,192
6	7,639	8,442	1,950	5,689	4,945	1,661	1,334
7	7,344	8,167	1,877	5,467	4,668	1,599	1,192
8	7,413	8,178	1,892	5,522	4,769	1,611	1,266
9	7,446	8,349	1,907	5,539	5,01	1,624	1,479
10	7,575	8,109	1,920	5,655	4,927	1,636	1,371
Média	7,630	8,449	1,948	5,681	4,900	1,660	1,292
Desvio	0,197	0,266	0,052	0,146	0,129	0,044	0,094

Fonte – Autor, 2025.

Tabela 6- Cálculos da massa de óleo da batata Asterix sem tratamento: 10 repetições.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Sólidos (g)	Massa água inicial (g)	Massa após fritura (g)	Massa água após fritura (g)	Massa óleo (g)
1	7,721	2,162	5,559	4,815	2,162	0,491
2	7,727	2,164	5,563	5,341	2,164	1,014
3	7,743	2,168	5,575	5,162	2,168	0,826
4	8,025	2,247	5,778	5,29	2,247	0,796
5	7,81	2,187	5,623	5,32	2,187	0,946
6	7,733	2,165	5,568	5,24	2,165	0,910
7	7,726	2,163	5,563	5,058	2,163	0,731
8	7,571	2,120	5,451	5,104	2,120	0,864
9	7,699	2,156	5,543	5,258	2,156	0,947
10	7,985	2,236	5,749	5,589	2,236	1,117
Média	7,774	2,177	5,597	5,218	2,177	0,864
Desvio	0,136	0,038	0,098	0,204	0,038	0,172

Fonte – Autor, 2025.

Tabela 7- Cálculos da massa de óleo da batata Asterix após branqueamento e desidratação: 10 repetições.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Sólidos (g)	Massa água inicial (g)	Massa após fritura (g)	Massa água após fritura (g)	Massa óleo (g)
1	7,237	2,026	5,211	4,746	1,140	1,580
2	7,397	2,071	5,326	4,901	1,165	1,665
3	7,39	2,069	5,321	5,012	1,164	1,779
4	7,303	2,045	5,258	4,952	1,150	1,757
5	7,226	2,023	5,203	4,768	1,138	1,607
6	7,18	2,010	5,170	4,936	1,131	1,795
7	7,248	2,029	5,219	4,714	1,142	1,543
8	6,983	1,955	5,028	4,397	1,100	1,342
9	6,955	1,947	5,008	4,556	1,095	1,513
10	7,321	2,050	5,271	5,007	1,153	1,804
Média	7,224	2,023	5,201	4,799	1,138	1,638
Desvio	0,151	0,042	0,109	0,204	0,024	0,150

Fonte – Autor, 2025.

Tabela 8- Cálculos da massa de óleo da batata Asterix após amido gelatinizado e desidratação: 10 repetições.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa c/ amido (g)	Massa Sólidos (g)	Massa água inicial (g)	Massa após fritura (g)	Massa água após fritura (g)	Massa óleo (g)
1	7,21	8,004	2,059	5,152	5,022	1,978	0,986
2	7,649	8,409	2,180	5,469	5,576	2,094	1,302
3	7,868	8,508	2,235	5,633	5,991	2,147	1,609
4	7,515	8,189	2,138	5,377	5,577	2,054	1,385
5	7,394	7,957	2,098	5,296	5,459	2,016	1,344
6	7,407	8,002	2,104	5,303	5,351	2,021	1,226
7	7,463	8,071	2,120	5,343	5,581	2,037	1,424
8	7,436	8,117	2,116	5,320	5,305	2,033	1,156
9	7,158	7,742	2,033	5,125	5,234	1,954	1,247
10	7,454	8,102	2,120	5,334	5,717	2,036	1,561
Média	7,455	8,110	2,120	5,335	5,481	2,037	1,324
Desvio	0,202	0,220	0,057	0,145	0,272	0,055	0,186

Fonte – Autor, 2025.

