

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MARTHA MARIA GOMES NÓBREGA

**ESTUDO DO ARMAZENAMENTO, DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E
APLICAÇÃO COSMÉTICA DOS PÓS DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDOS
POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA**

JOÃO PESSOA - PB

2025

MARTHA MARIA GOMES NÓBREGA

**ESTUDO DO ARMAZENAMENTO, DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E APLICAÇÃO
COSMÉTICA DOS PÓS DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDOS POR SECAGEM EM
CAMADA DE ESPUMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Josilene de Assis Cavalcante

Segunda orientadora: Profa. Dra. Melânia Lopes Cornélio

Coorientadora: Profa. Dra. Bárbara Freire de Oliveira

JOÃO PESSOA

2025

MARTHA MARIA GOMES NÓBREGA

**ESTUDO DO ARMAZENAMENTO, DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E APLICAÇÃO
COSMÉTICA DOS PÓS DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDOS POR SECAGEM EM
CAMADA DE ESPUMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em 15 de dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

JOSILENE DE ASSIS CAVALCANTE
Data: 20/12/2025 13:28:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Josilene de Assis Cavalcante - PPGEQ/CT/UFPB
(Orientadora)**



Documento assinado digitalmente

MELANIA LOPES CORNELIO
Data: 19/12/2025 20:03:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Melânia Lopes Cornélio - DEQ/CT/UFPB
(Orientadora)**



Documento assinado digitalmente

BARBARA FREIRE DE OLIVEIRA
Data: 20/12/2025 05:07:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Bárbara Freire de Oliveira - DEQ/CTG/UFPE
(Coorientador)**



Documento assinado digitalmente

FLAVIO LUIZ HONORATO DA SILVA
Data: 20/12/2025 08:39:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva - PPGEQ/CT/UFPB
(Examinador Interno)**



Documento assinado digitalmente

RAIMUNDA VALDENICE DA SILVA FREITAS
Data: 16/12/2025 14:07:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dra. Raimunda Valdenice da Silva Freitas – Pós-Doc CNPQ/UFPB
(Examinador Externo)**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N754e Nobrega, Martha Maria Gomes.

Estudo do armazenamento, das isotermas de adsorção e aplicação cosmética dos pós de *Saccharomyces cerevisiae* obtidos por secagem em camada de espuma / Martha Maria Gomes Nobrega. - João Pessoa, 2025.

137 f. : il.

Orientação: Josilene de Assis Cavalcante, Melânia Lopes Cornélio Lopes.

Coorientação: Bárbara Freire de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Biomassa residual. 2. Cosméticos sustentáveis. 3. Modelagem cinética. 4. Parâmetros termodinâmicos. I. Cavalcante, Josilene de Assis. II. Cornélio, Melânia Lopes. III. Oliveira, Bárbara Freire de. IV. Título.

UFPB/BC

CDU 577.15(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora por me guiarem e protegerem ao longo de toda esta jornada acadêmica.

À minha mãe, Rejane, e ao meu pai, Manoel, expresso minha sincera gratidão por todo o amor, dedicação, incentivo e compreensão ao longo dessa caminhada. Obrigada por acreditarem em mim e por estarem presentes em todos os momentos. À minha irmã Ingrid, agradeço pelo companheirismo, pelo apoio constante e pelo amparo sempre disponível, fundamentais durante essa trajetória.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Josilene, agradeço a Deus por tê-la colocado em meu caminho. Sou imensamente grata pelas orientações, pelo incentivo, pela confiança e pelo carinho ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Foi uma honra ter sido orientada por você desde o PIBIC na graduação e, agora, também no mestrado.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Melânia, agradeço por acreditar nesta pesquisa e em minhas ideias desde o início. Sou grata pelo acolhimento, pelas contribuições técnicas e pelas discussões construtivas, especialmente no desenvolvimento e na aplicação cosmética do trabalho. Sua dedicação e incentivo foram essenciais para o amadurecimento do projeto e para o fortalecimento desta dissertação.

Agradeço aos técnicos e professores do Centro de Tecnologia (CT) e do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional (CTDR) que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, pela disponibilidade, pelo suporte e pela colaboração durante a realização dos experimentos. Agradeço também, de forma especial, à Larissa, pelo auxílio direto, pela dedicação e pela colaboração na realização dos experimentos, apoio fundamental para a execução deste trabalho.

À banca examinadora, agradeço pela disponibilidade, pelas contribuições e pelas considerações que colaboraram para o aprimoramento final deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação e para a concretização deste importante momento da minha trajetória acadêmica.

RESUMO

A valorização de subprodutos agroindustriais representa uma estratégia fundamental para o desenvolvimento de processos produtivos mais sustentáveis e economicamente viáveis. A biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, obtida após ciclos sucessivos de fermentação na produção de cachaça, apresenta composição rica em proteínas, polissacarídeos e minerais, características que a tornam um material de elevado potencial biotecnológico, apesar de ainda ser comumente descartada pela indústria. Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica, a estabilidade e o potencial cosmético do pó obtido por secagem em camada de espuma (*foam mat drying*). As isotermas de adsorção de umidade foram determinadas nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C, sendo o modelo de Henderson o que melhor representou os dados experimentais, com curvas sigmóides do tipo II. A análise termodinâmica revelou que o calor isotérico de sorção (Q_{st}) variou entre 44 e 50 kJ mol⁻¹, indicando forte interação inicial entre as moléculas de água e os sítios ativos da matriz. As variações diferenciais de entalpia (ΔH) e entropia (ΔS) diminuíram com o aumento do teor de umidade, evidenciando maior organização das camadas de água adsorvidas e menor energia requerida à sorção. Os valores negativos de energia livre de Gibbs (ΔG) confirmaram a espontaneidade do processo e a afinidade da levedura seca pela água. Entre as condições de secagem avaliadas, o ponto central (60 °C e 10 % de agente espumante) apresentou o melhor desempenho, resultando em um pó mais estável e menos higroscópico, selecionado para as etapas subsequentes do trabalho. Durante o armazenamento por 90 dias em diferentes embalagens, sob condições ambiente (26 °C/75 % UR) e acelerada (40 °C/75 % UR), observou-se que o tempo de estocagem foi o fator mais influente, seguido pela temperatura e pelo tipo de embalagem. O aumento do tempo e da temperatura intensificou o ganho de umidade e as variações de cor, enquanto as embalagens de polietileno de alta densidade (PEAD) apresentaram a melhor barreira ao vapor d'água, preservando as propriedades físico-químicas por mais tempo. A vida útil (*shelf life*) foi estimada por modelagem cinética baseada na equação de Arrhenius, considerando a atividade de água e o teor de umidade como parâmetros críticos. O material acondicionado em PEAD e armazenado sob condição ambiente apresentou o maior tempo de estabilidade, com *shelf life* de 12 meses. Além disso, o pó obtido na condição de ponto central foi incorporado a uma formulação cosmética do tipo creme facial, que apresentou aparência homogênea e ausência de separação de fases. A análise reológica revelou comportamento pseudoplástico ajustado ao modelo de Herschel–Bulkley, indicando boa estabilidade estrutural. A presença do ativo atuou como modulador reológico, reduzindo a rigidez e melhorando o escoamento, o que resultou em maior espalhabilidade e desempenho sensorial superior à formulação controle. Esses resultados confirmam que a secagem em camada de espuma é uma técnica viável e eficiente para a obtenção de pós de *Saccharomyces cerevisiae* com estabilidade adequada e potencial de aplicação em cosméticos sustentáveis.

Palavras-chave: biomassa residual; cosméticos sustentáveis, modelagem cinética; parâmetros termodinâmicos; vida útil.

ABSTRACT

The valorization of agro-industrial by-products represents a fundamental strategy for the development of more sustainable and economically viable production processes. The residual biomass of *Saccharomyces cerevisiae*, obtained after successive fermentation cycles in cachaça production, exhibits a composition rich in proteins, polysaccharides and minerals, features that make it a material with high biotechnological potential, despite still being commonly discarded by the industry. This study aimed to evaluate the technical feasibility, stability, and cosmetic potential of the powder obtained by foam-mat drying. Moisture adsorption isotherms were determined at 15, 30 and 45 °C, with the Henderson model providing the best fit to the experimental data, yielding type II sigmoidal curves. Thermodynamic analysis revealed that the isosteric heat of sorption (Q_{st}) ranged from 44 to 50 kJ mol⁻¹, indicating strong initial interactions between water molecules and active sites of the matrix. Differential variations in enthalpy (ΔH) and entropy (ΔS) decreased with increasing moisture content, evidencing greater organization of the adsorbed water layers and lower energy required for sorption. Negative Gibbs free energy (ΔG) values confirmed the spontaneity of the process and the affinity of the dried yeast for water. Among the drying conditions evaluated, the central point (60 °C and 10% foaming agent) showed the best performance, resulting in a more stable and less hygroscopic powder, which was selected for the subsequent stages of the study. During 90 days of storage in different packaging materials, under ambient (26 °C/75% RH) and accelerated (40 °C/75% RH) conditions, storage time was the most influential factor, followed by temperature and packaging type. Increased time and temperature intensified moisture gain and color variations, while high-density polyethylene (HDPE) packaging provided the best water-vapor barrier, preserving physicochemical properties for longer periods. Shelf life was estimated using kinetic modeling based on the Arrhenius equation, considering water activity and moisture content as critical parameters. The material packaged in HDPE and stored under ambient conditions showed the longest stability, with a shelf life of 12 months. In addition, the powder obtained under the central-point condition was incorporated into a cosmetic facial cream formulation, which exhibited a homogeneous appearance and no phase separation. Rheological analysis indicated pseudoplastic behavior well described by the Herschel–Bulkley model, demonstrating good structural stability. The presence of the active ingredient acted as a rheological modulator, reducing rigidity and improving flow, which resulted in greater spreadability and superior sensory performance compared with the control formulation. These results confirm that foam-mat drying is a viable and efficient technique for producing *Saccharomyces cerevisiae* powders with adequate stability and strong potential for application in sustainable cosmetic products.

Keywords: kinetic modeling; residual biomass; shelf life; sustainable cosmetics; thermodynamic parameters.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVO GERAL	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1	LEVEDURAS	12
3.2	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	12
3.3	LEVEDURA RESIDUAL E REAPROVEITAMENTO INDUSTRIAL	13
3.4	APLICAÇÕES COSMÉTICAS COM <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	14
3.5	SECAGEM	16
3.6	SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA	16
3.7	ISOTERMAS DE SORÇÃO	18
3.8	PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DA SORÇÃO	18
3.9	PROPRIEDADES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS E SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE DO PÓ	19
3.10	VIDA ÚTIL (<i>SHELF LIFE</i>)	21
3.11	EMBALAGENS	22
3.12	EMULSÕES	23
3.12.1	Emulsões de cristal líquido	24
3.12.2	Reologia	25
4	METODOLOGIA	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6	CONCLUSÕES	126
	REFERÊNCIAS	128

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro ocupa posição de destaque na economia global, especialmente o setor sucroalcooleiro, cuja produção alcançou cerca de 676,96 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2024/2025 (CONAB, 2025). Embora a maior parte dessa matéria-prima seja destinada à produção de açúcar e etanol, a cana também abastece outras cadeias produtivas, como a da cachaça, que registrou 292 milhões de litros em 2024, representando um aumento de 29,6 % em relação a 2023 (BRASIL, 2025).

Durante a fermentação alcoólica, etapa fundamental na produção da cachaça, emprega-se predominantemente a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, reconhecida por sua elevada capacidade de conversão de açúcares em etanol (ELKHATEEB et al., 2022; OLIVEIRA, OLIVEIRA e KAMIMURA, 2023; SHIRVANYAN, 2023). Após sucessivos ciclos fermentativos, essa biomassa é descartada. Sua composição, rica em proteínas, vitaminas do complexo B, minerais e polissacarídeos, demonstra alto potencial de reaproveitamento (ELGHANDOUR et al., 2020; FU et al., 2023; MAURÍCIO et al., 2024).

Dessa forma, a valorização dessa levedura residual está diretamente associada à sua estabilização, processo que envolve a redução do teor de água para prolongar a vida útil e preservar propriedades bioativas (PINHEIRO et al., 2020; SUHAG, KELLIL e RAZEM, 2024). Entre as tecnologias de desidratação, destaca-se a secagem em camada de espuma (*foam mat drying*), método de baixo custo e alta eficiência que opera em temperaturas moderadas, preservando compostos sensíveis e permitindo a obtenção de pós estáveis e reidratáveis (KUMAR et al., 2023; MELO et al., 2023; THUY et al., 2025).

A levedura seca já é amplamente utilizada como suplemento para rações animais, mas também tem sido incorporada em produtos de maior valor agregado, como alimentos funcionais, probióticos, nutracêuticos, cosméticos e biofertilizantes, graças às suas propriedades antioxidantes, imunomoduladoras e regenerativas (OGBUEWU et al., 2019; MAURÍCIO et al., 2024; SOUSA et al., 2024).

Para aplicação comercial, o pó obtido deve atender a critérios de qualidade físico-química, como umidade, atividade de água, pH, teor de proteínas e estabilidade microbiológica, que influenciam diretamente a segurança e a funcionalidade do produto (RUAN et al., 2022; SCHLABITZ et al., 2024). Além da definição de condições ideais de secagem, é essencial garantir um armazenamento adequado, capaz de preservar as características do material ao longo do tempo.

Nesse contexto, os estudos de estabilidade e *shelf life* tornam-se essenciais para monitorar alterações nas propriedades físico-químicas e prever o tempo durante o qual o produto se mantém dentro de limites aceitáveis de qualidade sob diferentes condições de temperatura, umidade e

luminosidade (CHOOSUK et al., 2022; KORESE, ACHAGLINKAME e ADZITEY, 2022).

De modo complementar, a análise do comportamento higroscópico por meio das isotermas de adsorção de umidade permite compreender as interações entre a água e os constituintes sólidos, prever o equilíbrio higroscópico e selecionar embalagens e estratégias de conservação mais eficazes (MELO et al., 2023; YADAV e MISHRA, 2023; LI, GE e WANG, 2025). Complementarmente, o estudo dos parâmetros termodinâmicos da sorção, como o calor isostérico (Q_{st}) e as variações de entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG), fornece informações sobre a intensidade e espontaneidade das interações água-sólido, contribuindo para a compreensão dos mecanismos de estabilidade e da energia envolvida na desidratação (BAKHATTAR et al., 2022; TAGNAMAS, IDLIMAM e LAMHARRAR, 2024; DO CARMO et al., 2025).

Sendo assim, a reutilização dessa biomassa constitui uma estratégia promissora para redução de resíduos e custos industriais, geração de novos produtos e fortalecimento de práticas alinhadas à economia circular e à cosmetologia sustentável, unindo viabilidade técnica, desempenho funcional e responsabilidade ambiental (SCHLABITZ et al., 2024).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL:

Avaliar a viabilidade técnica e a estabilidade do pó da biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma, bem como seu potencial de aplicação como ingrediente ativo em formulações cosméticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Produzir o pó da biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae* proveniente da fabricação de cachaça por meio da secagem em camada de espuma;
- Determinar as isotermas de adsorção de umidade dos pós obtidos nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C;
- Ajustar modelos matemáticos às isotermas de adsorção e determinar os parâmetros termodinâmicos de sorção;
- Avaliar a estabilidade físico-química e microbiológica do pó obtido na melhor condição de secagem, acondicionado em diferentes tipos de embalagem e armazenado em condições ambiente e acelerada por 90 dias;
- Estimar a vida útil do pó por meio de modelagem cinética baseada na equação de Arrhenius;
- Desenvolver uma formulação cosmética do tipo creme facial incorporando o pó obtido por secagem em camada de espuma;
- Conduzir o estudo de estabilidade da formulação cosmética desenvolvida;
- Avaliar o comportamento reológico da formulação cosmética.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 LEVEDURAS

As leveduras são microrganismos eucarióticos unicelulares pertencentes ao reino *Fungi*, amplamente distribuídos na natureza e reconhecidos por sua diversidade morfológica, fisiológica e metabólica (ELKHATEEB et al., 2022; EL-QURASHI e AL-YAHYA, 2025). Como organismos eucarióticos, possuem uma membrana citoplasmática lipoproteica que regula as trocas com o meio externo e uma parede celular rígida composta principalmente por mananas e β -glucanas, além de proteínas e lipídios estruturais (KUMAR, 2023). O citoplasma abriga organelas típicas, como mitocôndrias, ribossomos, retículo endoplasmático, vacúolos e grânulos de reserva constituídos por carboidratos, lipídios e proteínas (LAHIR, 2022). O núcleo, delimitado por uma membrana nuclear, contém o material genético, conferindo às leveduras um nível de organização celular mais complexo que o dos organismos procarióticos (KALININA et al., 2024).

A reprodução ocorre predominantemente de forma assexuada, por brotamento ou fissão binária, embora algumas espécies possam apresentar ciclos sexuais sob condições ambientais específicas, como limitações nutricionais ou variações de temperatura (LAHIR, 2022; EL-QURASHI e AL-YAHYA, 2025). Quanto à atividade metabólica, as leveduras podem ser classificadas em ativas ou inativas. As leveduras ativas mantêm capacidade fermentativa e são amplamente empregadas na produção de alimentos, bebidas e biocombustíveis, devido à sua eficiência na conversão de açúcares em etanol e dióxido de carbono (RIESUTE et al., 2021; ELKHATEEB et al., 2022). Por outro lado, as inativas, obtidas por inativação térmica ou química, são valorizadas por seu elevado teor de proteínas, vitaminas e minerais, sendo utilizadas em suplementos nutricionais, rações e formulações funcionais (SANTIN, 1996; TOMÉ 2021).

Além dessas aplicações, diferentes espécies têm despertado crescente interesse biotecnológico em razão da sua capacidade de produzir compostos bioativos, como enzimas, peptídeos, polissacarídeos e metabólitos secundários, com potencial aplicação em setores de maior valor agregado, como os farmacêutico, cosmético e alimentar, reforçando a importância industrial desses microrganismos (FU et al., 2023; SCHLABITZ et al., 2024).

3.2 *Saccharomyces cerevisiae*

A espécie *Saccharomyces cerevisiae* pertence ao filo Ascomycota e destaca-se como uma das leveduras de maior relevância industrial, devido à sua adaptabilidade fisiológica, versatilidade metabólica e elevada eficiência fermentativa (ELKHATEEB et al., 2022; SURESH, 2025). A

classificação taxonômica desta espécie passou por sucessivas revisões ao longo do século XX, impulsionadas pelo avanço da biologia molecular, o que a consolidou como organismo-modelo em estudos sobre evolução, ecologia e diversidade de fungos unicelulares (GUPTA et al., 2024).

O uso dessa levedura em processos fermentativos é milenar. Evidências arqueológicas indicam seu papel na produção de bebidas desde civilizações antigas. Contudo, apenas no final do século XIX sua ação na fermentação foi comprovada cientificamente, sobretudo pelos estudos de Louis Pasteur. A partir desse marco, cultivos isolados passaram a ser conduzidos de forma controlada na indústria, assegurando maior padronização, reprodutibilidade e eficiência dos processos produtivos (LAUE et al., 2020; BAI et al., 2022; GUPTA et al., 2024).

A relevância desse microrganismo está associada à capacidade de tolerar condições frequentemente encontradas em processos industriais, com altas concentrações de etanol, variações de temperatura (de 10°C a 40°C) e baixos valores de pH, (MENDES et al., 2013; SHIRVANYAN, 2023). Tais características sustentam sua ampla aplicação em processos fermentativos voltados à panificação, produção de bebidas alcoólicas e fabricação de biocombustíveis.

Do ponto de vista reprodutivo, trata-se de um organismo diplôntico que se multiplica predominantemente por brotamento. Em condições de limitação nutricional, pode iniciar reprodução sexuada, resultando na formação de esporos haploides resistentes, mecanismo essencial para manutenção da viabilidade e adaptação ambiental (ACS-SZABO, PAPP e MIKLOS, 2024; SURESH, 2025). O genoma da espécie foi o primeiro entre eucariotos a ser completamente sequenciado, totalizando aproximadamente 12 Mb distribuídos em 16 cromossomos e mais de 6.600 ORFs, grande parte já funcionalmente caracterizadas. Essa ampla base de conhecimento fundamenta seu papel central em pesquisas bioquímicas, microbiológicas e biotecnológicas (TULLIO, 2022; HAN et al., 2023; GUPTA et al., 2024).