Relacionando as variedades de batata Monalisa e Axterix mostra-se que o teor inicial de sólidos e de amido em cada variedade impactou na absorção de óleo. Sendo a Asterix com teor mais elevado de sólidos, absorveu menos óleo nas condições sem tratamento (0,86g) do que a Monalisa (1,07g) sugerindo que variedades mais densas podem ser naturalmente mais resistentes à absorção.

Ao analisar os resultados dos tratamentos nas duas espécies de batata, Monalisa e Asterix, observa-se comportamento semelhante. A batata Monalisa absorveu em média 1,73 g de óleo após branqueamento e desidratação e após amido gelatinizado 1,29 g, sendo 61% e 20%, respectivamente, a mais que sem tratamento. Já a batata Axterix absorveu em média 1,64 g de óleo após branqueamento e desidratação e após amido gelatinizado 1,34 g, sendo 90% e 55%, respectivamente, a mais que sem tratamento. Destacando que a etapa de branqueamento e desidratação ocorreu a maior perda de umidade correspondendo às maiores absorções de óleo, uma vez que, a etapa de secagem deixou as batatas mais porosas, facilitando a absorção de óleo.

A difusividade da água na batata não é constante. No início da fritura, a batata apresenta alta umidade e estrutura celular íntegra, o que favorece a difusão de água líquida. À medida que a água evapora e os poros se formam, a matriz se torna mais rígida e porosa, modificando os caminhos de transporte. Além disso, o aumento da temperatura eleva a difusividade da água, mas a formação da crosta gera resistências adicionais. Após a fritura das batatas submetidas as etapas de branqueamento e desidratação, nota-se menor teor de umidade nessas batatas e, conseqüentemente, maior absorção de óleo, pois o material poroso facilitou a saída de água durante a fritura.

Convém relatar que a batata formada por camada externa de gel se mostrou mais crocante em testes preliminares de análise sensorial. A formação da crosta é consequência direta da saída de água por evaporação intensa na superfície. Essa perda cria uma camada rígida e com baixa umidade, que atua como barreira adicional à transferência de massa. Ou seja, quanto mais espessa e rígida a crosta, maior a resistência à difusão de vapor de água para o exterior. Ao mesmo tempo, a crosta torna-se a principal região de absorção de óleo por capilaridade, mostrando como os dois fenômenos estão interligados.

4.3. Contração na secagem dos paralelepípedos de batata

Muitos cereais (arroz, trigo), apresentam uma contração pequena durante a etapa de secagem e a solução analítica da segunda lei de Fick pode ser aplicada sem considerar

o encolhimento (VIOLLAZ, 1987). Alimentos que apresentam alto conteúdo de umidade (batata, maçã, beterraba), contraem-se significativamente durante a secagem. Assim, na modelagem é necessário relacionar o encolhimento volumétrico com a umidade dos sólidos (AGUERRE, 1985; SOBRAL e MENECALLI, 1986; SOBRAL, 1987; VIOLLAZ e SUAREZ, 1985).

O modelo da secagem uniforme é expresso pela Equação (5) (SUZUKI et. all., 1976), o qual é muito utilizado quando o sólido contém grande conteúdo de água.

$$A/A_0 = (bX + C)^{2/3} \quad (5)$$

Sendo: $b = \rho_0 / (X_0 + 1)$ e $C = 1 + b - \rho_0$,

A, A_0 áreas superficiais; o índice “0” corresponde a condição inicial; ρ_0 é a densidade do material.

A fenomenologia do comportamento na secagem de partículas de batata, foi estudada usando cubos de batata com arestas de 5 e 10 mm. O encolhimento dos cubos de batata durante a secagem se ajustou adequadamente ao modelo de secagem uniforme até um teor de umidade de 0,9 kg de água/kg de batata seca. Durante a secagem de cubos com arestas de 5 e 10 mm, aparecem trincas nas faces dos cubos. O modelo modificado de Fornell, denotou um bom ajuste aos pontos experimentais, e permitiu a geração de curvas características de secagem tanto na variação da temperatura quanto na velocidade do ar de secagem, úteis para modelagem computacional (FINZER, KIECKBUSCH, CAPUCI, LIMA, 2023).

Na secagem de cubos de batata, foram obtidos os parâmetros da Equação (5) obtendo-se, a Equação (6):

$$A/A_0 = (0,199X + 0,146)^{2/3} \quad (6)$$

A batata, na secagem, ocorre a formação de uma casca endurecida a qual evita que ocorra a continuidade de encolhimento ou contração volumétrica das partículas. A Figura 11, mostra que também ocorre ajustamento interno do material, com formação de cavidades nos corpos. Estas formas são bastante variadas, a Figura 11 ilustra aspectos das cavidades (FINZER E KIECKBUSCH, 1987).



Figura 10- Formação de cavidades em cubos de batata.

Fonte- FINZER, 1989.

Proporcionalmente, ocorre o encolhimento dos paralelepípedos de batata submetidos à fritura. A Equação (6), possibilita efetuar uma simulação de diferenças de contração da batata Monalisa e Asterix, submetidas à fritura.

Das Tabelas, 3, 4 e 5 da Seção 4-2, as massas médias de sólidos nas batatas fritas, foram: 1,935 g; 1,882 g e 1,948 g, respectivamente. A umidade média após a fritura, considerando a soma da massa de água mais a de óleo foram: (2,365 mais 1,071) igual a 3,436; 2,783 e 2,952, respectivamente. Usando a Equação (6), obtém-se as contrações relativas, A/A_0 , iguais 0,63; 0,58 e 0,59. Portanto a menor contração de áreas da batata ocorreu com a batata Monalisa sem tratamento antes da fritura. Já as contrações relativas para os tratamentos (branqueamento e desidratação) e (uso de amido gelatinizado e desidratação) foram similares. A contração de área relativa, da batata sem tratamento, foi 7,1%, menor dos que as dos dois outros tratamentos.

4.4. Curvas de fritura dos paralelepípedos de batata

Em fenômenos de transporte existem muitas analogias como por exemplo entre transferência de quantidade de movimento e energia. Em 1874, Osborne Reynolds foi o primeiro a mostrar que existe similaridade entre transferência de momento e de energia. Chilton e Colburn, usando dados experimentais, buscaram modificações na analogia de Reynolds que não teria as restrições de que os números Pr e Sc devem ser iguais a 1, aplicando-se à transporte de momento, calor e massa (WELTY et al, 2008).

Em transferência de massa simultânea de calor e massa, a operação de secagem usa como força motriz da diferença de concentração e de temperatura, assim como a

operação de fritura de alimentos, o que suscita a busca de analogia entre as duas operações.

Para estudar o comportamento de cubos de batata de 5 mm de aresta secando em leito vibro-jorrado, foram realizados ensaios de secagem sendo as condições do ar: temperaturas de 50, 60 e 70°C (Temperatura de bulbo úmido 23,2; 23,7 e 28°C, respectivamente). A vazão foi mantida constante em 1,3 kg/min, o que correspondeu a velocidades de 1,30; 1,34 e 1,38 m/s, referidas a seção transversal da região cilíndrica do secador. A carga dos cubos de batata era de 30,3 kg/m² e as umidades em ordem crescentes de temperatura do ar de secagem foram: $X_0 = 5,2$; $X_{eq} = 0,0345$; $X_0 = 5,1$; $X_{eq} = 0,0235$; $X_0 = 5,3$; $X_{eq} = 0,0115$ kg água/ kg batata seca. As condições de vibração foram: frequências de 12,5 a 13,5 Hz e amplitude 4 mm (FINZER et al, 2023). Os resultados experimentais foram locados em escala semilogarítmica na Figura 10, onde estão traçadas linhas que correspondem a um modelo simplificado de secagem proveniente de uma analogia com a solução analítica da segunda lei de Fick (DAUDIN, 1983), ver a Equação (7). Um ajuste matemático foi efetuado em função da temperatura T (°C) e o tempo (t) em horas. O resultado é indicado pela Equação (8).

$$X_0 = (X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq}) = A \cdot \exp(-B \cdot t) \quad (7)$$

$$\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = (-0.02424 \cdot T + 3.5572) \cdot \exp(-0.08247 \cdot T + 0.1263) \cdot t \quad (8)$$

Os resultados deste estudo foram usados para avaliar a fritura de paralelepípedos de batata, apesar da geometria ser diferente foram utilizados conceitos de proporcionalidade, onde influências geométricas e físicas ficam contidas em constante que se anula quando se efetua medidas de relações entre cocientes com cancelamento de constantes de proporcionalidade.