A composição nutricional também contribui para seu valor tecnológico, apresentando cerca de 45–60% de proteínas, 25–30% de carboidratos estruturais (principalmente β -glucanas e mananas), 4–7% de lipídios e 5–10% de minerais em biomassa seca (YAMADA et al., 2003; DU; BIAN; XU, 2014; TOMÉ, 2021). Esses componentes bioativos favorecem sua aplicação em alimentos, produtos farmacêuticos e formulações cosméticas. Além disso, o reaproveitamento da biomassa residual proveniente de processos fermentativos tem ganhado destaque como estratégia sustentável alinhada aos princípios da economia circular, contribuindo para a redução de resíduos industriais e para o desenvolvimento de soluções de menor impacto ambiental (FU et al., 2023; MAURÍCIO et al., 2024; SCHLABITZ et al., 2024).

3.3 LEVEDURA RESIDUAL E REAPROVEITAMENTO INDUSTRIAL

A biomassa excedente gerada em fermentações industriais, especialmente na produção de etanol combustível e bebidas alcoólicas, constitui o que se denomina levedura residual. Após separação do meio fermentado, esse material pode permanecer ativo ou ser inativado, permitindo sua utilização direta ou ainda o processamento para obtenção de ingredientes de maior valor agregado (VICTRAL, 2015; SCHLABITZ, LEHN e SOUZA, 2022).

O aproveitamento desse subproduto apresenta diversos benefícios. Industrialmente, representa redução de custos associados ao descarte e possibilidade de geração de novas receitas através da comercialização de derivados. Do ponto de vista ambiental, sua recuperação evita o acúmulo de resíduos em sistemas de tratamento ou aterros, contribuindo com práticas de gestão alinhadas à economia circular (KALININA et al., 2024; SCHLABITZ et al., 2024).

A composição nutricional é um dos principais fatores que justificam o interesse crescente por esse material. O teor proteico pode alcançar valores entre 30% e 70%, além de apresentar vitaminas do complexo B, minerais essenciais, sobretudo selênio, e polissacarídeos estruturais como β -glucanas e mananas, reconhecidos por sua funcionalidade biológica (YAMADA et al., 2003; ELGHANDOUR et al., 2020; FU et al., 2023). Inicialmente aplicada em nutrição animal e produtos alimentícios, essa fonte proteica tem sido explorada em formulações inovadoras e de maior valor agregado.

Na área farmacêutica, por exemplo, a estrutura da parede celular possibilita o uso como matriz para bioencapsulamento, protegendo e liberando de maneira controlada substâncias de interesse terapêutico (UTAMA et al., 2023). Também tem sido investigada como precursora de enzimas e microrganismos inativados com propriedades probióticas (FERNÁNDEZ-PACHECO et al., 2021).

No campo cosmético, os compostos bioativos presentes exercem efeitos que beneficiam a pele, incluindo potencial antioxidante, ação reparadora, estímulo à síntese de colágeno, reforço da barreira epidérmica e modulação da resposta inflamatória. Essas propriedades reforçam o potencial dessa matéria-prima como ingrediente funcional em produtos dermatológicos e de cuidados pessoais (COSTA et al., 2023; HE et al., 2024).

3.4 APLICAÇÕES COSMÉTICAS COM *Saccharomyces cerevisiae*

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), cosméticos são produtos destinados ao uso externo em diferentes partes do corpo humano, com a finalidade de limpar, perfumar, modificar a aparência, proteger, conservar ou atenuar odores corporais (BRASIL, 2024).

Nos últimos anos, o interesse por ingredientes naturais e por tecnologias alinhadas à

sustentabilidade tem crescido de forma expressiva no setor cosmético. Esse cenário impulsiona o desenvolvimento de formulações contendo compostos bioativos provenientes de processos biotecnológicos, como aqueles obtidos da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. Tradicionalmente utilizada nos segmentos alimentício, de bebidas e nutrição animal, essa fonte microbiana vem ganhando destaque na cosmetologia devido ao seu conteúdo diversificado de nutrientes e moléculas funcionais (OGBUEWU et al., 2019; MAURÍCIO et al., 2024; SOUSA et al., 2024).

Extratos e frações derivados desse microrganismo concentram vitaminas do complexo B, aminoácidos, enzimas, peptídeos bioativos e polissacarídeos estruturais, os quais exercem benefícios cutâneos amplamente documentados, como hidratação, ação antioxidante, propriedades anti-inflamatórias e estímulo a processos de reparo tecidual (FU et al., 2023; MAURÍCIO et al., 2024).

As β -glucanas, componentes majoritários da parede celular, destacam-se por favorecer a síntese de colágeno, fortalecer a barreira epidérmica e acelerar a cicatrização. De forma complementar, peptídeos de origem microbiana atuam como sinais biológicos capazes de promover renovação celular, contribuir para a uniformização do tom cutâneo e melhorar a textura superficial. Esses polissacarídeos também atuam como formadores de filme, favorecendo a retenção hídrica e a manutenção da hidratação (DU; BIAN; XU, 2014; MUTHURAMALINGAM et al., 2019; YAO; XU, 2022).

Estudos recentes relatam ainda que peptídeos secretados durante o cultivo apresentam efeito antimicrobiano contra patógenos de relevância dermatológica, como *Staphylococcus aureus* e *Pseudomonas aeruginosa*. Essas moléculas também exibem atividade antioxidante, capacidade de inibir collagenases e efeito anti-inflamatório, características associadas à prevenção do envelhecimento precoce e à manutenção da integridade cutânea (MUTHURAMALINGAM et al., 2019; YAO; XU, 2022; MAURÍCIO et al., 2024).

Além dos extratos purificados, subprodutos gerados na fermentação industrial têm se mostrado promissores como ingredientes clareadores. Esses materiais apresentam potencial de inibir a tirosinase, enzima central no processo de melanogênese, favorecendo a redução de hiperpigmentações e maior uniformidade da coloração da pele (JO et al., 2022).

A segurança e desempenho desses ingredientes foram demonstrados em formulações cosméticas, com resultados positivos em parâmetros como hidratação, textura superficial e proteção contra espécies reativas de oxigênio, sem efeitos adversos relatados (GASPAR et al., 2008; MUTHURAMALINGAM et al., 2019).

Por fim, o aproveitamento de resíduos provenientes da fermentação de *Saccharomyces cerevisiae* representa alternativa tecnicamente viável e ambientalmente responsável, convergindo com os princípios da economia circular e da cosmetologia verde, ao transformar descarte industrial

em insumo de alto valor agregado (SCHLABITZ et al., 2024).

3.5 SECAGEM

A secagem é um processo que engloba a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o material a ser desidratado. O aumento da temperatura resulta na elevação da pressão parcial de vapor, promovendo a redução do teor de água do produto (GONELI et al., 2014; ACAR, DINCER e MUJUMDAR, 2022). Essa diminuição é determinante para a estabilidade de produtos biológicos, uma vez que limita reações químicas e enzimáticas e inibe o desenvolvimento de microrganismos deterioradores, contribuindo para o prolongamento da vida útil e preservação das propriedades físico-químicas do produto (PINHEIRO et al., 2020; THUY et al., 2025). Adicionalmente, a remoção de água reduz o volume e a massa do material, favorecendo o armazenamento, o transporte e a redução de custos logísticos (FERREIRA e CANDEIAS, 2005).

Os processos de secagem podem ser classificados em naturais ou artificiais. A secagem natural baseia-se na exposição do material à radiação solar e ao fluxo de ar ambiente, sendo caracterizada pelo baixo custo operacional (ACAR, DINCER e MUJUMDAR, 2022). Todavia, a ausência de controle de variáveis como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar pode ocasionar heterogeneidade no processo, aumento do tempo de secagem e maior suscetibilidade à contaminação ambiental, o que pode comprometer a qualidade final do produto (CORNEJO, NOGUEIRA e WILBERG, 2003; BELWAL et al., 2022; KHATRI et al., 2024). Em contrapartida, a secagem artificial emprega equipamentos que permitem o controle preciso das condições de operação, como estufas, liofilizadores e secadores por micro-ondas, assegurando maior reprodutibilidade, eficiência e preservação da integridade estrutural do material (FU et al., 2023).

Além de reduzir a suscetibilidade a processos deteriorativos, a secagem promove o aumento da concentração de compostos bioativos após a remoção da água (BELWAL et al., 2022). Esse efeito contribui para a estabilidade físico-química da biomassa e, paralelamente, agrega valor ao produto final.

3.6 SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

A secagem em camada de espuma tem se destacado como alternativa eficiente às técnicas convencionais de desidratação, sobretudo pela operação em temperaturas moderadas e menor tempo de processamento, o que favorece a preservação de compostos termossensíveis e a obtenção de pós com boa capacidade de reidratação. Outro aspecto relevante é o uso de equipamentos de menor complexidade e custo reduzido, ampliando o potencial de aplicação industrial da técnica (KUMAR

et al., 2023; KHATRI et al., 2024; PATANGE, PATIL e KHANDEKAR, 2024).

O processo envolve a formação de uma espuma estável a partir de materiais líquidos ou pastosos, mediante a incorporação de agentes espumantes e, quando necessário, estabilizantes. Essa espuma é espalhada em camada fina sobre bandejas e submetida ao fluxo de ar aquecido, ocorrendo rápida remoção da água e resultando em um produto com estrutura porosa (HOSSAIN et al., 2021; KUMAR et al., 2023; MELO et al., 2023).

Entre as principais vantagens, destacam-se a maior eficiência de transferência de calor e massa e a preservação de características físico-químicas, como cor e aroma, aliadas à obtenção de pós com excelente reconstituição, quando comparados aos produzidos por métodos como secagem em estufa ou atomização (MACIEL et al., 2021; GÜNAYDIN et al., 2024; PHUONG et al., 2024). A morfologia expandida conferida ao produto, com formação de poros semelhantes aos de um favo de mel, favorece a solubilidade e a dispersão (SILVA FILHO, 2012).

Algumas limitações, entretanto, devem ser consideradas, como a necessidade de maior área superficial para o processo e o possível impacto dos agentes espumantes sobre características sensoriais, dependendo da matriz e da finalidade do produto (HOSSAIN et al., 2021; PATANGE, PATIL e KHANDEKAR, 2024).

Estudos direcionados à secagem da biomassa de *Saccharomyces cerevisiae* têm empregado predominantemente métodos tradicionais de desidratação. França e Prada (2019) avaliaram a liofilização da levedura, obtendo material com baixo teor de umidade e adequada preservação estrutural, porém associado a longos tempos de processamento e elevado consumo energético. De forma semelhante, a secagem por atomização (*spray drying*) tem sido utilizada para a produção de pós e comprimidos de levedura, apresentando elevada reprodutibilidade industrial, embora exija altas temperaturas de operação, o uso de agentes carreadores e maior complexidade tecnológica (SANTOS et al., 2020; FAUSTINO et al., 2023). Mais recentemente, a secagem em leito fluidizado foi investigada como alternativa para a desidratação da biomassa de *Saccharomyces cerevisiae*, demonstrando boa eficiência cinética, mas demandando rigoroso controle dos parâmetros de processo e maior investimento tecnológico (VORLÄNDER et al., 2023). Em conjunto, esses estudos evidenciam que, apesar da eficácia dos métodos convencionais, a desidratação da levedura permanece fortemente dependente de processos energeticamente intensivos e pouco voltados à obtenção de estruturas altamente porosas com rápida reidratação.

Nesse cenário, a secagem em camada de espuma apresenta-se como alternativa tecnicamente adequada para a obtenção de pós a partir de biomassa de *Saccharomyces cerevisiae*, sobretudo quando se busca estabilidade, menor custo operacional e maior valor agregado para aplicações industriais diversificadas.

3.7 ISOTERMAS DE SORÇÃO

A estabilidade de produtos em pó está diretamente relacionada ao teor de umidade e à atividade de água (a_w), parâmetros fundamentais para o controle de reações físico-químicas e para a prevenção do crescimento microbiano. O teor de umidade corresponde ao conteúdo total de água presente no material, enquanto a a_w indica a fração efetivamente disponível para reações deteriorativas (JUAREZ-ENRIQUEZ et al., 2022; MELO et al., 2023; SUHAG, KELLIL e RAZEM, 2024).

Durante o armazenamento, ocorre transferência de umidade entre o pó e o meio externo até que se estabeleça o equilíbrio higroscópico, processo que pode envolver adsorção ou dessorção de água em função das condições ambientais (OUAABOU et al., 2021). A relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a atividade de água é representada pelas isotermas de adsorção e dessorção, construídas experimentalmente e ajustadas a modelos matemáticos amplamente utilizados em estudos com materiais desidratados (ARSLAN-TONTUL, 2020; YADAV e MISHRA, 2023; LI, GE e WANG, 2025).

A interpretação dessas curvas permite avaliar a afinidade do sólido pela água e prever mudanças estruturais que podem impactar o desempenho do produto, como aglomeração, perda de fluidez, escurecimento ou degradação de compostos bioativos (LI, GE e WANG, 2025). Além disso, fornece suporte para o estabelecimento de condições adequadas de estocagem, o dimensionamento de processos de secagem e a seleção de embalagens com barreira eficaz ao vapor d'água, favorecendo a manutenção da qualidade ao longo da vida útil (OUAABOU et al., 2021; ROSA et al., 2021; MELO et al., 2023).

3.8 PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DA SORÇÃO

A análise termodinâmica da sorção complementa as informações obtidas pelas isotermas ao permitir uma compreensão mais aprofundada das interações entre moléculas de água e os sítios de adsorção presentes na matriz sólida (AZAMAT et al., 2025). Os parâmetros derivados dessa abordagem, como o calor isostérico de sorção (Q_{st}), as variações de entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG), fornecem subsídios importantes para avaliar a intensidade das interações água-sólido, a organização estrutural resultante da adsorção e a espontaneidade do processo (JIN, TANG e SABLANI, 2019; BAKHATTAR et al., 2022; RUAN et al., 2022).

Valores mais elevados de Q_{st} e ΔH em baixos teores de umidade indicam forte afinidade inicial da água por componentes hidrofílicos, o que implica maior demanda energética no início da secagem, quando a água encontra-se fortemente ligada (TAGNAMAS, IDLIMAM e

LAMHARRAR, 2024). Com a redução progressiva da umidade, esses valores tendem a diminuir, sugerindo que a água remanescente está mais fracamente adsorvida, aspecto que favorece a etapa final de desidratação e auxilia na definição de condições operacionais mais adequadas e economicamente viáveis para o processo (ECAVARRIA, RIVERA TORRES e ZAPATA MONTTOYA, 2021; SANCHES et al., 2023; DO CARMO et al., 2025).

A entropia de sorção (ΔS) contribui para a interpretação das alterações estruturais ocorridas durante a remoção de água. Reduções mais acentuadas nos valores de ΔS podem indicar maior ordenação molecular após a adsorção, fenômeno que pode resultar em compactação da matriz, redução da porosidade e possível prejuízo às propriedades de reconstituição do pó (COLLAZOS-ESCOBAR et al., 2020; DO CARMO et al., 2025). Por outro lado, variações positivas revelam maior desorganização e mobilidade, condição que pode facilitar a difusão da água, porém tornar o material mais suscetível a reações deteriorativas ao longo do tempo (SILVA et al., 2021).

A energia livre de Gibbs (ΔG) complementa essa análise ao indicar a tendência do sistema em adsorver umidade. Valores negativos refletem processo espontâneo e evidenciam a necessidade de barreiras eficientes ao vapor d'água, enquanto valores positivos sugerem uma condição mais estável frente às flutuações ambientais (VIEIRA, BECEGATO e PAULINO, 2021; GIRISH, 2025; LI, GE e WANG, 2025).

No caso da biomassa desidratada de *Saccharomyces cerevisiae*, a interpretação conjunta desses parâmetros é fundamental tanto para a seleção das condições mais apropriadas de secagem, garantindo a preservação das propriedades funcionais da levedura, quanto para o estabelecimento de diretrizes de armazenamento que assegurem maior estabilidade físico-química e prolongamento da vida útil. Dessa forma, a termodinâmica da sorção se configura como ferramenta essencial para o desenvolvimento de pós com qualidade otimizada e adequado desempenho tecnológico durante todo o ciclo de utilização.

3.9 PROPRIEDADES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS E SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE DO PÓ

A estabilidade de produtos desidratados, como os obtidos a partir da biomassa de *Saccharomyces cerevisiae*, está diretamente associada ao comportamento integrado de propriedades físicas, físico-químicas e microbiológicas ao longo do armazenamento (KORESE, ACHAGLINKAME e ADZITEY, 2022). O acompanhamento desses parâmetros ao longo do tempo permite antecipar modificações capazes de comprometer a qualidade, a funcionalidade e a segurança do produto em diferentes aplicações industriais (MAPHOSA et al., 2025).

Nesse contexto, o teor de umidade e a atividade de água (a_w) se destacam entre as propriedades físico-químicas mais relevantes para a conservação do material. A elevação do conteúdo de água pode intensificar reações de escurecimento não enzimático, favorecer a degradação de compostos bioativos e promover alterações estruturais, como perda de porosidade e redução da solubilidade (JUAREZ-ENRIQUEZ et al., 2022; SUHAG, KELLIL e RAZEM, 2024). A a_w , por sua vez, expressa a fração de água livre disponível para reações deteriorativas e crescimento microbiano, sendo considerada parâmetro crítico para o estabelecimento de condições seguras de estocagem (RUAN et al., 2022; MELO et al., 2023).

Além desses atributos, a acidez total titulável e o pH constituem indicadores sensíveis de mudanças metabólicas e químicas durante o armazenamento, uma vez que oscilações nesses parâmetros podem refletir degradação de proteínas e aminoácidos ou formação de compostos resultantes de reações secundárias (RAN et al., 2021; KORESE, ACHAGLINKAME e ADZITEY, 2022). A composição centesimal também fornece informações relevantes sobre a integridade do produto. Alterações no teor de proteínas podem indicar hidrólise ou desnaturação estrutural decorrentes de interações com a água, com possível redução da capacidade funcional do produto. Da mesma forma, variações no teor de lipídios podem evidenciar processos oxidativos que comprometem a estabilidade do material e podem resultar em formação de compostos associados ao escurecimento e perda de qualidade (COUTINHO et al., 2019; LIU, LIU e ZHAO, 2022; KEPÍŃSKA-PACELIK et al., 2025).

No que diz respeito à aparência e aceitabilidade, a cor constitui importante atributo de qualidade, uma vez que mudanças cromáticas podem refletir reações químicas indesejáveis, como oxidação lipídica e reações de Maillard, especialmente quando o produto é exposto à umidade elevada e temperaturas acima das ideais (LI et al., 2020; YINGCHEN et al., 2023). Complementarmente, o índice de solubilidade em água está diretamente relacionado à capacidade de reconstituição do pó e pode ser reduzido por fenômenos como aglomeração, compactação e colapso parcial da matriz interna, frequentemente desencadeados pela adsorção de umidade durante o armazenamento (CHEVER et al., 2017; FOURNAISE, PETIT e GAIANI, 2021).

No âmbito das propriedades físicas, parâmetros como fluidez, densidade aparente e compactada e comportamento de escoamento mostram-se particularmente sensíveis à higroscopicidade do pó (JUAREZ-ENRIQUEZ et al., 2022). O ganho de umidade pode aumentar a coesividade entre partículas e dificultar a manipulação, o transporte e a incorporação do produto em processos industriais em larga escala. Essas alterações também podem sinalizar a ocorrência de transições estruturais indesejáveis, com impacto negativo no seu desempenho (ZAFAR et al., 2017; SUHAG, KELLIL e RAZEM, 2024).

Do ponto de vista microbiológico, apesar da significativa redução da carga microbiana

proporcionada pela secagem, valores elevados de a_w podem permitir a reativação de células remanescentes ou o desenvolvimento de microrganismos deteriorantes, reduzindo a vida útil e limitando o uso do produto em determinadas aplicações (MARTINS et al., 2019; KORESE, ACHAGLINKAME e ADZITEY, 2022).

Por fim, a interação entre essas propriedades demonstra que a estabilidade de produtos desidratado, como pó de *Saccharomyces cerevisiae* depende diretamente da manutenção de condições adequadas de armazenamento, especialmente no que se refere ao controle de temperatura e umidade relativa, bem como à utilização de embalagens com barreira eficiente ao vapor d'água (DE MARCO et al., 2022; HAJAR-AZHARI et al., 2024).

3.10 VIDA ÚTIL (*shelf life*)

A estimativa da vida útil (*shelf life*) consiste em determinar o tempo durante o qual o produto permanece dentro de limites aceitáveis de qualidade físico-química, estrutural e microbiológica (CHOOSUK et al., 2022). Em produtos em pó, como a biomassa desidratada de *Saccharomyces cerevisiae*, as mudanças ao longo do armazenamento estão frequentemente associadas ao comportamento higroscópico e às reações desencadeadas pelo ganho progressivo de umidade (JUAREZ-ENRIQUEZ et al., 2022; SUHAG, KELLIL e RAZEM, 2024).

A fim de reduzir o tempo experimental, emprega-se o estudo de estabilidade acelerada, no qual o produto é armazenado sob temperaturas superiores às esperadas em condições normais de comercialização (YIN et al., 2022). O incremento de aproximadamente 10 °C, é uma estratégia amplamente utilizada na literatura para intensificar reações deteriorativas e permitir a obtenção de dados cinéticos em prazo reduzido, sem descaracterizar os mecanismos envolvidos no envelhecimento do produto (CHOOSUK et al., 2022; ZANG et al., 2024; SRISUK, TUDPOR e JIRASATID, 2025).

A evolução dos parâmetros de qualidade pode ser descrita por modelos cinéticos de degradação. Nos modelos de ordem zero, a taxa de deterioração é constante e independente da concentração do parâmetro monitorado, refletindo comportamento linear ao longo do tempo. Já em primeira ordem, a taxa é proporcional ao valor do atributo, resultando em decaimento exponencial (LIAO et al., 2024; SRISUK, TUDPOR e JIRASATID, 2025; XING et al., 2025). Em ambos os casos, a constante cinética (k) quantifica a velocidade da deterioração: valores maiores indicam menor estabilidade do produto, principalmente sob temperaturas elevadas (MUNIANDY et al., 2024; ZANG et al., 2024).

A influência da temperatura sobre k pode ser descrita pela equação de Arrhenius, permitindo determinar a energia de ativação (E_a) do processo. Energias de ativação mais altas

indicam forte dependência térmica, de modo que pequenas variações de temperatura podem acelerar drasticamente a degradação de parâmetros críticos, como teor de umidade, solubilidade ou propriedades estruturais do pó (YIN et al., 2022; LIAO et al., 2024; XING et al., 2025).

Além disso, uma vez ajustados os modelos cinéticos, o tempo de vida útil (t_{sl}) pode ser matematicamente estimado com base no momento em que o parâmetro avaliado atinge o limite máximo ou mínimo de qualidade especificado. Portanto, os dados cinéticos possibilitam não apenas descrever o comportamento do material ao longo do tempo, mas também prever cenários de estocagem e definir prazos de validade (ZHANG et al., 2021; MUNIANDY et al., 2024; ZANG et al., 2024).

3.11 EMBALAGENS

A embalagem exerce papel fundamental na preservação da estabilidade de produtos desidratados, atuando como barreira frente a fatores ambientais que podem desencadear reações de deterioração físico-química e microbiológica (KORESE, ACHAGLINKAME e ADZITEY, 2022). Em produtos de natureza higroscópica, o controle da permeabilidade ao vapor d'água constitui parâmetro decisivo, uma vez que o aumento da umidade interna favorece a aglomeração de partículas, a redução da fluidez, a diminuição da solubilidade e a intensificação de reações de Maillard e de oxidação lipídica, comprometendo o desempenho e a vida útil do produto (FORSIDO et al., 2021; NG, LING e HADINOTO, 2022; AKBAR et al., 2025).

A seleção do material de acondicionamento deve basear-se em um equilíbrio entre as propriedades de barreira, resistência mecânica, estabilidade térmica e compatibilidade química com o produto armazenado (YENIDOĞAN, AYDEMIR e DOĞAN, 2023). Interações indesejáveis entre o polímero e o material acondicionado, como a migração de aditivos ou a adsorção de compostos voláteis, podem comprometer a qualidade, a segurança e a conformidade regulatória do produto (GUERRITORE et al., 2022; GUPTA et al., 2024). Dessa forma, a embalagem deve atuar como um sistema quimicamente estável e funcional, assegurando a integridade físico-química e microbiológica do produto durante todo o período de armazenamento (NG, LING e HADINOTO, 2022; AKBAR et al., 2025).

As embalagens industriais são usualmente classificadas em rígidas, semirrígidas e flexíveis, de acordo com sua espessura, resistência mecânica e propriedades de barreira (DZIADOWIEC et al., 2023). As embalagens flexíveis poliméricas apresentam ampla aplicação em produtos em pó devido à leveza, facilidade de conformação, impressão e transporte, bem como à relação favorável entre custo e desempenho de proteção (BAUER et al., 2021; ADAM et al., 2025; MENGOZZI et al., 2025). Além disso, sua composição pode ser ajustada por meio de combinações

de polímeros, o que possibilita modular o comportamento de barreira em função das características do produto acondicionado (GUERRITORE et al., 2022).

Dentre os materiais amplamente utilizados, o polietileno de alta densidade (PEAD) destaca-se por sua estrutura semicristalina, que proporciona barreira eficaz ao vapor d'água, elevada resistência mecânica e boa selagem térmica (DZIADOWIEC et al., 2023). Essas propriedades tornam-no especialmente adequado ao acondicionamento de pós secos e higroscópicos. O PEAD apresenta ainda elevada estabilidade química, reduzindo o risco de reações ou migrações que possam alterar a composição do material armazenado, o que garante maior confiabilidade ao longo do tempo (BAUER et al., 2021; FORNARO et al., 2024; AKBAR et al., 2025).

As estruturas compostas de poliéster (PET) e polietileno (PE) associam propriedades complementares, como rigidez, transparência e boa resistência mecânica, provenientes do PET, com flexibilidade, selabilidade e capacidade de vedação conferidas pelo PE (DZIADOWIEC et al., 2023; FORNARO et al., 2024; ADAM et al., 2025). Apesar do bom desempenho, os materiais PET/PE apresentam maior permeabilidade ao vapor d'água em comparação ao PEAD, o que pode resultar em adsorção de umidade em ambientes com alta umidade relativa (TSUCHIMOTO e KAJIKAWA, 2022). No entanto, seu uso é amplamente difundido devido à excelente apresentação visual, boa processabilidade e custo competitivo, especialmente quando o tempo de armazenamento é reduzido ou ocorre em condições ambientais controladas (BAUER et al., 2021; IBRAHIM et al., 2022).

Para produtos sensíveis à umidade, oxigênio e luz, as embalagens metalizadas ou contendo folha de alumínio (PLA) oferecem boa barreira física e química, uma vez que o alumínio diminui a difusão de gases e o fluxo de vapor d'água, além de proteger contra a radiação luminosa (ZANG et al., 2024; MARANGONI JÚNIOR et al., 2025). Essa proteção torna-as indicadas para produtos que requerem longa vida útil ou que são armazenados em condições ambientais severas (IBRAHIM et al., 2022).

É importante destacar que o desempenho final da embalagem depende não apenas de suas propriedades intrínsecas, mas também da qualidade da selagem, da ausência de microperfurações e da manutenção de condições adequadas durante o transporte e a estocagem (ITURRALDE-GARCÍA et al., 2022). Dessa forma, a embalagem ideal não é necessariamente aquela que oferece a máxima resistência física e química, mas aquela que assegura proteção suficiente, compatibilidade com o produto e viabilidade econômica, garantindo a preservação da qualidade, segurança e estabilidade ao longo da vida útil planejada (IBRAHIM et al., 2022; ADAM et al., 2025; MARANGONI JÚNIOR et al., 2025).

3.12 EMULSÕES

As emulsões são dispersões coloidais compostas por duas fases imiscíveis, normalmente uma aquosa e outra oleosa, estabilizadas por agentes emulsificantes que reduzem a tensão interfacial e asseguram a uniformidade do sistema (ATAEIAN et al., 2022; KRISHNAN et al., 2023; KUPIKOWSKA-STOBBA, DOMAGAŁA e KASPRZAK, 2024). O tipo de estrutura formado depende da proporção entre as fases e da natureza dos tensoativos empregados, podendo ser do tipo óleo em água (O/A) ou água em óleo (A/O) (TIAN et al., 2022; BUFALINI e CAMPARDELLI, 2025). Nas formulações cosméticas, farmacêuticas e alimentícias, predominam as emulsões O/A, que oferecem textura leve, rápida absorção e sensação não oleosa. Já as A/O são preferidas em produtos de barreira e proteção cutânea, devido à resistência superior à remoção por água (HONG et al., 2021; KOWALSKA, WOŹNIAK e LUDWIŃSKI, 2023).

A estabilidade desses sistemas está diretamente associada ao equilíbrio entre as interações físico-químicas das gotículas dispersas, a tensão interfacial e a viscosidade do meio contínuo. Pequenas variações nessas propriedades podem induzir desorganização estrutural, separação de fases ou alterações reológicas, comprometendo a aparência e o desempenho da formulação (KUPIKOWSKA-STOBBA, DOMAGAŁA e KASPRZAK, 2024; BUFALINI e CAMPARDELLI, 2025; SUN et al., 2025). O controle desses fenômenos depende da seleção de emulsificantes, coemulsificantes e modificadores reológicos, capazes de reduzir a energia interfacial e conferir resistência às forças de agregação (ISKANDAR et al., 2024; KUPIKOWSKA-STOBBA, DOMAGAŁA e KASPRZAK, 2024).

Além da composição, o método de preparo exerce papel determinante nas características finais da dispersão. O controle de temperatura, a intensidade de homogeneização e a sequência de adição dos componentes influenciam diretamente o tamanho e a distribuição das gotas, impactando a estabilidade físico-química e a textura do produto (ISKANDAR et al., 2024; BUFALINI e CAMPARDELLI, 2025; SUN et al., 2025). Essa relação entre formulação e processamento é particularmente relevante em cosméticos, nos quais a estabilidade precisa coexistir com atributos sensoriais como espalhabilidade e brilho (KOWALSKA, WOŹNIAK e LUDWIŃSKI, 2023).

Considerando esses aspectos, as emulsões estruturadas em arranjos de cristal líquido vêm recebendo crescente destaque, por aliarem estabilidade prolongada, elevada capacidade hidratante e excelente sensorial. Tais características tornam esse tipo de preparação especialmente valorizado em formulações dermocosméticas e farmacêuticas de alto valor agregado (HUA et al., 2024; CARITÁ et al., 2025).

3.12.1 Emulsões de cristal líquido

As emulsões de cristal líquido constituem sistemas coloidais organizados, formados por fases aquosa e oleosa estabilizadas por tensoativos que, sob determinadas condições de composição e temperatura, originam arranjos supramoleculares ordenados denominados mesofases líquido-cristalinas. Esses sistemas apresentam propriedades intermediárias entre o estado cristalino e o líquido isotrópico, combinando elevada estabilidade com mobilidade molecular (CHOUNTOULESI et al., 2022; SMAISIM et al., 2023; TERREL et al., 2023; HUA et al., 2024).

A formação dessas estruturas decorre da auto-organização das moléculas anfifílicas, que podem se dispor em geometrias lamelares, hexagonais ou cúbicas, conforme o balanço hidrofílico-lipofílico (EHL), a proporção entre as fases e as condições de processamento (CHOUNTOULESI et al., 2022; CHAVDA et al., 2023). Dentre essas, as mesofases lamelares são amplamente empregadas em formulações cosméticas por conferirem estabilidade, boa capacidade de retenção de água e textura agradável (TAN et al., 2018; TERREL et al., 2023). Nessas estruturas, as moléculas de tensoativo se organizam em camadas alternadas de componentes hidrofílicos e lipofílicos, aprisionando moléculas de água e promovendo sua liberação gradual (TEERANACHAIDEEKUL et al., 2023).

A obtenção de sistemas líquido-cristalinos ocorre geralmente por emulsificação a quente, seguida de resfriamento controlado, durante o qual as moléculas se reorganizam, estabilizando as mesofases. A natureza dos tensoativos, coemulsionantes e agentes estruturantes influencia diretamente o tipo de fase obtida e as propriedades de consistência, brilho e estabilidade do produto (TEERANACHAIDEEKUL et al., 2023; HUA et al., 2024; CARITÁ et al., 2025).

Em comparação às emulsões convencionais, as emulsões de cristal líquido apresentam vantagens relevantes decorrentes de sua microestrutura ordenada, que confere estabilidade físico-química prolongada, maior capacidade de retenção hídrica e liberação controlada de ativos. Essas propriedades, aliadas à afinidade estrutural com os lipídios da barreira cutânea, resultam em formulações com elevado desempenho sensorial e eficácia aprimorada (ROBERTS et al., 2017; VITEK e MATJAZ, 2024; POBIRK et al., 2024).

3.12.2 Reologia

A reologia constitui uma ferramenta essencial para a caracterização estrutural e funcional de emulsões cosméticas, permitindo compreender o comportamento de escoamento e as propriedades viscoelásticas que determinam a estabilidade, a espalhabilidade e o desempenho sensorial das formulações (LEE et al., 2021; ALI et al., 2022; KIM et al., 2024). O estudo reológico fornece informações sobre as interações entre as fases, a resistência à deformação e a integridade da rede interna formada pelos tensoativos, agentes estruturantes e componentes bioativos presentes no

sistema (MOUD, 2022; NWANKWO et al., 2025).

Nas emulsões do tipo cristal líquido, o comportamento reológico está intimamente relacionado à organização lamelar e à densidade da rede supramolecular (CHOUNTOULESI et al., 2022; SMAISIM et al., 2023). Tais sistemas tendem a apresentar comportamento não newtoniano, caracterizado por variação da viscosidade em função da taxa de cisalhamento (CHAVDA et al., 2023; FRANCESCHINI, PIZZETTI e ROSSI, 2025). Entre os modelos empíricos empregados para descrever esse comportamento, o de Herschel–Bulkley é amplamente utilizado, por considerar a existência de uma tensão inicial necessária para promover o escoamento (τ_0), associada à força de coesão entre as estruturas internas do sistema (CALIENNI et al., 2023; RAJA, WILFERT e PICKEN, 2024).

O ajuste de dados experimentais ao modelo de Herschel–Bulkley permite determinar parâmetros fundamentais como o índice de consistência (K) e o índice de comportamento de fluxo (n), que descrevem, respectivamente, a resistência à deformação e o grau de pseudoplasticidade das amostras (JO et al., 2021; RAJA, WILFERT e PICKEN, 2024). Valores de $n < 1$ indicam comportamento pseudoplástico, típico de emulsões estruturadas, nas quais ocorre desorganização parcial da rede interna com o aumento da taxa de cisalhamento, seguida de recuperação após a cessação do esforço (AZEVEDO et al., 2021; CALIENNI et al., 2023). Esse comportamento é desejável em formulações cosméticas, pois confere facilidade de espalhamento durante a aplicação e estabilidade em repouso (NWANKWO et al., 2025).

A análise viscoelástica, por sua vez, fornece informações complementares sobre a resposta do material a pequenas deformações oscilatórias (AZEVEDO et al., 2021; CALIENNI et al., 2023). Os parâmetros módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G'') permitem distinguir as contribuições elásticas e viscosas do sistema e identificar o regime linear viscoelástico (LVR), no qual a estrutura interna permanece intacta (GURT e KHONSARI, 2024; SHEVTSOVA et al., 2025). O ponto de interseção entre G' e G'' corresponde ao limite de escoamento (*yield point*), indicativo da tensão necessária para romper a rede estrutural e iniciar o fluxo. Valores mais elevados de G' e de limite de escoamento refletem sistemas mais organizados e resistentes à deformação, correlacionando-se positivamente com a estabilidade físico-química e a homogeneidade microestrutural das emulsões (JO et al., 2021; ZHAO et al., 2023; CARITÁ et al., 2025).

4 METODOLOGIA

A Metodologia do desenvolvimento desse trabalho está apresentada em forma de artigos científicos a serem submetidos nos periódicos mostrados a seguir:

Artigo 1: ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (Submetido. Periódico: Revista Drying Technology. Qualis: A2 em Engenharias II).

Artigo 2: MODELAGEM CINÉTICA E PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL DO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (A ser submetido. Periódico: Revista Journal of Stored Products Research. Qualis: A2 em Engenharias II).

Artigo 3: CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E ESTRUTURAL DE SISTEMAS COSMÉTICOS CONTENDO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA. (A ser submetido. Periódico: International Journal of Cosmetic Science. Qualis: A3 em Engenharias II).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Resultados e Discussão produzidos durante o desenvolvimento desse trabalho estão apresentados em forma de artigos científicos a serem submetidos nos periódicos mostrados a seguir:

Artigo 1: ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (Submetido. Periódico: Revista Drying Technology. Qualis: A2 em Engenharias II).

Artigo 2: MODELAGEM CINÉTICA E PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL DO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA (A ser submetido. Periódico: Revista Journal of Stored Products Research. Qualis: A2 em Engenharias II).

Artigo 3: CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E ESTRUTURAL DE SISTEMAS COSMÉTICOS CONTENDO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA. (A ser submetido. Periódico: International Journal of Cosmetic Science. Qualis: A3 em Engenharias II).

ISOTERMAS DE ADSORÇÃO E PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

RESUMO

Este estudo teve como objetivo determinar e modelar as isotermas de adsorção de umidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae* obtido por secagem em camada de espuma, além de estimar os parâmetros termodinâmicos associados. As isotermas foram construídas pelo método indireto estático nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C e ajustadas a diferentes modelos matemáticos. Os parâmetros termodinâmicos foram calculados a partir das relações entre atividade de água, temperatura e teor de umidade, com base na equação de Clausius–Clapeyron. Entre os modelos avaliados, Henderson apresentou o melhor desempenho, descrevendo as curvas com comportamento sigmoidal tipo II. O calor isostérico variou entre 44 e 50 kJ mol⁻¹, enquanto a entalpia e a entropia diferenciais reduziram-se com o aumento da umidade. A energia livre de Gibbs permaneceu negativa, confirmando a espontaneidade da adsorção. A condição de secagem do ponto central resultou no pó mais estável e menos higroscópico.

Palavras-chave: atividade de água; biomassa residual; calor isotérico de sorção; comportamento higroscópico; energia livre de Gibbs; estabilidade.

ABSTRACT

This study aimed to determine and model the moisture adsorption isotherms of *Saccharomyces cerevisiae* powder obtained by foam-mat drying, as well as to estimate the associated thermodynamic parameters. Isotherms were constructed using the indirect static method at 15, 30, and 45 °C and fitted to different mathematical models. Thermodynamic parameters were calculated from the relationships between water activity, temperature, and moisture content, based on the Clausius–Clapeyron equation. Among the evaluated models, Henderson showed the best performance, describing curves with Type II sigmoidal behavior. Isostatic heat ranged from 44 to 50 kJ mol⁻¹, while differential enthalpy and entropy decreased with increasing moisture. Gibbs free energy remained negative, confirming adsorption spontaneity. The central point drying condition resulted in the most stable and least hygroscopic powder.

Keywords: Gibbs free energy; hygroscopic behavior; isosteric heat of sorption; residual biomass; stability; water activity.

1. Introdução

Nos últimos anos, o aproveitamento de subprodutos agroindustriais tem se intensificado, principalmente diante da necessidade de desenvolver processos mais sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse contexto, a biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, gerada em processos fermentativos, tem sido estudada como uma matéria-prima de interesse industrial.^[1] Sua estrutura celular, composta por proteínas, β-glucanas, mananas e minerais, confere propriedades que favorecem sua incorporação em diferentes formulações.^[2] Entretanto, o uso dessa biomassa

requer técnicas de estabilização capazes de controlar a atividade de água e preservar suas características físico-químicas e bioativas durante o armazenamento.^[3]

Dentre as técnicas de desidratação, a secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) tem despertado crescente interesse por sua eficiência na remoção de umidade. Ao combinar aeração e aquecimento controlado, essa técnica promove a formação de uma estrutura porosa que favorece a transferência de massa e reduz o tempo total de secagem.^[3] Além disso, a operação em temperaturas moderadas contribui para a preservação de compostos bioativos e para a obtenção de pós de boa fluidez e rápida reidratabilidade, características desejáveis em aplicações alimentícias, farmacêuticas e cosméticas. Assim, compreender o comportamento da biomassa de *Saccharomyces cerevisiae* durante a secagem e o impacto desse processo sobre suas propriedades higroscópicas é fundamental para o desenvolvimento de produtos estáveis e com funcionalidade.^[4,5]

Sob essa perspectiva, a análise do comportamento higroscópico de materiais desidratados constitui uma etapa essencial na engenharia de secagem, pois permite prever alterações estruturais, químicas e microbiológicas durante o armazenamento.^[4] Dessa forma, as isotermas de adsorção de umidade desempenham um papel fundamental, pois descrevem o equilíbrio entre a atividade de água e o teor de umidade de equilíbrio, refletindo as interações entre moléculas de água e os constituintes da matriz sólida.^[6,7] O ajuste matemático dessas isotermas fornece parâmetros que auxiliam na escolha de condições ideais de secagem e na definição de limites críticos de umidade, garantindo estabilidade e segurança ao produto.^[8]

Além disso, a caracterização termodinâmica do processo de sorção fornece informações relevantes sobre a natureza e a intensidade das interações água-sólido.^[9] Parâmetros como o calor isostérico (Q_{st}), a entalpia diferencial (ΔH), a entropia (ΔS) e a energia livre de Gibbs (ΔG) permitem compreender o comportamento energético do sistema, evidenciando a espontaneidade e a energia envolvida nas interações entre moléculas de água e sítios de adsorção.^[10,11] Essa abordagem complementa o estudo das isotermas e oferece subsídios para otimizar tanto a operação de secagem quanto às condições de armazenamento.^[12]

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo determinar e modelar as isotermas de adsorção de umidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae* obtido por secagem em camada de espuma, bem como estimar os parâmetros termodinâmicos associados ao processo de sorção.