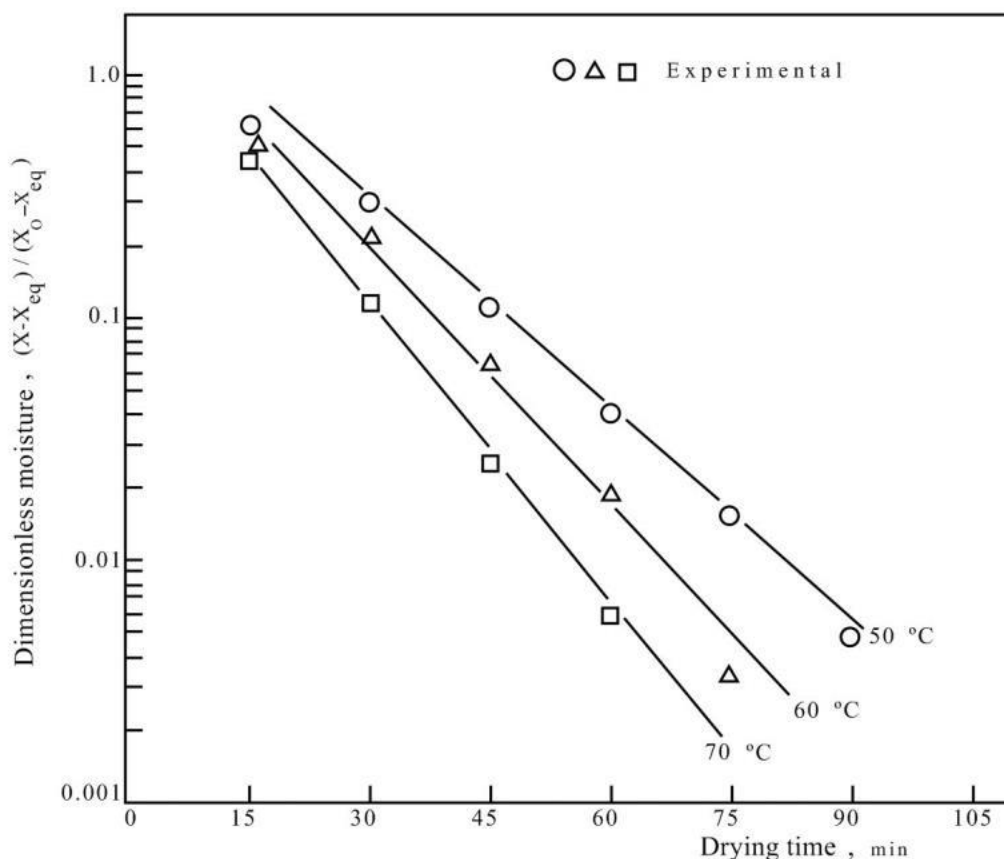


Figura 11- Curvas de secagem de cubos de batata de 5 mm de aresta.

Fonte- FINZER et al, 2023.

Do exposto, a Equação (8), se simplifica, considerando que X_{eq} é desprezível para fritura de batata em temperatura de 180°C, deste estudo, como a temperatura do óleo é constante, incluindo outras influências do secador, admite-se que o parâmetro que multiplica a exponencial é constante.

$$\frac{X}{X_0} = k \cdot \exp(-0,08247 \cdot T + 0,1263) \cdot t \quad (9)$$

Simulando o tempo de secagem de 60 segundos, que é o especificado para a fritura no estudo atual, obtém-se que a umidade final X_f é expressa por:

$$X_f = 0,89 \cdot k X_0$$

sendo: X_0 igual a 2,999 e 2,916, para a fritura com a batata in natura e com o revestimento de amido gelatinizado, respectivamente.