2. Materiais e métodos

2.1. Obtenção das leveduras

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* utilizada neste estudo foi obtida do pé de cuba das dornas de fermentação provenientes do processo fermentativo empregado na produção de cachaça.

A coleta foi realizada no Engenho Vitória, localizado no município de Alagoa Nova, Estado da Paraíba, Brasil (7° 01' 46.1" S, 35° 44' 17.7" W).

A amostra foi acondicionada em embalagens plásticas, previamente higienizadas, e transportada ao Laboratório de Termodinâmica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para posterior processamento. Após a chegada ao laboratório, o material foi homogeneizado e submetido ao congelamento a -18 °C, com o objetivo de preservar suas características físico-químicas e evitar alterações microbiológicas, assegurando a estabilidade da amostra até sua utilização nas etapas experimentais subsequentes.

2.2. Preparo do creme de levedura

Para a obtenção do creme de levedura, a amostra foi processada em centrífuga (Novatecnica, modelo NT 812, Brasil), operando a 5000 rpm durante 5 minutos. Esse procedimento teve como finalidade concentrar a biomassa de *Saccharomyces cerevisiae*, resultando em uma fração espessa, denominada creme de levedura, e em um sobrenadante líquido, ambos empregados nas etapas subsequentes do estudo.

2.3. Secagem em camada de espuma

2.3.1. Produção da espuma

O preparo da espuma teve início com a mistura do creme de levedura e do sobrenadante previamente obtidos. Essa combinação passou por agitação vigorosa em batedeira planetária (Arno, modelo Deluxe Inox SX-84, Brasil), juntamente com o agente espumante Portogel® (ICE Ingredientes, Brasil). O processo resultou na incorporação de ar e na formação de uma espuma homogênea e estável, adequada ao método de secagem aplicado.

As condições de preparo foram definidas com base no planejamento fatorial completo $2^2 + 2$, considerando as amostras referentes aos pontos de fatorial máximo e ponto central.^[13] A concentração do agente espumante foi de 15% no ponto de fatorial máximo e 10% no ponto central. A diluição do creme de levedura manteve-se na proporção mássica de 1:2 (massa de creme em relação à massa do sobrenadante), e o tempo de agitação permaneceu em 16 minutos.^[13]

2.3.2. Condições e procedimento de secagem

A espuma obtida foi distribuída de forma uniforme em bandejas de zinco galvanizado, com espessura de 1 mm, fundo removível e sem bordas laterais, previamente taradas, formando uma camada de aproximadamente 5 mm de espessura.

A secagem foi conduzida em estufa de circulação e renovação de ar (Solab, modelo SL-102, Brasil), operando nas temperaturas estabelecidas pelo planejamento experimental, correspondentes

a 60 °C (ponto central) e 70 °C (ponto de fatorial máximo). Durante o processo, realizaram-se pesagens periódicas até a estabilização da massa, indicando o alcance do equilíbrio de umidade.

Após a secagem, o material foi cuidadosamente removido das bandejas e acondicionado em embalagens plásticas do tipo polietileno de baixa densidade (PEBD), com fechamento hermético, envoltas por uma camada de papel alumínio para proteção contra luz e umidade. As amostras foram mantidas em dessecador, sob temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa de 57 ± 3 %, até o momento das análises. O pó obtido constituiu a amostra-base utilizada para a construção das isotermas de adsorção e para o cálculo do calor isotérico de sorção, bem como dos demais parâmetros termodinâmicos.

2.4. Isotermas de adsorção

A determinação das isotermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi realizada nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C, utilizando o método indireto estático.^[14] As amostras, obtidas sob as melhores condições de secagem, correspondentes aos pontos de fatorial máximo ($C_e=15\%$ e $T=70^\circ\text{C}$) e central ($C_e=10\%$ e $T=60^\circ\text{C}$), foram utilizadas para a construção das isotermas.

O procedimento iniciou-se com a medição da atividade de água inicial. Para isso, 1,0 g da amostra em pó foi pesado e submetido à leitura no equipamento (Novasina®, modelo LabMASTER-aw 1119971, Switzerland). Em seguida, 12 amostras foram expostas a um ambiente com elevada umidade relativa para o processo de umidificação. Em intervalos de tempo pré-determinados, as amostras eram retiradas do ambiente, pesadas e analisadas quanto à atividade de água no equipamento. Esse procedimento foi repetido para cada uma das três temperaturas avaliadas.

Posteriormente à determinação desses pontos, as amostras de pó referentes às duas condições de secagem foram acondicionadas em estufa a 105 °C, por 24 horas, para a determinação da umidade em base seca da amostra.^[15] A partir desses valores, determinou-se o teor de umidade de equilíbrio e, em associação às medições de atividade de água, procederam-se à construção das isotermas de adsorção.

2.4.1. Modelagem matemática

O ajuste matemático das isotermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi realizado em três temperaturas (15, 30 e 45 °C), utilizando modelos amplamente reportados na literatura. Na Tabela 1 são apresentadas as equações correspondentes a cada modelo, empregadas para descrever a relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a atividade de água.

Tabela 1. Modelos matemáticos para ajustes das isotermas de adsorção.

Modelos	Equação	Referência
BET	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times a_w}{(1 - a_w) \times [1 + (C - 1) \times a_w]}$	[10]
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m \times C \times k \times a_w}{(1 - k \times a_w) \times [1 + (C - 1) \times k \times a_w]}$	[8]
Oswin	$X_{eq} = A \times \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^B$	[4]
Smith	$X_{eq} = A - B \times \ln(1 - a_w)$	[8]
Peleg	$X_{eq} = A \times a_w^B + C \times a_w^D$	[8]
Iglesias & Chirif	$X_{eq} = A + B \times \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]$	[7]
Henderson	$X_{eq} = \left[\frac{-1}{A} \times \ln(1 - a_w) \right]^{\frac{1}{B}}$	[11]
Caurie	$X_{eq} = \exp(A + B \times a_w)$	[7]

Nessa representação, X_{eq} corresponde ao teor de umidade de equilíbrio, a_w à atividade de água, X_m é o teor de umidade na monocamada, enquanto A, B, C, D e k representam os coeficientes característicos de cada modelo. O ajuste e a regressão das curvas foram realizados no *software* Statistica 5.0 (StatSoft Inc., Tulsa, USA), aplicando-se regressão não linear pelo método de Levenberg-Marquardt.

2.4.2. Análise estatística

Para a análise estatística dos modelos de isotermas de adsorção, inicialmente, verificou-se a significância global por meio do teste F, baseado na análise de variância (ANOVA). Foram considerados estatisticamente válidos aqueles cujo valor de significância (*p-value*), obtido no *software* Statistica 5 (StatSoft Inc., Tulsa, USA), apresentou-se inferior a 5% ($\alpha = 0,05$).^[16]

Na sequência, avaliou-se a significância individual dos coeficientes com base em três critérios complementares: (i) exclusão do valor zero nos intervalos de confiança, (ii) obtenção de *p-values* inferiores a 0,05 e (iii) superioridade do valor t calculado em relação ao valor crítico da distribuição t de *Student*. Os coeficientes que não atenderam a esses critérios foram classificados como estatisticamente não significativos e, portanto, desconsiderados na interpretação e discussão dos resultados.^[16]

2.4.3. Determinação do melhor modelo

Após a análise estatística, procedeu-se à seleção do modelo mais adequado para representar os dados experimentais das isotermas de adsorção. As curvas foram ajustadas no *software* Origin 2018 (OriginLab, Northampton, USA), adotando-se como critérios de avaliação o menor valor da raiz do erro quadrático médio (RMSE), o menor erro percentual médio absoluto (P %) e o maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}). O valor de R^2_{adj} foi obtido diretamente no *software*, enquanto os parâmetros RMSE e P foram calculados a partir das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_e - X_p)^2} \quad (1)$$

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_e - X_p}{X_e} \right| \quad (2)$$

Onde X_e e X_p correspondem, respectivamente, aos valores experimentais e preditos do teor de umidade e N representa o número de observações.

2.5. Parâmetros termodinâmicos de sorção

2.5.1. Calor isotérico de sorção

O calor isotérico de sorção (Q_{st}) foi determinado a partir dos dados experimentais das isotermas de adsorção obtidas nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C. O modelo matemático que melhor representou o comportamento das isotermas foi empregado para estimar os valores de atividade de água (a_w) correspondentes a diferentes teores de umidade de equilíbrio (X_{eq}) na faixa de 0,01 a 0,30 g de água/g de matéria seca. Com base nas estimativas de a_w para cada valor fixo de X_{eq} , construíram-se gráficos de $\ln(a_w)$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T$). A relação entre essas variáveis é descrita pela forma integrada da equação de Clausius–Clapeyron (Equação 3).^[10,17]

$$\left[\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} \right]_{Xeq} = - \frac{q_{st}}{R} \quad (3)$$

Em que q_{st} é o calor isotérico líquido de sorção (kJ/mol) e R é a constante universal dos gases (8,314 J/mol·K).

O coeficiente angular das retas obtidas nos gráficos de $\ln(a_w)$ versus $1/T$ corresponde a $-q_{st}/R$, permitindo calcular o valor de q_{st} para cada teor de umidade de equilíbrio. Em seguida, o calor isotérico de sorção (Q_{st}) foi obtido pela soma do calor isotérico líquido de sorção (q_{st}) ao calor latente de vaporização da água ($H_L = 43$ kJ/mol), conforme a Equação 4.^[10,18]

$$Q_{st} = q_{st} + H_L \quad (4)$$

Os valores de Q_{st} foram então relacionados aos teores de umidade de equilíbrio, possibilitando avaliar a variação da energia de sorção em função do conteúdo de água do material.

2.5.2. Entropia e entalpia diferencial de sorção

A entalpia diferencial (ΔH) e a entropia diferencial (ΔS) de sorção foram determinadas a partir da forma linearizada da equação de Clausius–Clapeyron, que expressa a dependência da atividade de água (a_w) com a temperatura (T), conforme a Equação 5.^[8,17]

$$\ln(a_w) = -\frac{\Delta H}{R} \times \frac{1}{T} + \frac{\Delta S}{R} \quad (5)$$

Em que ΔH ($J.mol^{-1}$) representa a entalpia diferencial de sorção e ΔS ($J.mol^{-1} K^{-1}$) a entropia diferencial associada à ordenação das moléculas de água sobre a superfície do material.

Para cada valor fixo de X_{eq} , os dados experimentais de $\ln(a_w)$ foram ajustados linearmente em função de $1/T$, e o coeficiente angular da reta foi utilizado para calcular ΔH ($-\Delta H/R$), enquanto o coeficiente linear permitiu determinar ΔS ($\Delta S/R$).

2.5.3 Energia livre de gibbs

A energia livre de Gibbs (ΔG) foi calculada a partir dos valores diferenciais de entalpia e entropia, utilizando a Equação 6.^[19]

$$\Delta G = \Delta H - T \times \Delta S \quad (6)$$

Em que T é a temperatura absoluta (K).

3. Resultados e discussão

3.1. Isotermas de adsorção

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros dos modelos de Oswin, Smith, Henderson e Caurie, ajustados aos dados experimentais das isotermas de adsorção de umidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae*, obtido nas melhores condições de secagem em camada de espuma (ponto central e fatorial máximo), nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C. Para avaliar a qualidade do ajuste, a tabela também inclui a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro percentual médio absoluto (P %) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}). Os modelos de Peleg, Iglesias & Chirif, BET e GAB foram excluídos da discussão dos resultados por não apresentarem coeficientes estatisticamente significativos.

Tabela 2. Resultado do ajuste dos modelos de Oswin, Smith, Henderson e Caurie aos dados experimentais das isotermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, nas três temperaturas de análise.

Condição de secagem	Modelo	T (°C)	Coeficientes do modelo		Parâmetros de ajuste do modelo		
			A	B	R^2_{adj}	RMSE	P (%)
Fatorial máximo ($C_e=15\%$ e T=70°C)	Oswin	15	0,054	0,952	0,972	0,012	7,843
		30	0,053	0,707	0,987	0,007	7,719
		45	0,029	0,897	0,996	0,004	5,562
	Smith	15	-0,131	0,212	0,951	0,015	11,584
		30	-0,059	0,133	0,988	0,006	6,579
		45	-0,076	0,118	0,938	0,014	19,379
	Henderson	15	3,686	0,527	0,980	0,010	6,040
		30	5,855	0,678	0,998	0,002	1,914
		45	5,120	0,514	0,994	0,004	6,549
	Caurie	15	-6,290	5,931	0,981	0,010	6,859
		30	-5,727	4,846	0,995	0,004	4,756
		45	-7,565	6,692	0,986	0,009	14,218
Ponto central ($C_e=10\%$ e T=60°C)	Oswin	15	0,072	0,782	0,979	0,009	6,866
		30	0,065	0,798	0,986	0,007	7,868
		45	0,048	0,892	0,963	0,011	28,235
	Smith	15	-0,073	0,184	0,985	0,008	5,670
		30	-0,050	0,155	0,988	0,006	5,391
		45	-0,059	0,143	0,991	0,005	8,482
	Henderson	15	4,476	0,673	0,990	0,006	3,510
		30	4,884	0,693	0,995	0,004	4,088
		45	4,828	0,621	0,984	0,007	7,962
	Caurie	15	-5,069	4,461	0,989	0,007	3,500
		30	-4,983	4,250	0,995	0,004	4,723

45	-5,538	4,737	0,986	0,006	7,578
----	--------	-------	-------	-------	-------

Neste estudo, considerou-se que um modelo apresentava desempenho estatisticamente satisfatório quando atendia simultaneamente aos seguintes critérios: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) superior a 0,98, e os valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do erro percentual médio absoluto P (%) inferiores a 1 e 10, respectivamente.^[10] A análise dos resultados apresentados na Tabela 2 demonstrou que o modelo de Henderson foi o que melhor representou o comportamento das isotermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, uma vez que em todas as temperaturas (15, 30 e 45 °C) e nas duas condições de secagem avaliadas (ponto central e fatorial máximo) apresentou $R^2_{\text{adj}} > 0,98$, $P < 10\%$ e $\text{RMSE} < 1$. O melhor ajuste foi obtido na condição de fatorial máximo a 30 °C ($R^2_{\text{adj}} = 0,998$, $\text{RMSE} = 0,002$ e $P (\%) = 1,914$), enquanto o pior desempenho ocorreu na condição de ponto central a 45 °C ($R^2_{\text{adj}} = 0,984$, $\text{RMSE} = 0,007$ e $P (\%) = 7,962$).

O modelo de Henderson também apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais das isotermas de sorção de umidade da farinha de mandioca modificada,^[20] e de malte de trigo,^[11] confirmando a ampla aplicabilidade e desempenho consistente desse modelo em diferentes matrizes.

O modelo de Caurie também apresentou bom desempenho, com R^2_{adj} elevados ($\geq 0,986$) e erros relativamente baixos, embora em algumas condições (45 °C, fatorial máximo) o valor do erro percentual médio absoluto P (%) tenha ultrapassado ligeiramente o limite de aceitabilidade. Já os modelos de Oswin e Smith apresentaram ajustes satisfatórios apenas em situações específicas, mas de forma geral revelaram maior variabilidade nos valores de P (%), especialmente a 45 °C, indicando menor robustez frente aos modelos de Henderson e Caurie.

Nas Figuras 1 e 2 estão mostradas as isotermas de adsorção de umidade do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Os gráficos exibem os dados experimentais obtidos nas temperaturas de 15, 30 e 45 °C e nas condições de secagem de ponto central e fatorial máximo.

Figura 1. Isotermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* (Fatorial máximo) nas temperaturas de adsorção de 15 °C, 30 °C e 45 °C ajustada pelo modelo de Henderson.

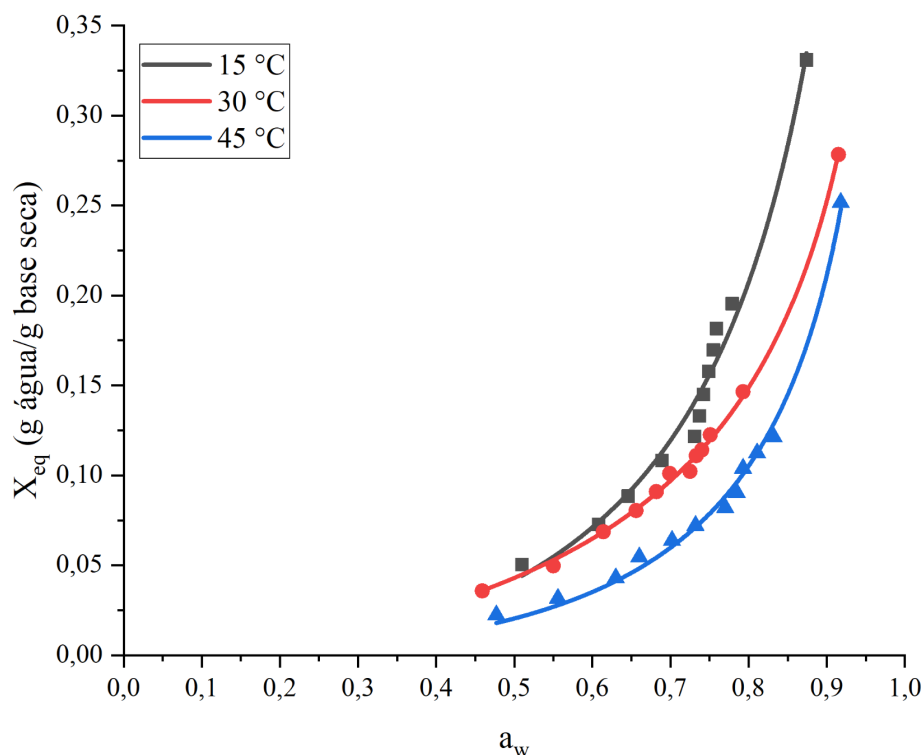
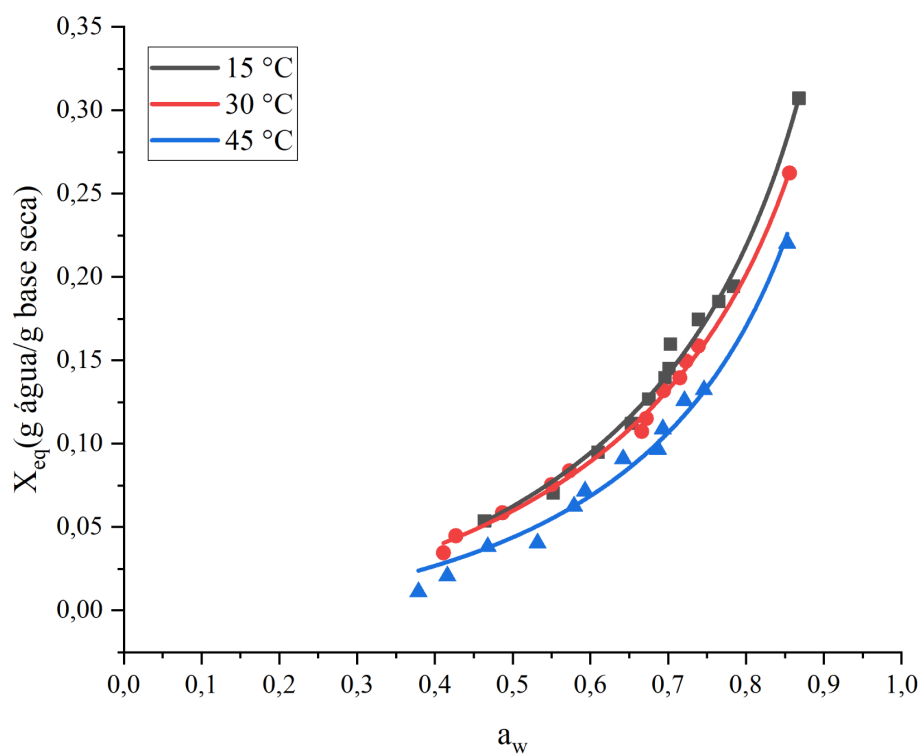


Figura 2. Isotermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* (Ponto central) nas temperaturas de adsorção de 15 °C, 30 °C e 45 °C ajustada pelo modelo de Henderson.



A análise das Figuras 1 e 2 mostrou que, em todas as condições avaliadas, o teor de umidade de equilíbrio diminuiu à medida que a temperatura aumentou para uma mesma atividade

de água. Esse comportamento está relacionado ao incremento da energia cinética das moléculas de água, que em temperaturas mais elevadas aumenta sua mobilidade, reduzindo a formação de ligações de hidrogênio com os grupos polares da matriz.^[6] Como consequência, há menor número de sítios ativos disponíveis para adsorção e maior instabilidade nas interações, o que facilita a separação das moléculas de água da superfície do material, tornando o pó menos higroscópico e reduzindo sua capacidade de retenção hídrica, condição que contribui para a estabilidade do material ao minimizar a tendência à aglomeração, à perda de fluidez e a alterações físico-químicas durante o armazenamento.^[7,8,10]

Resultados semelhantes foram relatados em estudos anteriores, como no das isotermas de sorção e parâmetros termodinâmicos da farinha de cúrcuma,^[21] e do comportamento das isotermas de adsorção de sementes de pimenta jalapenho.^[22]

Com base na atividade de água, a isoterma de sorção pode ser dividida em três regiões distintas: faixa A ($a_w = 0-0,2$), faixa B ($a_w = 0,2-0,7$) e faixa C ($a_w = 0,7-1,0$). Nas isotermas obtidas (Figuras 1 e 2), não foi possível identificar a faixa A ($a_w < 0,2$), correspondente à adsorção monocamada, uma vez que os ensaios foram conduzidos em valores de atividade de água superiores a 0,3. Assim, o comportamento observado concentra-se essencialmente nas faixas B e C.^[6]

Na faixa B, observou-se um aumento gradual do teor de umidade em função da atividade de água, característico da formação de multicamadas e do preenchimento de microporos da matriz. Já na faixa C, verificou-se um incremento mais acentuado da umidade de equilíbrio, associado à presença de água livre, condição crítica para a estabilidade do pó, pois favorece aglomeração, reações de degradação e risco de crescimento microbiano.^[10,22]

Quando o produto atinge um valor de atividade de água (a_w) em torno de 0,7, o comportamento das isotermas passa a ser exponencial, indicando uma rápida elevação na taxa de adsorção de água. Nessas condições, correspondentes a uma umidade relativa do ar de aproximadamente 70%, o material torna-se mais suscetível ao ganho de umidade. Esse cenário reforça a necessidade de adoção de estratégias de controle, como o armazenamento em ambientes de baixa umidade relativa e a utilização de embalagens com elevada barreira ao vapor de água, a fim de reduzir a transferência de umidade e preservar a estabilidade e a qualidade do pó.^[11]

A atividade de água (a_w) é um dos principais fatores que afetam a sobrevivência e o crescimento de microrganismos, estando diretamente associada à estabilidade do produto durante o armazenamento. Valores de a_w inferiores a 0,7 inibem o desenvolvimento de bactérias, leveduras e fungos, enquanto níveis abaixo de 0,6 não permitem a sobrevivência da maioria desses microrganismos.^[9,21] No presente estudo, as isotermas obtidas (Figuras 1 e 2) mostraram que, até aproximadamente $a_w = 0,6-0,7$, o pó apresentava teores de umidade de equilíbrio baixos, consistentes com esse intervalo microbiologicamente desfavorável. Entretanto, acima desse limiar,

observou-se elevação expressiva de X_{eq} , indicando maior retenção de água e aproximação de condições que podem favorecer a deterioração microbiológica. Esse comportamento destaca a importância de impedir que o produto avance para essa região das isothermas durante o armazenamento.

Na comparação das isothermas de adsorção obtidas nas condições de secagem avaliadas, fatorial máximo ($C_e = 15\%$ e $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) e ponto central ($C_e = 10\%$ e $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$), verificou-se que as curvas apresentaram comportamento semelhante, com pequenas diferenças nos valores de umidade de equilíbrio em faixas correspondentes de atividade de água. Esse resultado indicou que, independentemente da combinação de temperatura e concentração do agente espumante, o comportamento das isothermas manteve-se consistente, revelando perfis higroscópicos semelhantes entre os pós produzidos. Resultados análogos foram reportados no estudo do pó das folhas de noni obtido por secagem em camada de espuma, no qual alterações nos parâmetros de processo (temperatura, concentração de agente espumante e tempo de agitação) também não exerceram influência sobre as isothermas de adsorção.^[23]

Em todas as temperaturas avaliadas, as isothermas de adsorção apresentaram perfil sigmoidal, classificado como tipo II.^[24] Esse comportamento é típico da sorção física em produtos em pó e está relacionado à formação de múltiplas camadas de água em estruturas microcapilares.^[20,22] As isothermas do tipo II são frequentemente observadas em produtos de origem biológica, como o pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, em que ocorrem intensas interações entre moléculas de água e constituintes, especialmente carboidratos e proteínas.^[8,10,18]

Resultados semelhantes foram descritos no estudo das isothermas de adsorção do pó de larvas da mosca soldado-negro, considerada uma fonte alternativa de proteínas para alimentos e rações.^[25]

3.2. Parâmetros termodinâmicos de sorção

3.2.1. Calor isotérico de sorção

Como o modelo de Henderson apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais das isothermas de adsorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, ele foi empregado para estimar a atividade de água em teores de umidade de equilíbrio (X_{eq}) variando de 0,01 a 0,30 g de água/g de matéria seca, nas três temperaturas avaliadas. A seleção dessa faixa de X_{eq} deve-se ao fato de abranger integralmente os valores experimentais obtidos nas isothermas.

Com base nessas estimativas, foi elaborado o gráfico de $\ln(a_w)$ em função de $1/T$, apresentados nas Figura 3 e 4, para as duas condições de secagem estudadas (fatorial máximo e ponto central).

Figura 3. Gráfico de $\ln(a_w)$ vs $1/T$ para o cálculo do calor isotérico de sorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para diferentes valores de X_{eq} (g água/g base seca) - Fatorial máximo.

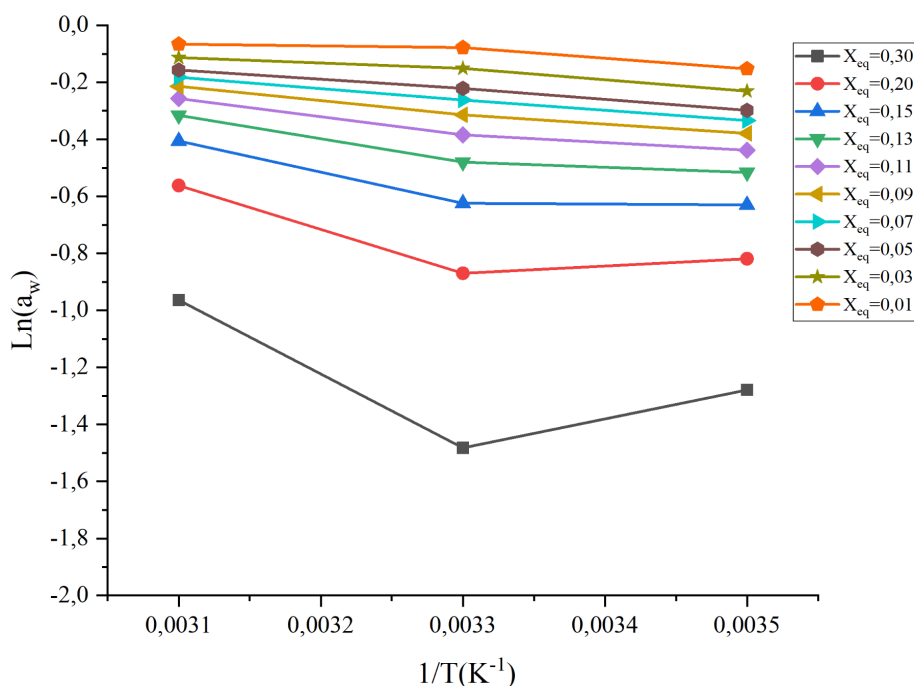
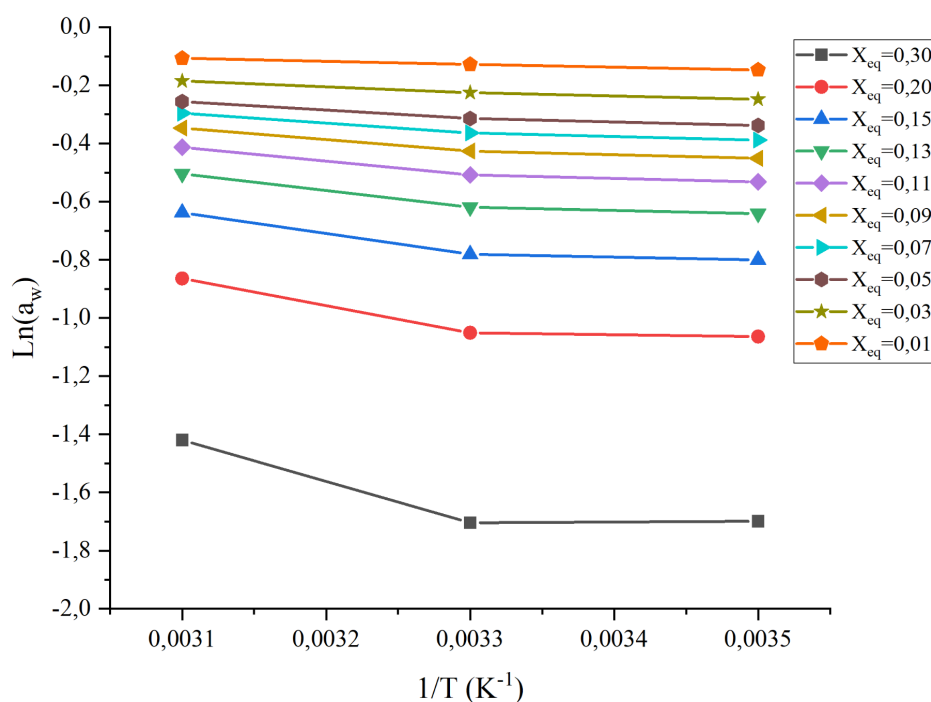


Figura 4. Gráfico de $\ln(a_w)$ vs $1/T$ para o cálculo do calor isotérico de sorção do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* para diferentes valores de X_{eq} (g água/g base seca) - Ponto central.



A partir da representação gráfica de $\ln(a_w)$ em função de $1/T$ e da aplicação da Equação de Clausius-Clapeyron, foi possível determinar o calor isotérico de sorção (Q_{st}) do pó de *Saccharomyces cerevisiae*. Os valores de Q_{st} obtidos foram então relacionados aos teores de

umidade de equilíbrio (X_{eq}), permitindo avaliar a influência do conteúdo de água na energia envolvida no processo de sorção, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6.

Figura 5. Variação do calor isostérico de sorção em função dos teores de umidade do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* obtido na condição de fatorial máximo.

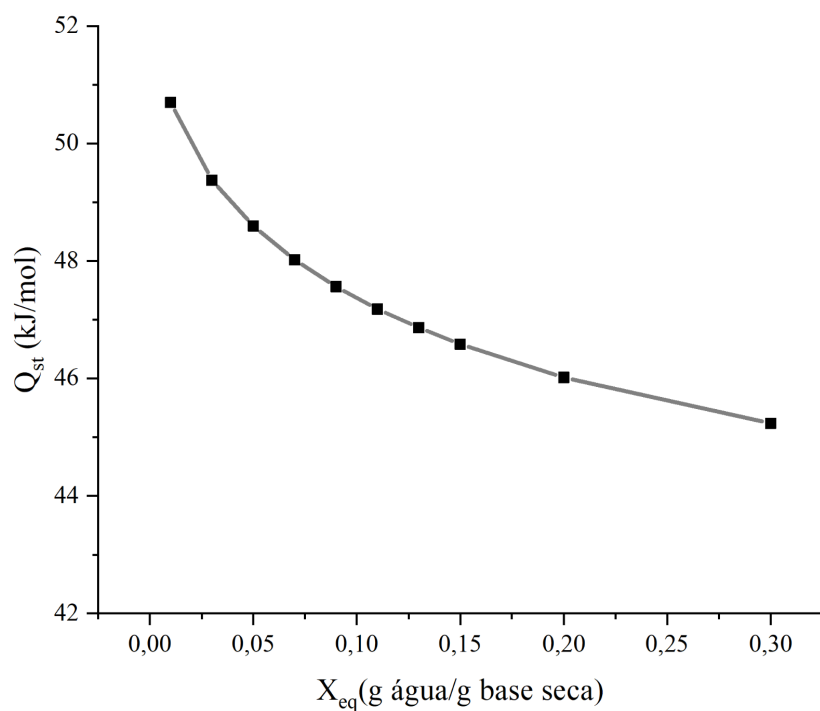
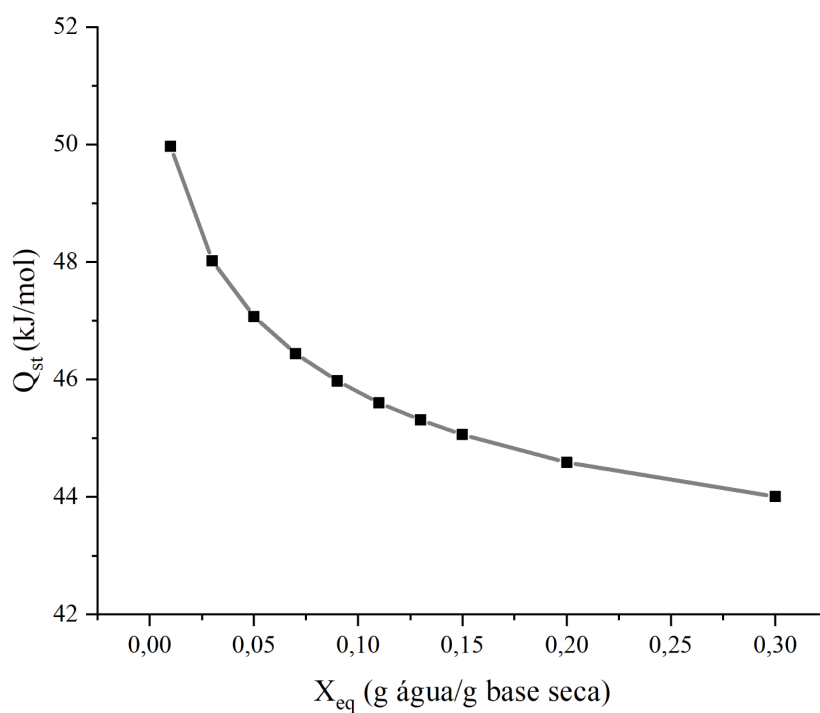


Figura 6. Variação do calor isostérico de sorção em função dos teores de umidade do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* obtido na condição do ponto central.



A partir da análise das Figuras 5 e 6, verificou-se que, em baixos teores de umidade ($X_{eq} = 0,01$ g/g b.s.), foram observados os valores máximos do calor isotérico de sorção (Q_{st}), próximos a 50 kJ/mol, os quais refletem a presença de moléculas de água fortemente adsorvidas nos sítios primários da matriz. Essa fração de água está associada a grupos polares, como proteínas e carboidratos, por meio de ligações de hidrogênio e interações de Van der Waals, exigindo, portanto, maior energia para sua remoção e resultando em um calor isotérico líquido de sorção (q_{st}) mais elevado.^[26]

Com o aumento da umidade, esses sítios primários tornam-se saturados, e o processo de adsorção passa a ocorrer em multicamadas, caracterizando regiões com maior proporção de água livre. Nessa etapa, o q_{st} diminui e os valores de Q_{st} tendem a se aproximar do calor latente de vaporização da água pura (44 kJ/mol), indicando que a energia requerida para remover essa fração de água é semelhante à necessária para a evaporação da água líquida. Sob a perspectiva do processo de secagem, essa condição é energeticamente mais favorável, pois não demanda a superação de interações adicionais entre a água e a matriz sólida. Entretanto, em altos teores de umidade, observa-se o predomínio de água livre, mais suscetível a reações de degradação físico-química, o que pode comprometer a estabilidade do pó durante o armazenamento.^[6,9]

Ao comparar as duas condições de secagem, verificou-se que as amostras obtidas no fatorial máximo apresentaram valores iniciais de Q_{st} ligeiramente superiores aos do ponto central. Contudo, em níveis mais elevados de umidade, os valores de Q_{st} tendem a convergir, indicando que o comportamento higroscópico se torna semelhante entre as condições de secagem avaliadas.

O calor isotérico de sorção (Q_{st}) é um parâmetro termodinâmico fundamental para compreender a intensidade das interações entre a água e um determinado material, sendo determinante tanto na análise dos processos de secagem quanto na avaliação da estabilidade durante o armazenamento.^[10,27] Para o pó de *Saccharomyces cerevisiae*, os valores de Q_{st} variaram entre 50,7 kJ/mol (máximo) e 44,0 kJ/mol (mínimo), sendo inferiores aos relatados para diferentes matrizes biológicas descritas na literatura. Tendência semelhante foi descrita para o bagaço de malte (58,5 kJ/mol).^[26]

De forma análoga, foram observados valores mais elevados para proteína de soja (66 kJ/mol) e, sobretudo, para amido de milho (106 kJ/mol), associados à alta densidade de grupos hidroxila e ao confinamento em microcapilares. No mesmo estudo, valores relativamente menores foram registrados em materiais com maior teor de lipídios, como leite de coco em pó (56 kJ/mol) e coco em pó (52 kJ/mol).^[28] Em todos os casos, incluindo o presente estudo, os valores mínimos em baixas umidades convergiram para aproximadamente 44,0 kJ/mol.

Nesse contexto, os resultados obtidos para o pó de *Saccharomyces cerevisiae* sugerem que, embora a matriz contenha grupos polares capazes de interagir com moléculas de água, a energia

dessas interações é relativamente menor, possivelmente em função da menor proporção de constituintes hidrofílicos, como polissacarídeos estruturais (β -glucanas e mananas) e proteínas, e da presença de componentes de caráter hidrofóbico, tais como lipídios e resíduos apolares de aminoácidos.^[2] Essa composição reduz a disponibilidade e a diversidade de sítios de adsorção, limitando a formação de ligações de hidrogênio e, conseqüentemente, diminuindo a intensidade das interações água–matriz. Sob a perspectiva da secagem, tal característica favorece a remoção da água, uma vez que as ligações estabelecidas entre a matriz e as moléculas de água são menos intensas, demandando menor energia para sua ruptura e tornando o processo de desidratação mais eficiente e energeticamente favorável.^[10,27]

Entretanto, do ponto de vista da estabilidade, a menor intensidade das interações água–matriz implica uma redução na capacidade do material em reter água fortemente adsorvida, tornando-o mais suscetível a variações de umidade e a fenômenos de aglomeração durante o armazenamento. Essa susceptibilidade favorece a reabsorção de água, a ocorrência de alterações físico-químicas e o comprometimento gradual da qualidade do pó ao longo do tempo, sendo, portanto, indispensável o uso de condições adequadas de acondicionamento e armazenamento.^[7,9]

3.2.2. Entropia e entalpia diferencial de sorção

Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas as variações da entalpia (ΔH) e da entropia (ΔS) diferenciais em função dos teores de umidade de equilíbrio para as condições de fatorial máximo e ponto central, respectivamente.

Figura 7. Variação da entalpia e entropia em função dos teores de umidade de equilíbrio (Fatorial máximo).