Isto possibilita obter: X_f amido = 2,595 k e para X_f in natura = 2,669 k, sendo o cociente entre os dois:

$$R \text{ simulado} = \frac{X_f \text{ revestido}}{X_f \text{ in natura}} = \frac{2,595}{2,669} = 0,97$$

Agora efetuando uma análise usando os resultados experimentais descritos na Tabela 3 a 5 da Seção 4-2. O fluido contido na batata ao final da fritura consiste na água residual e do óleo que foi transferido para a batata, consistindo em: $(2,365 + 1,071) = 3,436$ g e $(1,660 + 1,292 = 2,952$ g) para a batata frita *in natura* e revestida, respectivamente. Isto possibilitou calcular os X_0 respectivos, usando os dados da Tabela 2, obtendo-se:

$$X_f \text{ in natura.} = 3,436/1,935 = 1,776 \text{ e } X_f \text{ revestido} = 2,952/1,948 = 1,515.$$

Assim, com os dados experimentais:

$$R \text{ experimental} = \frac{X_f \text{ revestido}}{X_f \text{ in natura}} = \frac{1,515}{1,776} = 0,853$$

Finalmente:

$$\frac{R \text{ experimental}}{R \text{ simulado}} = \frac{0,853}{0,97} = 0,880$$

O que possibilita expressar o desvio entre o simulado e o experimental em: 13,7%.

Esse resultado, mostra que a simulação da fritura usando resultados de secagem com ar aquecido e conceitos de similaridade, possibilita prever resultados de fritura usando dados de secagem com ar aquecido. O resultado consiste em uma inovação na tecnologia de fritura de materiais alimentícios podendo ser úteis para simular curvas de fritura similares aquelas de secagem e outros parâmetros como coeficientes de transferência de massa, imprescindíveis para o projeto de equipamentos de transferência simultânea de calor e massa.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÃO

Neste trabalho foram abordados os principais aspectos relacionados à operação de fritura e técnicas para redução de absorção de óleo em batatas fritas. Com base nos diversos recobrimentos de alimentos fritos na literatura, buscou-se desenvolver neste trabalho tratamentos pré-fritura: branqueamento e secagem e de imersão em amido gelatinizado, a fim de reduzir a absorção de óleo.

Ao analisar os resultados dos tratamentos nas duas espécies de batata, Monalisa e Asterix, observou-se comportamento semelhante: a etapa de secagem deixou as batatas mais porosas, facilitando a absorção de óleo; e após a fritura das batatas submetidas as etapas de branqueamento e desidratação, quantificou-se menor teor de umidade nessas batatas e, conseqüentemente, maior absorção de óleo, pois o material poroso facilitou a saída de água durante a fritura e a “contra difusão” do óleo. Convém relatar que a batata formada por camada externa de gel se mostrou mais crocante em testes preliminares de análise sensorial.

As técnicas utilizadas neste trabalho reduziram o teor de umidade das batatas, deixando-as mais porosas, facilitando a saída de água durante a fritura e, portanto, não reduzindo a absorção de óleo. A batata Asterix, com teor mais elevado de sólidos, absorveu menos óleo nas condições sem tratamento (~0,86 g) do que a Monalisa (~1,07 g), sugerindo que variedades mais densas podem ser naturalmente mais resistentes à absorção. Conclui-se que, mesmo pequenas reduções na absorção de óleo observadas podem ser relevantes para a indústria de alimentos.

Sugere-se avaliar se a camada de amido gelatinizado realmente atuou como barreira, se possivelmente a camada foi fina e porosa, não criando uma barreira hidrofóbica eficiente. Além de buscar outras técnicas para redução de óleo em batatas fritas, buscando tipos de óleos e tempos de frituras que influenciam na perda do teor de umidade e absorção de óleo em batatas fritas, o uso de outros biopolímeros (pectina, alginato), fritura a vácuo, micro-ondas mais fritura combinada.