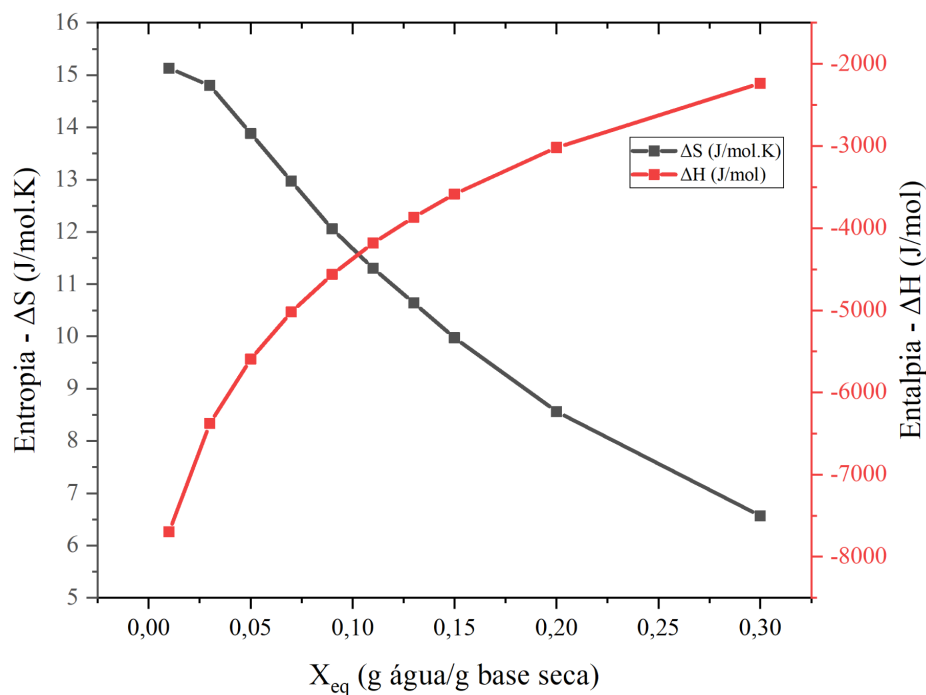
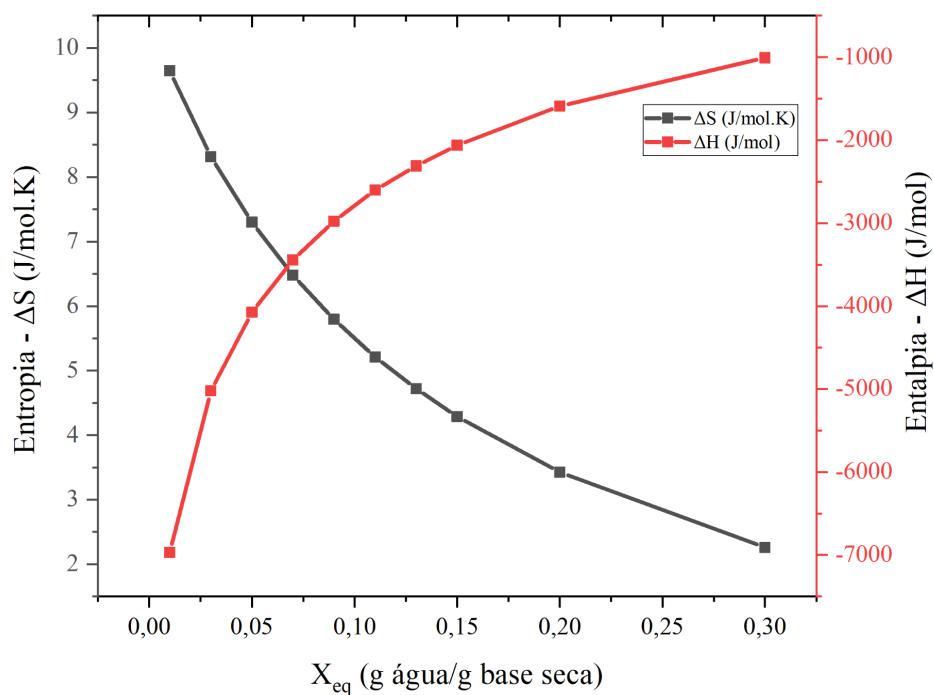


Figura 8. Variação da entalpia e entropia em função dos teores de umidade de equilíbrio (Ponto central).



Avaliando as Figuras 7 e 8, observou-se que, em ambas as condições de secagem, o aumento do teor de umidade de equilíbrio levou à redução, em módulo, dos valores de entalpia e entropia diferencial. Esse comportamento é semelhante ao relatado para outros materiais, como sementes de canola,^[29] e amêndoas de cacau.^[12]

A entalpia diferencial (ΔH) apresentou valores negativos, variando aproximadamente de -7500 a -2000 J/mol para a condição de fatorial máximo e de -7000 a -1000 J/mol para o ponto

central, indicando que a adsorção de água é um processo exotérmico. Esse resultado confirma a liberação de energia durante a interação entre as moléculas de água e os sítios ativos da matriz do material, evidenciando a natureza atrativa dessas interações.^[8,19] A diminuição gradual de ΔH (em módulo) com o aumento do teor de umidade sugere que, em baixos teores, predominam sítios de alta energia capazes de formar ligações mais fortes e específicas com as moléculas de água, correspondendo à formação da monocamada. À medida que esses sítios são ocupados, a adsorção passa a ocorrer em regiões menos energéticas, originando multicamadas com interações mais fracas e menos direcionais.^[11]

Por sua vez, a entropia diferencial (ΔS) apresentou valores positivos, variando de 15 a 7,5 J/mol·K para o fatorial máximo e de aproximadamente 10 a 2 J/mol·K para o ponto central. Esses valores refletem o número de sítios de sorção disponíveis e o grau de organização das moléculas de água sobre a superfície do material. A redução de ΔS com o aumento da umidade indica uma diminuição progressiva na desordem do sistema.^[17,21,25] Em baixos teores de umidade, os valores mais elevados de ΔS revelam maior aleatoriedade e heterogeneidade superficial, uma vez que as moléculas de água interagem com os sítios mais energéticos e irregulares, exigindo maior reorganização estrutural. Com o aumento da umidade, as moléculas passam a se dispor em camadas sucessivas, caracterizadas por interações mais ordenadas e estáveis, o que explica a redução da entropia.^[12,29]

De forma comparativa, os valores mais elevados de ΔH e ΔS observados no fatorial máximo indicam que essa condição resultou em uma superfície com maior heterogeneidade energética e estrutural, possivelmente decorrente de modificações microestruturais promovidas pela alta temperatura e maior concentração de espumante. Esse comportamento sugere a presença de sítios de adsorção mais ativos e irregulares, capazes de interagir mais fortemente com a água. Já no ponto central, os valores mais baixos e uniformes de ΔH e ΔS refletem uma superfície mais homogênea e energeticamente estável, com menor variação nos sítios de adsorção.

Essas diferenças sugerem que o material obtido no fatorial máximo tende a apresentar maior afinidade inicial pela água, o que pode favorecer a reabsorção de umidade quando exposto a ambientes úmidos, enquanto o pó do ponto central tende a ser mais estável frente a variações de umidade relativa, apresentando menor suscetibilidade à captação de água durante o armazenamento.^[8,11,29]

3.2.3 Energia livre de Gibbs

A estimativa dos parâmetros termodinâmicos, como a entalpia diferencial (ΔH) e a entropia (ΔS), é essencial para a compreensão do comportamento energético dos sistemas de adsorção, uma vez que esses parâmetros influenciam diretamente os valores da energia livre de

Gibbs (ΔG). A energia livre de Gibbs representa a quantidade máxima de energia disponível para a realização de trabalho em um processo que ocorre sob condições constantes de temperatura e pressão.^[11]

No contexto da adsorção, ΔG constitui um indicador da afinidade entre a matriz sólida e as moléculas de água, além de permitir avaliar a espontaneidade do processo de sorção. Valores negativos de ΔG indicam que o processo ocorre de forma espontânea, enquanto valores positivos refletem uma tendência não espontânea.^[19,30] Nas Figura 9 e 10 são exibidas a variação da energia livre de Gibbs em função da umidade de equilíbrio para as duas condições de secagem avaliadas.

Figura 9. Variação da energia livre Gibbs em função dos teores de umidade de equilíbrio (Fatorial máximo).

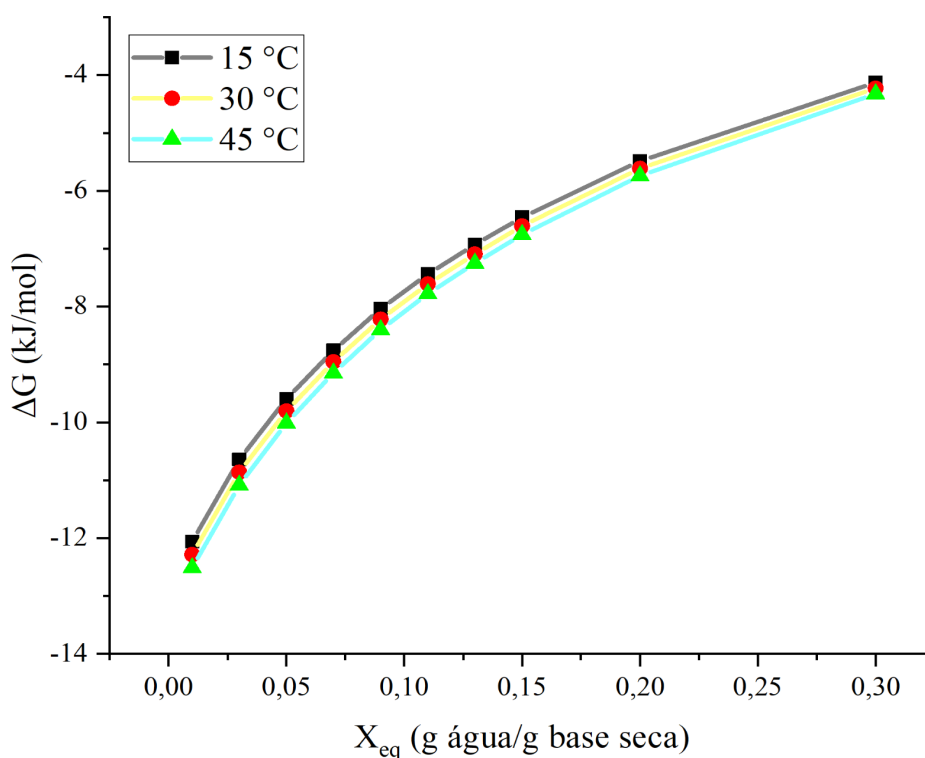
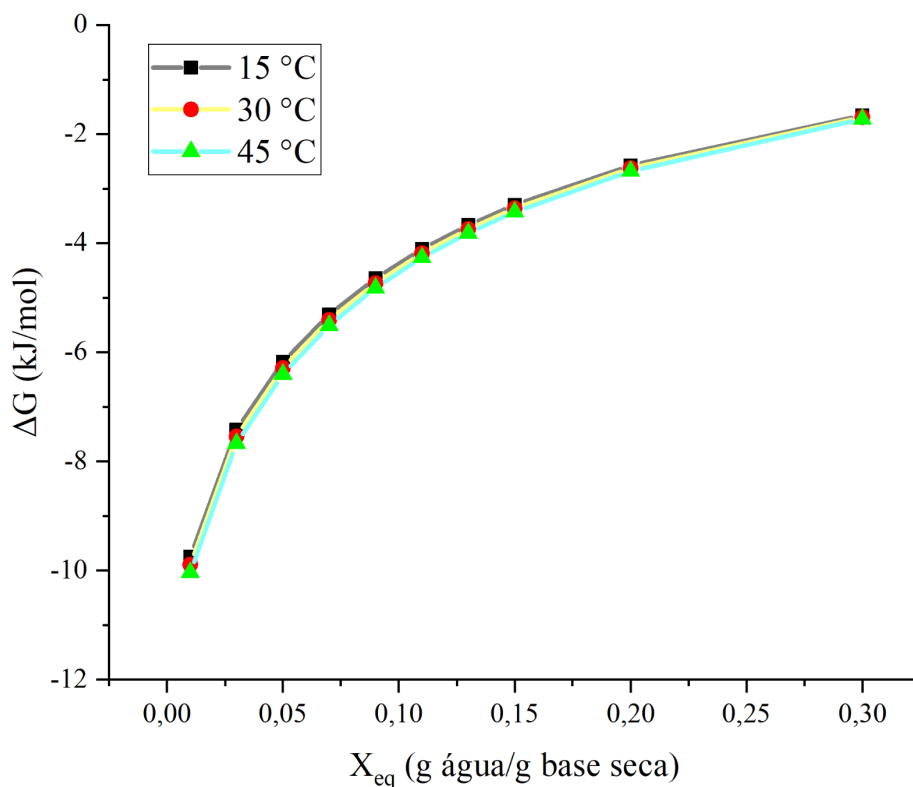


Figura 10. Variação da energia livre Gibbs em função dos teores de umidade de equilíbrio (Ponto central).



A partir da análise das Figuras 9 e 10, observou-se que, para ambas as condições de secagem, os valores de ΔG permaneceram negativos em todo o intervalo de umidade de equilíbrio, confirmando que o processo de adsorção de água ocorre de forma espontânea nas condições avaliadas. Esse comportamento indica que nenhuma energia adicional é requerida do meio para que as moléculas de água se adsorvam à matriz sólida.^[10,30]

Além disso, verificou-se que ΔG diminui, em módulo, com o aumento do teor de umidade, sugerindo que a espontaneidade do processo é mais acentuada em baixos teores de água, quando os sítios de maior energia estão predominantemente disponíveis. À medida que a superfície do material se torna mais hidratada, a força motriz da adsorção decresce, refletindo interações mais fracas entre a água e os sítios ativos da matriz.^[11] Dessa forma, valores mais negativos de ΔG indicam maior facilidade de adsorção de água e, consequentemente, maior higroscopicidade do material, enquanto valores menos negativos refletem menor afinidade pela umidade e maior estabilidade durante o armazenamento.^[19]

Ao comparar as condições de secagem, notou-se que o fatorial máximo apresentou valores de ΔG mais negativos, variando de aproximadamente -12 a -4 kJ/mol, enquanto o ponto central apresentou valores entre -10 e $-1,5$ kJ/mol. Essa diferença indica que o material obtido sob maior temperatura e concentração de agente espumante apresentou maior afinidade pela água. Por outro lado, o pó obtido nas condições do ponto central, embora também apresente caráter espontâneo, exibiu valores de ΔG menos negativos, indicando um processo ligeiramente menos favorável à adsorção, em concordância com os resultados de entalpia e entropia diferencial.

Adicionalmente, observou-se que o efeito da temperatura foi discreto em ambas as condições, uma vez que as curvas de ΔG para 15, 30 e 45 °C se mantiveram próximas. Esse comportamento evidencia que, dentro da faixa estudada, o equilíbrio entre os efeitos entálpicos e entrópicos é mantido, de modo que a espontaneidade global da adsorção não é significativamente afetada pela temperatura.^[10]

De forma geral, os resultados indicam que a secagem nas condições de fatorial máximo promove a obtenção de um material mais energeticamente ativo e higroscópico, enquanto o ponto central gera uma matriz mais estável e menos suscetível à adsorção. Essa diferença é relevante para o controle da estabilidade higroscópica e da vida útil do produto durante o armazenamento.

4. Conclusão

A secagem em camada de espuma mostrou-se eficaz na obtenção de pós de *Saccharomyces cerevisiae* com boa estabilidade higroscópica. O modelo de Henderson apresentou o melhor ajuste às isotermas de adsorção, confirmando o comportamento sigmoidal tipo II característico de materiais biológicos. A análise termodinâmica evidenciou que a adsorção ocorre de forma exotérmica e espontânea, com redução do calor isotérico à medida que aumenta a umidade. Entre as condições avaliadas, a secagem no ponto central (10% de agente espumante e 60 °C) gerou o material mais estável e menos suscetível à reabsorção de água. Os resultados reforçam que condições moderadas de secagem favorecem a preservação das propriedades físico-químicas e ampliam o potencial de aplicação biotecnológica da biomassa de levedura.

Referências

- [1] Schlabitz, C.; Kuhn, D.; Grambusch, I. M.; Pedralli, L.; Jacobs, W.; Lehn, D. N.; Souza, C. F. V. Reuse of Residual Brewer's Yeast: Valorization of Industrial Waste as a Source of Nutrients for Dairy Cattle. *Waste Biomass Valor.* **2024**, *15*, 5487–5499. DOI: 10.1007/s12649-024-02552-x.
- [2] Fu, S.; Garate, D.; Francis, A.; Garcia, B.; Huynh, D.; Orengo, I. Revisão Sistemática do Benefício Cosmético da Aplicação Tópica do Filtrado de Fermentação. *Surg. Cosmet. Dermatol.* **2023**, *15*, e20230166. DOI: 10.5935/scd1984-8773.2023150166.
- [3] Pinheiro, W. S.; Silva, F. L. H.; Cavalcante, J. A. Secagem da Biomassa de Levedura *Rhodotorula glutinis* em Camada de Espuma. *Res. Soc. Dev.* **2020**, *9*, e1129119437. DOI: 10.33448/rsd-v9i11.9437.

- [4] Melo, G. M. P. C.; Bonfim, K. S.; Silva, P. B.; Silva, Y. T. F.; Cavalcante, J. A. Estudo das Isotermas de Adsorção do Pó Obtido da Folha da Graviola. *Rev. Observ. Econ. Latinoam.* **2023**, *21*, 14609–14629. DOI: 10.55905/oelv21n10-011.
- [5] Thuy, N. M.; Hao, H. V.; Duong, L. T. T.; Giau, T. N.; Minh, V. Q.; Tai, N. V. Foam-Mat Drying of Lucuma Powder: Mathematical and Artificial Modeling of Drying Kinetics, Physicochemical and Microstructural Properties. *J. Agric. Food Res.* **2025**, *19*, 101656. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101656.
- [6] Arslan-Tontul, S. Moisture Sorption Isotherm, Isotheric Heat and Adsorption Surface Area of Whole Chia Seeds. *LWT* **2020**, *119*, 108859. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108859.
- [7] Yadav, S.; Mishra, S. Moisture Sorption Isotherms and Storage Study of Spray-Dried Probiotic Finger Millet Milk Powder. *J. Stored Prod. Res.* **2023**, *102*, 102128.
- [8] Rosa, D. P.; Evangelista, R. R.; Machado, A. L. B.; Sanches, M. A. R.; Telis-Romero, J. Water Sorption Properties of Papaya Seeds (*Carica papaya* L.) Formosa Variety: An Assessment Under Storage and Drying Conditions. *LWT* **2021**, *138*, 110458. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110458.
- [9] Ruan, J.; Li, M.; Liu, Y.; Ye, B.; Ling, C. Adsorption Isotherm and Thermodynamic Properties of Microwave Vacuum Dried Tilapia Fillets. *LWT* **2022**, *166*, 113766. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113766.
- [10] Zhang, Z.-S.; Li, X.-D.; Jia, H.-J.; Liu, Y.-L. Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Tiger Nuts: An Oil-Rich Tuber. *LWT* **2022**, *167*, 113866. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113866.
- [11] Silva, K. S.; Polachini, T. C.; Luna-Flores, M.; Luna-Solano, G.; Resende, O.; Telis-Romero, J. Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Wheat Malt Under Storage Conditions. *J. Food Process. Eng.* **2021**, *44*, e13784. DOI: 10.1111/jfpe.13784.
- [12] Collazos-Escobar, G. A.; Gutiérrez-Guzmán, N.; Váquiro-Herrera, H. A.; Amorocho-Cruz, C. M. Water Dynamics Adsorption Properties of Dried and Roasted Cocoa Beans (*Theobroma cacao* L.). *Int. J. Food Prop.* **2020**, *23*, 434–444. DOI: 10.1080/10942912.2020.1732408.
- [13] Melo, G. M. P. C. Obtenção da Levedura *Saccharomyces cerevisiae* em Pó pelo Método da Secagem em Camada de Espuma. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, **2025**.

- [14] Capriste, G. H.; Rotstein, E. Prediction of Sorption Equilibrium Data for Starch-Containing Foodstuffs. *J. Food Sci.* **1982**, *47*, 1501–1507.
- [15] Instituto Adolfo Lutz. *Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos*, 4th ed.; Instituto Adolfo Lutz: São Paulo, Brasil, 2008.
- [16] Costa, N. A.; Silva, F. L. H. S.; Cavalcante, J. A.; Santos, S. F. M. *Métodos dos Mínimos Quadrados com Aplicações em Engenharia*; Ciência Moderna: Rio de Janeiro, Brasil, 2021.
- [17] Sánchez-Torres, E. A.; Abril, B.; Benedito, J.; Bon, J.; García-Pérez, J. V. Water Desorption Isotherms of Pork Liver and Thermodynamic Properties. *LWT* **2021**, *149*, 111857. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111857.
- [18] Mallek-Ayadi, S.; Bahloul, N.; Kechaou, N. Mathematical Modelling of Water Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of *Cucumis melo* L. Seeds. *LWT* **2020**, *131*, 109727. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109727.
- [19] Li, S.; Ge, H.; Wang, H. Hygroscopic Properties Modeling and Thermodynamic Analysis of a Seamless Popping Capsule. *Sci. Rep.* **2025**, *15*, 30041. DOI: 10.1038/s41598-025-15452-4.
- [20] Hawa, L. C.; Ubaidillah, U.; Damayanti, R.; Hendrawan, Y. Moisture Sorption Isotherms of Modified Cassava Flour During Drying and Storage. *Heat Mass Transfer* **2020**, *56*, 2389–2396. DOI: 10.1007/s00231-020-02866-1.
- [21] Siqueira-de-Lima, M.; Cagnin, C.; Borges-Machado, A. L.; Ribeiro-Sanches, M. A.; Telis-Romero, J.; Resende, O. Thermodynamic Approach on Water Vapor Sorption of *Curcuma longa* L. Flour. *LWT* **2024**, *206*, 116592. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116592.
- [22] Borges-Machado, A. L.; Ribeiro-Sanches, M. A.; Martins, M. J. N.; Luna-Flores, M.; Luna-Solano, G.; Souza, S. J. F.; Telis-Romero, J. Drying Kinetics and Water Adsorption Properties of Jalapeño Pepper Seeds (*Capsicum annuum* L.): A Study Aiming at Their Recovery and Integral Exploitation. *LWT* **2024**, *204*, 116452. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116452.
- [23] Silva, Y. T. F.; Cavalcante, J. A.; Cornélio, M. L.; Oliveira, B. F.; Leite, A. C. N.; Melo, G. M. P. C. Comportamento Higroscópico do Pó da Folha do Noni (*Morinda citrifolia* L.) Obtido por Secagem em Camada de Espuma. *Rev. Observ. Econ. Latinoam.* **2024**, *22*, 01–21. DOI: 10.55905/oelv22n2-048.

- [24] International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems. *Pure Appl. Chem.* **1985**, *57*, 603–619.
- [25] Lehmad, M.; EL Hachimi, Y.; Lhomme, P.; Mghazli, S.; Abdenouri, N. Comprehensive Analysis of Adsorption-Desorption Isotherms, Drying Kinetics, and Nutritional Quality of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae. *Food Biophys.* **2024**, *19*, 938–954. DOI: 10.1007/s11483-024-09867-1.
- [26] Sanches, M. A. R.; Augusto, P. E. D.; Polachini, T. C.; Telis-Romero, J. Water Sorption Properties of Brewer's Spent Grain: A Study Aimed at its Stabilization for Further Conversion into Value-Added Products. *Biomass Bioenergy* **2023**, *170*, 106718. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106718.
- [27] Arslan-Tontul, S. Moisture Sorption Isotherm and Thermodynamic Analysis of Quinoa Grains. *Heat Mass Transfer* **2021**, *57*, 543–550. DOI: 10.1007/s00231-020-02978-8.
- [28] Jin, Y.; Tang, J.; Sablani, S. S. Food Component Influence on Water Activity of Low-Moisture Powders at Elevated Temperatures in Connection with Pathogen Control. *LWT* **2019**, *112*, 108257. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108257.
- [29] Majd, M. M.; Kordzadeh-Kermani, V.; Ghalandari, V.; Askari, A.; Sillanpää, M. Adsorption Isotherm Models: A Comprehensive and Systematic Review (2010–2020). *Sci. Total Environ.* **2022**, *812*, 151334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151334.
- [30] Girish, C. R. Determination of Thermodynamic Parameters in Adsorption Studies: A Review. *Chem. Pap.* **2025**, *79*, 5687–5706. DOI: 10.1007/s11696-025-04218-x.

MODELAGEM CINÉTICA E PREDIÇÃO DA VIDA ÚTIL DO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA

RESUMO

Compreender o comportamento de pós obtidos por técnicas de secagem durante o armazenamento é essencial para prever sua estabilidade e determinar a vida útil. Este estudo teve como objetivo modelar a cinética de deterioração e estimar a vida útil do pó de *Saccharomyces cerevisiae* obtido por secagem em camada de espuma, armazenado sob diferentes temperaturas e tipos de embalagem. O material foi produzido e armazenado por 90 dias em embalagens de polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno laminado de alumínio (PLA) e politereftalato de etileno e polietileno (PET+PE), mantidas em condições ambiente (26 °C/75 % UR) e acelerada (40 °C/75 % UR). Durante o armazenamento, foram analisados atividade de água (a_w), umidade, cor, pH, acidez total titulável, densidades aparente e compactada, índices de Carr e Hausner, índice de solubilidade em água, teores de proteínas e lipídios, além da contagem microbiológica. O tempo de estocagem foi o fator que mais influenciou as variações observadas, seguido da temperatura e do tipo de embalagem. Entre os materiais avaliados, o PEAD apresentou o melhor desempenho de barreira ao vapor d'água, mantendo valores de a_w e umidade mais estáveis, enquanto o PLA e o laminado PET+PE apresentaram resultados intermediários. Todas as amostras permaneceram microbiologicamente seguras ao longo do período experimental, confirmando a eficiência da secagem e a integridade das embalagens. A modelagem cinética, baseada na equação de Arrhenius, demonstrou que as variações seguiram predominantemente o modelo de ordem zero, possibilitando estimar a vida útil do produto. O pó acondicionado em PEAD e armazenado em condição ambiente apresentou a melhor estabilidade, com *shelf life* estimado em 12 meses. Os resultados evidenciam que a secagem em camada de espuma, associada à escolha adequada da embalagem, constitui uma alternativa eficiente e sustentável para a obtenção de pós de levedura estáveis, com potencial de aplicação em diferentes setores industriais, especialmente o cosmético e o biotecnológico.

Palavras-chave: Arrhenius; atividade de água; biomassa residual; embalagem; modelos cinéticos.

ABSTRACT

Understanding the behavior of powders obtained by drying techniques during storage is essential for predicting their stability and determining shelf life. This study aimed to model the deterioration kinetics and estimate the shelf life of *Saccharomyces cerevisiae* powder obtained by foam-mat drying, stored under different temperatures and packaging types. The material was produced and stored for 90 days in high-density polyethylene (HDPE), aluminum-laminated polyethylene (ALP), and polyethylene terephthalate/polyethylene (PET+PE) packaging, under ambient (26 °C/75 % RH) and accelerated (40 °C/75 % RH) conditions. During storage, water activity (a_w), moisture content, color, pH, titratable acidity, bulk and tapped densities, Carr and Hausner indices, water solubility index, protein and lipid contents, and microbiological counts were evaluated. Storage time was the factor with the greatest influence on the observed changes, followed by temperature and packaging type. Among the materials tested, HDPE showed the best water vapor barrier performance, maintaining more stable a_w and moisture values, while ALP and PET+PE showed intermediate behavior. All samples remained microbiologically safe throughout the experimental period, confirming the effectiveness of the drying process and the integrity of the packaging. Kinetic modeling, based on the Arrhenius equation, indicated that most variations followed a zero-order reaction model, allowing the prediction of product shelf life. The powder stored in HDPE under

ambient conditions showed the greatest stability, with an estimated shelf life of 12 months. These results demonstrate that foam mat drying, combined with the appropriate choice of packaging, is an efficient and sustainable alternative for obtaining stable yeast powders with potential applications in various industrial sectors, particularly in the cosmetic and biotechnological fields.

Keywords: Arrhenius; kinetic modeling; packaging; residual biomass; water activity.

1. Introdução

O reaproveitamento de subprodutos agroindustriais tem sido amplamente reconhecido como estratégia promissora para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis e economicamente viáveis. No setor sucroalcooleiro, a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, amplamente utilizada na fermentação alcoólica, é usualmente descartada após sucessivos ciclos fermentativos (Schlabitz *et al.*, 2024). Entretanto, essa biomassa residual apresenta composição rica em proteínas, β -glucanas, mananas, vitaminas e minerais, características que lhe conferem elevado potencial de valorização em diversos segmentos industriais, notadamente nos setores alimentício, farmacêutico e cosmético (Elghandour *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2023; Maurício *et al.*, 2024).

A viabilização do uso dessa biomassa depende da adoção de técnicas de estabilização que minimizem o teor de umidade e controlem a atividade de água, de modo a inibir reações deteriorativas e preservar as propriedades bioativas (Pinheiro *et al.*, 2020; Suhag; Kellil; Razem, 2024). Entre as tecnologias de desidratação disponíveis, a secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) tem se destacado pela eficiência na remoção de umidade e pela capacidade de preservar compostos sensíveis a altas temperaturas. Essa técnica combina aeração e aquecimento controlado, formando uma matriz porosa que favorece a difusão de vapor e resulta em pós de boa solubilidade, fluidez e estabilidade (Kumar *et al.*, 2023; Melo *et al.*, 2023; Thuy *et al.*, 2025).

Embora a secagem seja etapa determinante para a obtenção de produtos estáveis, o comportamento do material durante o armazenamento é igualmente crítico, uma vez que fatores como temperatura, umidade relativa e tipo de embalagem influenciam diretamente as propriedades físico-químicas e microbiológicas do pó (Choosuk *et al.*, 2022; Korese; Achaglinkame; Adzitey, 2022). A adsorção de umidade, em particular, pode desencadear fenômenos como aglomeração, escurecimento e degradação de compostos bioativos, comprometendo a qualidade e a funcionalidade do produto ao longo do tempo (Juarez-Enriquez *et al.*, 2022; Ruan *et al.*, 2022).

Nesse contexto, os estudos de estabilidade e vida útil (*shelf life*) assumem papel essencial para avaliar a conservação de matérias desidratadas sob diferentes condições ambientais. A análise cinética das variações de parâmetros de qualidade, como umidade, atividade de água, pH, cor, densidade, propriedades de escoamento, solubilidade e teor de proteínas e lipídios, permite descrever matematicamente o comportamento de degradação e estimar o tempo durante o qual o produto se mantém dentro de limites aceitáveis (Yin *et al.*, 2022; Zang *et al.*, 2024; Srisuk; Tudpor;

Jirasatid, 2025). Em especial, o emprego da equação de Arrhenius possibilita quantificar a influência da temperatura sobre a taxa de deterioração, fornecendo a energia de ativação associada aos processos degradativos e permitindo extrapolar o comportamento para condições de armazenamento reais (Liao *et al.*, 2024; Muniandy *et al.*, 2024).

A aplicação desses modelos em produtos em pó, como o de *Saccharomyces cerevisiae*, oferece subsídios para a seleção de embalagens adequadas, o estabelecimento de prazos de validade e o controle das condições ambientais de estocagem. Além disso, a utilização de ensaios acelerados em diferentes temperaturas possibilita reduzir o tempo experimental, sendo uma ferramenta amplamente empregada na predição de estabilidade de materiais desidratados (Choosuk *et al.*, 2022; Zang *et al.*, 2024).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo modelar a cinética de deterioração e estimar a vida útil do pó de *Saccharomyces cerevisiae* obtido por secagem em camada de espuma, armazenado sob diferentes temperaturas e tipos de embalagem.

2. Materiais e métodos

2.1. Obtenção das leveduras

A biomassa da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi coletada a partir do pé de cuba das dornas de fermentação utilizadas no processo de produção de cachaça, proveniente do Engenho Vitória, localizado no município de Alagoa Nova, Paraíba, Brasil (7° 01' 46.1" S; 35° 44' 17.7" W).

O material foi transferido para frascos plásticos devidamente higienizados e encaminhado ao Laboratório de Termodinâmica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), onde foi homogeneizado e armazenado a -18 °C até o uso, visando à preservação de suas propriedades iniciais e à minimização de alterações microbiológicas durante o transporte e estocagem.

2.2. Preparo do creme de levedura

Para a obtenção do creme de levedura, as amostras foram submetidas a centrifugação em equipamento (Novatecnica, modelo NT 812, Brasil), operando a 5000 rpm por 5 minutos. Esse procedimento permitiu a separação da amostra em duas frações distintas: uma fase concentrada, denominada creme de levedura, composta predominantemente por células de *Saccharomyces cerevisiae*, e um sobrenadante líquido, ambos empregados nas etapas subsequentes do estudo.

2.3. Secagem em camada de espuma

2.3.1. Obtenção da espuma

A espuma foi obtida a partir da combinação do creme de levedura com o respectivo sobrenadante, na proporção mássica de 1:2 (creme:sobrenadante), à qual se adicionou 10 % (m/m) do agente espumante Portogel® (ICE Ingredientes, Brasil). Em seguida, essa mistura passou por agitação vigorosa em bateadeira planetária (Arno, modelo Deluxe Inox SX-84, Brasil) durante 16 minutos, sob rotação constante, até atingir uma textura uniforme e estabilidade adequada ao processo de secagem.

A escolha dessa condição (10% de espumante; 60 °C) baseou-se em testes prévios das isotermas de adsorção e parâmetros termodinâmicos, que demonstraram maior estabilidade higroscópica e menor energia de sorção para o pó obtido sob essas condições, justificando seu uso na avaliação da estabilidade durante o armazenamento.

2.3.2. Procedimento de secagem

A espuma obtida foi distribuída uniformemente em bandejas de zinco galvanizado (1 mm de espessura, fundo removível, sem bordas laterais), previamente taradas, formando uma camada de aproximadamente 5 mm.

O processo de secagem ocorreu em estufa de circulação e renovação de ar (Solab, modelo SL-102, Brasil) mantida a 60 °C, até que a variação de massa entre pesagens sucessivas fosse inferior a 0,01 g, indicando o equilíbrio de umidade (Morgan *et al.*, 1961).

Concluída a secagem, o material foi transferido para embalagens plásticas de polietileno de baixa densidade (PEBD), seladas hermeticamente e envoltas em camada de papel-alumínio, com o objetivo de protegê-lo da luz e da umidade. As amostras permaneceram acondicionadas em dessecador sob temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa de 57 ± 3 %, até o início dos ensaios de estabilidade.

O pó obtido sob essas condições serviu como amostra-base para os experimentos de estabilidade e determinação da vida útil (*shelf life*), conduzidos sob diferentes temperaturas e tipos de embalagem.

2.4. Condições de embalagem e armazenamento

O pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma, foi acondicionado em três tipos de embalagens com diferentes propriedades de barreira: polietileno laminado de alumínio (PLA) com 100 µm de espessura, politereftalato de etileno e polietileno (PET + PE) com 90 µm e polietileno de alta densidade (PEAD) com gramatura de 30 g para frascos de 60 mL (Pires Embalagens, São Paulo, Brasil). A escolha desses materiais baseou-se em estudos que demonstram a influência da permeabilidade ao vapor d'água e ao oxigênio sobre a estabilidade de

produtos higroscópicos (Forsido *et al.*, 2021; Korese; Achaglinkame; Adzitey, 2022). Cada embalagem continha aproximadamente 20 g de produto, previamente homogeneizado e selado sob condições controladas de temperatura e umidade, com o objetivo de minimizar a absorção de vapor d'água antes do início do armazenamento.

O estudo foi conduzido durante 90 dias sob duas condições experimentais: ambiente (26 ± 2 °C; 75 ± 2 % UR) e acelerada (40 ± 2 °C; 75 ± 2 % UR), conforme metodologias de estabilidade acelerada amplamente aplicadas em produtos desidratados (Korese; Achaglinkame; Chikpah, 2021; El-Mesery *et al.*, 2024). As amostras destinadas à condição ambiente foram mantidas em prateleiras protegidas da luz solar direta, enquanto aquelas submetidas à condição acelerada permaneceram em dessecadores instalados em estufas biológicas calibradas para as temperaturas requeridas. A umidade relativa interna dos dessecadores foi controlada por meio de solução salina saturada de cloreto de sódio (NaCl), mantendo-se em 75 ± 2 % UR, conforme descrito por Kamdi, Sivaranjani e Rao (2025).

Com o objetivo de avaliar a estabilidade físico-química e microbiológica do pó de *Saccharomyces cerevisiae* durante o armazenamento, foram monitorados parâmetros indicativos de qualidade em intervalos previamente definidos. As análises de atividade de água, teor de umidade, pH, acidez total titulável e índice de solubilidade em água foram realizadas quinzenalmente, por se tratarem de variáveis mais sensíveis às oscilações de umidade e temperatura. As determinações de proteínas, lipídios, densidade aparente, densidade compactada, propriedades de escoamento e cor foram conduzidas a cada 30 dias, considerando sua menor taxa de variação ao longo do tempo. A avaliação microbiológica foi executada no início (tempo 0) e ao término do período de armazenamento, conforme os critérios estabelecidos pela RDC nº 907/2024, que dispõe sobre os critérios microbiológicos aplicáveis a produtos cosméticos (Brasil, 2024).

2.5. Análises de qualidade

Todas as análises de qualidade foram realizadas em triplicata, e os resultados obtidos foram expressos como média $\pm$ desvio-padrão.

2.5.1. Atividade de água

A atividade de água (a_w) foi obtida por leitura direta em um medidor de atividade de água (Novasina®, modelo LabMaster-aw 1119971, Suíça), mantido à temperatura de 30°C.

2.5.2. Teor de umidade

O teor de umidade ($X_{b.u.}$) foi avaliado conforme metodologia do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Aproximadamente 1,0 g da amostra foi pesada em cadinho de alumínio e submetida à

secagem em estufa (Lucadema, modelo LUCA-80/64, Brasil) a 105 °C por 24 h. Após o resfriamento em dessecador, registrou-se o peso final. O teor de umidade foi calculado por diferença de massa (base úmida), conforme a Eq. 1.

$$X_{b.u.} = \frac{(massa\ inicial - massa\ do\ sólido\ seco)}{massa\ inicial} \times 100 \quad (1)$$

2.5.3. pH

O pH foi medido pelo método potenciométrico, conforme adaptação da metodologia do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). Cerca de 1,0 g da amostra foi dispersa em 10 mL de água destilada e agitada em agitador magnético por 5 min para homogeneização. Após a agitação, o líquido foi filtrado e a leitura do pH realizada em pHmetro de bancada (MS Tecnoyon, modelo mPA-210, Brasil), previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0.

2.5.4 Acidez total titulável

A acidez total titulável (ATT) foi determinada por titulação, conforme o método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008), com modificações. Inicialmente, 1,0 g da amostra foi dispersa em 50 mL de água destilada. Após a agitação para homogeneização, foram adicionadas 4 gotas do indicador fenolftaleína. A mistura foi então titulada com uma solução padrão de hidróxido de sódio 0,1M até o ponto de viragem, detectado por potenciometria (pH entre 8,2 e 8,4). O pH de viragem foi monitorado utilizando um pHmetro (MS Tecnoyon, modelo mPA-210, Brasil), previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0. O valor da ATT foi calculado com base na Eq. 2 e expresso em gramas de ácido cítrico por 100 g de amostra.

$$ATT(g/100g) = \frac{V_{NaOH} \times f_{c_{NaOH}} \times M_{NaOH} \times MM_{C_6H_8O_7}}{10 \times m_{amostra} \times 3} \quad (2)$$

Onde V_{NaOH} é o volume de NaOH gasto na titulação (mL), $f_{c_{NaOH}}$ representa o fator de correção da solução de NaOH, M_{NaOH} corresponde à molaridade da solução de NaOH (mol/L), $MM_{C_6H_8O_7}$ é a massa molecular do ácido cítrico (g/mol), e $m_{amostra}$ é a massa da amostra utilizada no ensaio (g).

2.5.5 Índice de solubilidade em água

O índice de solubilidade em água (ISA) foi determinado seguindo a metodologia adaptada de Cano-Chauca *et al.* (2005). O procedimento iniciou com a pesagem de 0,5 g da amostra em pó e sua adição a um tubo Falcon com 50 mL de água destilada. A solução resultante foi agitada vigorosamente com o auxílio de um vórtex por 1 minuto e, em seguida, centrifugada a 4500 rpm por 5 minutos em uma centrífuga de bancada (Novatecnica®, modelo NT 812, Brasil). Após a

centrifugação, 12,5 mL do sobrenadante foram retirados e transferidos para placas de Petri previamente taradas. Estas placas foram levadas a uma estufa de esterilização e secagem (Lucadema, modelo LUCA-80/64, Brasil) na temperatura de 105 °C, até a completa evaporação do líquido. Em seguida, as placas foram resfriadas em dessecador por 30 minutos e, posteriormente, pesadas. O ISA foi calculado utilizando a Eq. 3.

$$ISA (\%) = \frac{(m_{\text{residual}} - m_{\text{tara}}) \times (V_{\text{solução}})}{V_{\text{aliquota}} \times m_{\text{amostra}}} \times 100 \quad (3)$$

Onde m_{residual} é a massa residual seca obtida após a evaporação (g), m_{tara} representa a massa da placa de Petri vazia (g), $V_{\text{solução}}$ corresponde ao volume total da solução inicial de amostra (mL), V_{aliquota} é o volume da alíquota retirada para secagem, e m_{amostra} é a massa da amostra utilizada no ensaio (g).

2.5.6. Proteínas

O teor de proteínas foi quantificado pelo método Kjeldahl, baseado na determinação indireta do nitrogênio total (IAL, 2008). O procedimento foi conduzido em três etapas principais: digestão, destilação e titulação.

Na digestão, a amostra foi tratada com ácido sulfúrico concentrado e mistura catalítica em tubos de Kjeldahl, sendo o conjunto aquecido gradualmente de 50 °C até 350 °C em um bloco digestor (Solab, modelo SL-25/40R, Brasil) até que o precipitado da solução adquirisse a coloração cinza. Em seguida, o material digerido foi submetido à destilação em um destilador de nitrogênio (Solab, modelo SL-74, Brasil) utilizando solução de hidróxido de sódio a 40%, promovendo a liberação da amônia, que foi capturada em solução de ácido bórico a 4% contendo indicadores mistos (verde de bromocresol e vermelho de metila). Por fim, procedeu-se à titulação com solução de ácido clorídrico 0,1 M até a viragem do indicador (mudança de cor de verde-azulado para rosa). O teor de proteínas foi calculado conforme a Eq. 4.

$$P(\%) = \left(\frac{V_{\text{HCl}} \times f_{\text{c}_{\text{HCl}}} \times 0,014 \times 6,25}{m_{\text{amostra}}} \right) \quad (4)$$

Onde V_{HCl} corresponde ao volume de solução de HCl gasto na titulação (mL), $f_{\text{c}_{\text{HCl}}}$ representa o fator de correção da solução de HCl, e m_{amostra} é a massa da amostra utilizada no ensaio (g).