O estudo de secagem uniforme dos cultivares de batatas Monalisa e Asterix, mostrou a fenomenologia do comportamento na secagem de partículas de batata estudada utilizando-se cubos de batata com arestas de 5 e 10 mm. O encolhimento dos cubos durante a secagem se ajustou adequadamente ao modelo de secagem uniforme até um teor de umidade de 0,9 kg de água/kg de batata seca. Ocorreu o encolhimento dos

paralelepípedos de batata submetidos à fritura, possibilitando efetuar uma simulação de diferenças de contração da batata Monalisa e Asterix, submetidas à fritura.

Em complemento ao estudar o comportamento de cubos de batata de 5 mm de aresta secando em leito vibro-jorrado, a simulação da fritura possibilita prever resultados de fritura usando dados de secagem com ar aquecido. O resultado consiste em uma inovação na tecnologia de fritura de materiais alimentícios podendo ser úteis para simular curvas de fritura similares aquelas de secagem e outros parâmetros como coeficientes de transferência de massa, imprescindíveis para o projeto de equipamentos de transferência simultânea de calor e massa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- AGUERRE, R.J.; GABITTO, J.F and CHIRIFE, J. Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food processes controlled by internal diffusion. **International Journal of Food Science and Technology**. v.20, n.3, p.623-629, 1985.
- ALLANSON, J. Inovações em tecnologias de sistemas de cobertura nos mercados europeus de carnes e peixes. **Food Ingredients**, São Paulo, p.31-35, 1999.
- ALMEIDA, Rafaela Fernanda de. Estudo da absorção de óleo em revestimentos de produtos empanados. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2016.
- ANDREU MA; PINTO CABP; SIMON GA. 2007. Genetic markers for processing traits in potato. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 7: 67-73.
- BANGA, J. R., ALONSO, A. A., GALLARDO, J. M., Perez-Martin, R. I. (1993). Mathematical modelling and simulation of the thermal processing of anisotropic and non-homogeneous conduction-heated canned foods: Application to canned tuna. **Journal of Food Engineering**, v. 18, 369–387.
- BOTELHO, K.C.S. Aproveitamento de resíduos sólidos e subprodutos da indústria de batatas pré-fritas congeladas, 2008, 41f. Monografia (Especialização em Controle de Qualidade na Indústria de Alimentos) – Faculdades Associadas de Uberaba – FAZU, Uberaba, 2008.
- BORTOLUZZI, R. C. Empanados. In: OLIVO, R. (Ed.). O mundo do frango: cadeia produtiva da carne de frango. Criciúma: Ed. do Autor, 2006. p. 481-494.
- BOUCHON, P. Understanding oil absorption during deep-fat frying. *Advances in Food and Nutrition Research*, v. 57, p. 209–234, 2009.
- BOUCHON, P. et al. Mechanisms of oil absorption during deep-fat frying. *Food Science and Technology International*, 2006.
- CARVALHO, N. M. A secagem de sementes, 2.ed. Jaboticabal: FUNEP, 2005. 184p.
- CEPEA, Anuário 2019-2020 – Retrospectiva 2019 e Perspectiva 2020.; Hortifruti Brasil, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) – ESALQ/ USP; Ano 18, nº 196, janeiro, 2020.
- DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage para l'air chaud des produits biologiques solides. **Sciences des Aliments**. V.3, n.1, p. 1-36. 1983.

- DEGENHARDT, J. Empanamento de produtos cárneos. *Aditivos & Ingredientes*, São Paulo, n. 28, p. 77-79, set./dez. 2003.
- DEL ROSARIO-SANTIAGO, M. et al. Microstructural evolution and oil uptake mechanisms in fried starchy foods. *Food Hydrocolloids*, 2023.
- DILL, D. D.; SILVA, P. A.; LUVIELMO, M. M. Processamento de empanados: sistemas de cobertura. *Estudos Tecnológicos*, v.5, n.1, 2009.
- EMATER/RS. 2008. Batata inglesa: Histórico, conservação, dicas culinárias, aptidões e receitas. São Lourenço do Sul. Folder.
- ESTELLES; R. S.; Importância do controle da temperatura e do tratamento térmico na preservação dos nutrientes e da qualidade dos alimentos. 2003. 32 f. Monografia (Especialização em Qualidade em Alimentos) -Universidade de Brasília, Brasília, 2003. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/246#:~:text=A%20conserva%C3%A7%C3%A3o%20pelo%20calor%20pode,esporos%20ou%20%C3%A0%20multiplica%C3%A7%C3%A3o%20bacteriana>. Acesso em: 4 jun, 2025.
- FELLOWS, P. J. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática; tradução Florência Cladera Oliveira ... [et al.]. 2ª Ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. pg. 367-374.
- FENNEMA, O. R.; DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. *Fennema's Food Chemistry*. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- FERREIRA, T. Qualidade na mesa. *Bares & Restaurantes*, ano 10, n. 50, p.20-24, 2006.
- FINZER, J. R. D. e KIECKBUSCH, T. G. Desenvolvimento de um secador de leiteo vibratório: Cinética de secagem de cubos de batata. *Anais do XV Encontro sobre escoamento em Meios Porosos*, Uberlândia, v. II, p 416-429. 1987.
- FINZER, J.R.D.; KIECKBUSCH, T.G.; CAPUCI, A.P.S.; LIMA, A.D. Potato processing: phenomenology and influence of vibration on bed movement. **Revista observatorio de la economia latino americana**. Curitiba, v.21, n.8, p. 10422-10438. 2023.
- FLORES, A.F.; Desenvolvimento de nuggets enriquecidos com fibras e sem adição de glúten. Universidade Federal Tecnológica do Paraná – Curso de tecnologia de alimentos, 2012.
- GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S.; PESQUE, S. T. A secagem de sementes. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

- GL-Laboratories worldwide. Guia completo para sistemas de cobertura. Guarulhos: GLLW, 2002. 41 p.
- HONORATO DE JESUS, J.; ALVES DOS SANTOS, C.; RACOSKI, B.; ROSSI OLIVEIRA DE LIMA, R.; MARIA MINETTO BRONDANI, F. TEOR DE LIPÍDIOS DA BATATA PRÉ-FRITA: FRITURA EM DIFERENTES ÓLEOS. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 151–164, 2016. DOI: 10.31072/rcf.v7i1.357. Disponível em: <https://revista.unifaema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/357>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- INCROPERA, F. P. [ET AL. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 2008.
- KESTER, J.J; FENNEMA, O.R. Edible films and coatings: a review. **Food Technology**, vol.40, n° 12, p.47-59, 1986.
- KOZEMPEL, M. F., TOMASULA, P. M., CRAIG, J C. JR. Correlation of Moisture and Oil Concentration in French Fries, *Lebensm, Wiss. Technol.*, vol.51, p.61, 1997.
- LIU, Y. et al. Microstructure and oil absorption behavior of fried potato products. *Food Structure*, 2021.
- LOEWE, R. Ingredients selection for batters systems. In: KULP, K.; LOEWE, R. (Ed.). *Batters and breadings in food procesing*. Minnesota: American Association of Cereal Chemists, 1990. p. 11-28.
- LOPES, C. A.; BUSO, J. A. Cultivo da Batata. Instruções Técnicas da Embrapa Hortaliças, Brasília, v. 8, p.1-6. EMBRAPA, 1997.
- LUCAS, Kelcilene Cristina. Estudo da absorção de óleo em revestimento de produtos empanados. 100f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- MALLIKARJUNAN, P.; CHINNAN, M. S.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; PHILLIPS, R. D. Edible coatings for deep-fat frying of starchy products. *Lebensmittel-Wissenschaft&Technologie*, Oxford, v. 30, n. 7, p. 709-714, 1997.
- MARSHALL, M; KIM, J.; WEI, C. Enzymatic Browning in Fruits, Vegetables and Seafoods, 2000. Disponível em [http://www.fao.org/ag/ags/agsi/ENZYMFINALEnzy matic %20Browning.html](http://www.fao.org/ag/ags/agsi/ENZYMFINALEnzy%20Browning.html). Acesso em: 4 jun, 2025.
- MELLEMA, M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science & Technology*, Oxford, v. 14, n. 9, p. 364-373, 2003.

- MONTAGUE, G.A.; GLASSEY, J.; WILLIS, MJ. French fry quality improvement using advanced control techniques, **Journal of Food Engineering**, v.57, n.4, p.357-365, 2003.
- MORETTO, E.; FETT, R. Óleos e Gorduras Vegetais. Processamento e Análises. 2ª edição, Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1989.
- OLSON, S., ZOISS, R. Fried foods of reduced oil absorption and methods of preparation employing spray of film forming agent U.S.A Patente 4511585. Assignee; General Mills, 1985.
- PEREDA, J. A. O.; RODRIGUES, M. I. C.; ÁLVAREZ, L.F.; SANZ, M. L. G.; MINGUILLÓN, G. D. G. F.; PERALES, L. H.; CORTECERO, M. D. S.; Tecnologia de alimentos – Componentes e processos; Porto Alegre: Artmed, 2005. v.1.
- PEREIRA, A. S. Composição química, valor nutricional e industrialização. In: REIFSCHNEIDER, F. J. B. (Coord.). Produção de batata. Brasília, DF: Linha Gráfica, 1987. p. 12-28.
- PINTO, E. P. et al. Características da batata frita em óleos com diferentes graus de insaturação. B. CEPPA. V.21, p.293-302. 2003.
- QUERIDO, A. F. Estudo da influência de técnicas na minimização da incorporação de óleo durante o processo de fritura de maçã, Campinas, UNICAMP, 2005. 193p.
- RANI, S. et al. Structural modifications and oil uptake in fried foods: **A review. Food Research International**, 2023.
- RIBEIRO, Robespierre QC et al. Fatores adicionais de risco cardiovascular associados ao excesso de peso em crianças e adolescentes: o estudo do coração de Belo Horizonte. Arq Bras Cardiol, v. 86, n. 6, p. 408-18, 2006.
- SAGUY, I. S., PINTHUS, E. J. (1995) Oil uptake during deep-fat frying: factors and mechanism. *Fd. Technology* 4, 142-145 e 152.
- SANTOS, J. et al. Estudo da cinética de secagem de batata-doce (ipomoea batatas). Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.14, n.4, p.323-328, 2012.
- SANZ, T., SALVADOR, A., FISMAN, S.M. Effect of concentration and temperature on properties of methycellulose-added batters. Application to battered, fried seafood. Food Hydrocolloids, vol. 18, p,127-131, 2004.

- SOBRAL, P. J. A. Secagem de sangue bovino incorporado a proteína texturizada de soja em leite fluidizado e em leite fixo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - UNICAMP, Campinas, 1987. 171 p.
- SOBRAL, P. J. A e MENECELLI, F. C, Secagem de sangue bovino incorporado a proteína texturizada de soja, em leite fixo. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, 144-159. 1986.
- UEMURA, C. H.; LUZ, M. B. Sistemas de cobertura. Aditivos & Ingredientes, São Paulo, n. 28, p. 81-82, set./dez., 2003.
- VENDRUSCOLO, João Luiz Silva; Zorzella, Carlos Alberto. Processamento de batata (*solanum tuberosum* L.): Fritura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA. Revista da EMBRAPA 2002.
- VIOLLAZ, P. Difusion en sistemas con encogimiento multidireccional. **Revista latinoamericana de Ingenieria y quimica y quimica aplicada**, La Plata, v. 17, n. 3, p. 315 – 326. 1987.
- VIOLLAZ, E. SUAREZ C. Drying of shrinking Bodies. American Institute of Chemical Engineers Journal, New York v. 31, n. 9, p 1566-1568. 1985.
- WANG, Q. G. et al. Effects of postharvest curing treatment on flesh colour and phenolic metabolism in fresh-cut potato products. Food Chemistry, v. 169, p. 246-254, 2015. ISSN 0308-8146.
- WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E., RORRER, G. Fundamentals of momentum, heat and mass transfer. 5.ed. John Wiley: New York. 2008. 803p.