2.5.7. Lipídios

A fração lipídica foi determinada segundo o método descrito por Folch *et al.* (1957), com adaptações. Aproximadamente 1,0 g da amostra foi submetida à extração de lipídios utilizando uma mistura de clorofórmio e metanol (2:1, v/v). A solução obtida foi filtrada e, ao filtrado, adicionou-se

20% do seu volume de solução de sulfato de sódio a 1,5% (m/v), promovendo a separação das fases.

A fase superior foi descartada, enquanto 5 mL da fase inferior foram transferidos para um béquer previamente tarado. Em seguida, o béquer foi levado à estufa de esterilização e secagem (Lucadema, modelo LUCA-80/64, Brasil) a 90 °C, até a completa evaporação do solvente. Após a secagem, o béquer contendo o resíduo lipídico foi pesado, e o teor de lipídios foi calculado conforme a Eq. 5.

$$L (\%) = \frac{V_{\text{fase inferior}} \times (m_{\text{final}} - m_{\text{béquer}})}{V_{\text{aliquota}} \times m_{\text{amostra}}} \times 100 \quad (5)$$

Onde $V_{\text{fase inferior}}$ corresponde ao volume total da fase inferior obtida (mL), m_{final} é a massa final do béquer com o resíduo lipídico seco (g), $m_{\text{béquer}}$ é massa do béquer vazio, V_{aliquota} representa o volume da alíquota retirada para secagem (mL) e m_{amostra} é a massa da amostra utilizada no ensaio (g).

2.5.8. Densidade aparente e densidade compactada

A densidade aparente (ρ_a) e a densidade compactada (ρ_c) das amostras foram determinadas conforme o método descrito por Arepally *et al.* (2020), com adaptações. Cerca de 1 g de pó foi transferido para uma proveta de 10 mL, e o volume inicial foi registrado sem qualquer compactação. A densidade aparente foi então calculada pela razão entre a massa e o volume ocupado pelo pó (Eq. 6).

Em seguida, a mesma proveta contendo a amostra foi submetida a 100 batidas suaves sobre uma superfície plana, promovendo o adensamento do material. Após esse procedimento, o volume compactado foi medido, e a densidade compactada foi calculada de acordo com a Eq. 7.

$$\rho_a (g/mL) = \frac{\text{massa da amostra}}{\text{Volume aparente}} \quad (6)$$

$$\rho_c (g/mL) = \frac{\text{massa da amostra}}{\text{Volume compactado}} \quad (7)$$

2.5.9. Propriedades de escoamento

As propriedades de escoamento do pó, Índice de Carr e Razão de Hausner, foram utilizadas para determinar a coesividade e a capacidade de escoamento das amostras, conforme o método de Arepally *et al.* (2020). O Índice de Carr e a Razão de Hausner foram calculados utilizando as Eq. 8 e Eq. 9, respectivamente:

$$\text{Índice de Carr} (\%) = \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \quad (8)$$

$$\text{Razão de Hausner} (\%) = \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad (9)$$

Onde ρ_a é a densidade aparente (g/mL) e ρ_c representa a densidade compactada (g/mL).

2.5.10. Cor

A cor foi medida através de leitura direta da amostra em um colorímetro portátil (Konica Minolta, CR-400, Japão) para obter os valores de L^* , a^* e b^* , em que L representa a luminosidade, a^* define a transição da cor verde ($-a^*$) para a cor vermelha ($+a^*$) e b^* representa a transição da cor azul ($-b^*$) para a cor amarela ($+b^*$). A variação total de cor (ΔE) foi calculada utilizando a Eq. 10 (Korese; Achaglinkame; Adzitey, 2022).

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_t^*)^2 + (a_0^* - a_t^*)^2 + (b_0^* - b_t^*)^2} \quad (10)$$

Onde L_0^* , a_0^* e b_0^* são os valores iniciais de L^* , a^* e b^* das amostras, respectivamente, e L_t^* , a_t^* e b_t^* são os valores de L^* , a^* e b^* medidos em um tempo específico de armazenamento.

2.5.11. Análise microbiológica

A avaliação microbiológica do pó de *Saccharomyces cerevisiae* foi conduzida no início e ao término do período de armazenamento, com o objetivo de verificar a estabilidade microbiológica do produto e sua conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 907/2024 da ANVISA, que dispõe sobre os critérios microbiológicos aplicáveis a produtos cosméticos (Brasil, 2024).

Foram avaliados os seguintes grupos de microrganismos, conforme os requisitos previstos na legislação sanitária vigente: bactérias mesófilas aeróbias totais, *Staphylococcus aureus* e coliformes totais.

As análises foram realizadas pelo método de diluição seriada, conforme descrito por Korese, Achaglinkame e Adzitey (2022) e Jebri *et al.* (2025), com adaptações. Utilizou-se água peptonada estéril a 0,1% como diluente. Para o preparo das amostras, 1,0 g do material foi homogeneizado assepticamente em 9,0 mL do diluente, constituindo a diluição inicial (10^{-1}). As diluições subsequentes (10^{-2} e 10^{-3}) foram obtidas por transferência sequencial de 1,0 mL da diluição anterior para 9,0 mL de diluente estéril, mantendo-se rigorosas condições assépticas durante todo o procedimento.

A semeadura foi realizada pela técnica de espalhamento em superfície (*spread plate*), inoculando-se 0,1 mL de cada diluição sobre a superfície solidificada dos meios de cultura, seguida da dispersão com alça de *Drigalski* sob ambiente controlado.

A contagem de bactérias mesófilas aeróbias totais foi realizada em Ágar Padrão para Contagem (Plate Count Agar – PCA), com incubação a 35 ± 1 °C por 48 ± 2 h. A quantificação de coliformes totais foi conduzida em Ágar Vermelho Violeta Bile (Violet Red Bile Agar – VRBA),

incubado a 35 ± 1 °C por 24 h. A pesquisa de *Staphylococcus aureus* foi efetuada em Ágar Baird-Parker suplementado com emulsão de gema de ovo e solução de telurito de potássio, com incubação a 37 ± 1 °C por 48 h.

Os resultados foram expressos em unidades formadoras de colônia por grama de amostra (UFC·g⁻¹) e comparados aos limites de aceitação definidos pela RDC nº 907/2024 da ANVISA, a fim de determinar a conformidade microbiológica e a estabilidade do produto ao longo do armazenamento.

2.6. Análise estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise estatística, com base em um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, considerando os fatores: tipo de embalagem (PEAD, PLA e PET + PE), temperatura de armazenamento (ambiente e acelerada) e tempo de armazenamento, cujos intervalos variaram conforme o parâmetro avaliado.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), a fim de verificar os efeitos principais e as interações entre os fatores estudados. Quando observadas diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade, avaliando-se as variações entre os tipos de embalagem e os tempos de armazenamento.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o *software* Statistica 5 (StatSoft Inc., Tulsa, USA). Os resultados foram classificados segundo o nível de significância: $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), e não significativo (NS) (Kamble *et al.*, 2020; Madhu *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2022).

2.7. Modelagem para predição da vida útil

A predição da vida útil do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi conduzida com base na variação de parâmetros físico-químicos relacionados à estabilidade do produto ao longo do armazenamento. Foram selecionados para a modelagem cinética aqueles que apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) em função do tempo e da temperatura de armazenamento, conforme os critérios estabelecidos por Kamble *et al.* (2020), Yin *et al.* (2022) e Gül *et al.* (2025).

2.7.1. Modelagem cinética

A perda da qualidade do produto durante o armazenamento foi avaliada por meio de modelagem cinética, considerando que as variações dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos podem ser descritas por reações de ordem zero (Eq. 11) ou primeira ordem (Eq.

12), conforme amplamente relatado em estudos de estabilidade (Kamble *et al.*, 2020; Gül *et al.*, 2025; Xing *et al.*, 2025).

$$A = A_0 \pm kt \quad (11)$$

$$A = A_0 e^{\pm kt} \quad (12)$$

Onde A é o valor do parâmetro indicador da qualidade, A_0 é o valor inicial no tempo zero, t é o tempo de armazenamento e k é a constante da taxa de degradação. O sinal $\pm$ indica o sentido da variação do parâmetro durante o armazenamento.

A determinação da ordem de reação foi realizada por regressão linear, da qual se obteve o coeficiente de determinação (R^2). O erro quadrático médio (RMSE) e o erro percentual médio absoluto (P%) foram calculados conforme as Eq. 13 e 14, expressando o desvio absoluto e relativo entre os valores experimentais e previstos. A escolha do modelo cinético considerou o desempenho conjunto desses parâmetros, adotando-se como critérios o menor RMSE, o menor P% e o maior R^2 (Liao *et al.*, 2024; Xing *et al.*, 2025).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_e - X_p)^2} \quad (13)$$

$$P = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_e - X_p}{X_e} \right| \quad (14)$$

Onde X_e e X_p correspondem, respectivamente, aos valores experimentais e preditos pelo modelo cinético e N representa o número de observações utilizadas no ajuste.

2.7.2. Modelo de Arrhenius

A dependência da constante de taxa de degradação (k) em relação à temperatura (T) foi determinada utilizando o modelo de Arrhenius, conforme descrito na Eq. 15 (Xing *et al.*, 2025).

$$\ln(k) = \ln(k_0) - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (15)$$

Onde k é a constante da taxa de degradação na temperatura T , k_0 é a constante da taxa de degradação na temperatura de referência, E_a é a energia de ativação (kJ/mol), R é a constante universal dos gases (8,3144 J/mol·K), T é a temperatura absoluta (K) e T_{ref} é a temperatura de referência (K).

Os valores de k obtidos para cada condição foram utilizados para determinar a energia de ativação (E_a) a partir da regressão linear entre $\ln(k)$ e $1/T$, permitindo estimar a influência da temperatura sobre a velocidade de degradação e, posteriormente, sobre a vida útil do produto.

2.7.3. Predição da vida útil

A predição da vida útil do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* foi realizada por meio da integração entre os modelos cinéticos ajustados e a equação de Arrhenius, possibilitando estimar o tempo necessário para que os parâmetros de qualidade atingissem o limite de aceitabilidade previamente estabelecido (Arepally *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2022). Para os parâmetros que apresentaram melhor ajuste ao modelo de ordem zero, o tempo estimado de vida útil foi calculado de acordo com a Eq. 16.

$$t = \frac{A - A_0}{k_0 e^{-E_a/RT}} \quad (16)$$

Onde t é o tempo de vida útil (dias), A é o valor limite do parâmetro da qualidade adotado como fim da vida útil, A_0 é o valor inicial, k_0 é o fator pré-exponencial obtido a partir da equação de Arrhenius, E_a é a energia de ativação ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), R é a constante dos gases ($8,3144 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e T é a temperatura absoluta (K).

Quando as mudanças na qualidade do produto seguiram o comportamento descrito pelo modelo exponencial de primeira ordem, a estimativa da vida útil foi calculada conforme a Eq. 17.

$$t = \frac{\ln(A/A_0)}{k_0 e^{-E_a/RT}} \quad (17)$$

Nesse caso, a relação logarítmica expressa a variação percentual do parâmetro em função do tempo, refletindo o comportamento exponencial da deterioração (Yin *et al.*, 2022; Xing *et al.*, 2025). Os valores críticos (A) foram definidos com base em critérios de aceitabilidade reportados na literatura. Dessa forma, foi possível estimar o tempo de armazenamento no qual o produto mantém suas características físico-químicas dentro dos limites aceitáveis de estabilidade e segurança.

3. Resultados e discussão

3.1. Influência da embalagem, tempo, temperatura e suas interações nas características de qualidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae*

Na Tabela 1 é apresentada a análise de variância (ANOVA) multifatorial, com os valores de F e seus respectivos níveis de significância para os parâmetros de qualidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae*, em função do tempo (D) e temperatura de armazenamento (T) e do tipo de embalagem (E), bem como de suas interações.

Tabela 1

Análise de variância (ANOVA) dos efeitos da embalagem, tempo e temperatura de armazenamento e suas interações sobre os parâmetros de qualidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae*.

Características de qualidade	D	E	T	D × E	D × T	E × T	D × E × T
Atividade de água	627,1**	48,4**	125,4**	5,0**	7,0**	1,3 ^{NS}	1,2 ^{NS}
Teor de umidade	2296,8**	927,3**	31,4**	66,6**	990,1**	11,6**	29,4**
pH	43**	18**	15**	1 ^{NS}	3**	4*	0 ^{NS}
Acidez total titulável	18,7**	5,3**	8,6**	0,3 ^{NS}	0,9 ^{NS}	2,0 ^{NS}	0,2 ^{NS}
Índice de solubilidade em água	103,3**	31,1**	26,5**	2,9**	3,3**	0,7 ^{NS}	0,7 ^{NS}
Proteínas	6,9**	1,9 ^{NS}	5,9*	0,4 ^{NS}	1,0 ^{NS}	0,7 ^{NS}	0,2 ^{NS}
Lipídios	5,0**	0,6 ^{NS}	1,1 ^{NS}	0,1 ^{NS}	0,1 ^{NS}	0,0 ^{NS}	0,1 ^{NS}
Densidade aparente	17,5**	1,3 ^{NS}	28,2**	0,4 ^{NS}	6,6**	0,0 ^{NS}	0,0 ^{NS}
Densidade compactada	4,6**	1,0 ^{NS}	0,0 ^{NS}	0,4 ^{NS}	0,5 ^{NS}	0,2 ^{NS}	0,1 ^{NS}
Índice de Carr	17,4**	3,2 ^{NS}	6,7*	0,5 ^{NS}	2,7 ^{NS}	0,9 ^{NS}	0,4 ^{NS}
Razão de Hausner	17,3**	2,9 ^{NS}	6,5*	0,5 ^{NS}	2,6 ^{NS}	0,8 ^{NS}	0,4 ^{NS}
L*	317,4**	40,3**	182,9**	6,7**	51,2**	14,2**	3,6**
a*	4,3**	1,7 ^{NS}	2,7 ^{NS}	0,4 ^{NS}	0,8 ^{NS}	1,5 ^{NS}	1,5 ^{NS}
b*	27,4**	19,7**	17,7**	4,5**	5,3**	3,2 ^{NS}	0,9 ^{NS}
Variação total de cor (ΔE)	84,4**	9,3**	59,4**	2,6*	16,3**	6,2**	1,4 ^{NS}
Microorganismos mesófilos totais aeróbios	3,3 ^{NS}	0,5 ^{NS}	1,0 ^{NS}	0,53 ^{NS}	1,0 ^{NS}	0,1 ^{NS}	0,1 ^{NS}

D – dias; E – embalagem; T – temperatura.

NS: não significativo ($p > 0,05$); *: significativo ($p < 0,05$); **: altamente significativo ($p < 0,01$).

De modo geral, conforme demonstrado na Tabela 1, observou-se que o tempo de armazenamento (D) foi o fator que exerceu a maior influência significativa ($p < 0,01$) sobre a maioria das variáveis analisadas, especialmente sobre a atividade de água, teor de umidade, pH, acidez total titulável, índice de solubilidade em água, proteínas, lipídios e parâmetros de cor,

apresentando os maiores valores de F entre os fatores avaliados. Resultados semelhantes foram relatados por Madhu *et al.* (2021) e El-Mesery *et al.* (2024), que identificaram o tempo como principal fator de degradação em pós de alho e tomates frescos armazenados, respectivamente. Essas alterações foram associadas a processos de adsorção de umidade e a reações químicas graduais que comprometem a estabilidade do material ao longo do tempo.

A temperatura de armazenamento (T) também exerceu efeito significativo ($p < 0,05$) sobre diversas variáveis, com valores de F mais elevados para a atividade de água, teor de umidade e variação total de cor (ΔE). O aumento da temperatura acelerou reações físico-químicas capazes de comprometer a estabilidade do pó, comportamento igualmente descrito por Chaturvedi e Chakraborty (2024) e Karwacka *et al.* (2024).

O tipo de embalagem (E), por sua vez, interferiu principalmente nos parâmetros relacionados ao teor de água (atividade de água e teor de umidade), índice de solubilidade em água, pH e acidez total titulável, com valores de F inferiores aos obtidos para tempo e temperatura, mas ainda significativos ($p < 0,05$). Esses resultados evidenciam que a eficiência da barreira ao vapor d'água é determinante para retardar variações indesejáveis e preservar as propriedades físico-químicas do pó durante o armazenamento, o que corrobora as observações de Suryatapa *et al.* (2023), que destacaram o papel da permeabilidade do material de embalagem na conservação de pepinos orgânicos.

As interações entre os fatores também apresentaram significância para algumas variáveis, sobretudo para a atividade de água ($D \times E$ e $D \times T$), teor de umidade ($D \times E$ e $D \times T$) e variação total de cor (ΔE), indicando que as alterações não ocorreram de forma isolada, mas resultaram da ação combinada entre o tempo e a temperatura de armazenamento e as propriedades de barreira das embalagens.

Por outro lado, as propriedades físicas, como densidade aparente, densidade compactada e características de fluxo (índice de Carr e razão de Hausner), apresentaram variações discretas, mantendo-se relativamente estáveis ao longo do período experimental. De modo semelhante, a análise estatística dos microrganismos mesófilos totais aeróbios não revelou efeito significativo ($p > 0,05$) para os fatores avaliados nem para suas interações, evidenciando a estabilidade microbiológica do produto durante o armazenamento e indicando a eficiência das condições de processamento e conservação na prevenção do crescimento microbiano.

Portanto, o tempo de armazenamento foi o principal fator responsável pelas alterações na qualidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae*, seguido pela temperatura e pelo tipo de embalagem. O controle adequado das condições de estocagem mostrou-se essencial para a manutenção da integridade físico-química e funcional do produto. A seguir, são discutidas as variações individuais de cada parâmetro ao longo do período de armazenamento.

3.2. Análises de qualidade

3.2.1. Atividade de água

Na Tabela 2 é mostrada a variação da atividade de água (a_w) do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* ao longo do tempo de armazenamento, em função do tipo de embalagem utilizado (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem avaliadas (ambiente e acelerada).

Tabela 2

Variação da atividade de água (a_w) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	0,325 ± 0,021 ^a	0,325 ± 0,021 ^a	0,325 ± 0,021 ^a
	15	0,367 ± 0,002 ^b	0,365 ± 0,003 ^b	0,386 ± 0,002 ^{bc}
	30	0,394 ± 0,004 ^{cd}	0,403 ± 0,002 ^{cde}	0,412 ± 0,005 ^{cdef}
	45	0,405 ± 0,002 ^{cde}	0,405 ± 0,003 ^{cde}	0,417 ± 0,005 ^{defg}
	60	0,412 ± 0,005 ^{cdef}	0,435 ± 0,004 ^{fghi}	0,437 ± 0,004 ^{fghi}
	75	0,425 ± 0,004 ^{fgh}	0,444 ± 0,007 ^{hi}	0,455 ± 0,004 ⁱ
	90	0,440 ± 0,003 ^{ghi}	0,453 ± 0,003 ⁱ	0,483 ± 0,001 ^j
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	0,325 ± 0,021 ^a	0,325 ± 0,021 ^a	0,325 ± 0,021 ^a
	15	0,383 ± 0,002 ^b	0,366 ± 0,003 ^b	0,392 ± 0,004 ^{bc}
	30	0,411 ± 0,002 ^{cd}	0,415 ± 0,003 ^{cd}	0,424 ± 0,004 ^{de}
	45	0,426 ± 0,003 ^{de}	0,430 ± 0,002 ^{def}	0,426 ± 0,004 ^{de}
	60	0,436 ± 0,002 ^{def}	0,455 ± 0,003 ^{fgh}	0,468 ± 0,002 ^{ghi}
	75	0,447 ± 0,005 ^{efg}	0,472 ± 0,001 ^{hij}	0,485 ± 0,004 ^{ij}
	90	0,481 ± 0,002 ^{hij}	0,484 ± 0,003 ^{ij}	0,495 ± 0,004 ^j

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A atividade de água (a_w) é um parâmetro crítico para a estabilidade físico-química e microbiológica de produtos higroscópicos, pois está diretamente associada às reações de deterioração que determinam o limite da vida útil (Ciurzyńska *et al.*, 2025; Srisuk; Tudpor; Jirasatid, 2025). Conforme apresentado na Tabela 2, em ambas as condições de armazenamento verificou-se um incremento significativo ($p < 0,05$) nos valores de a_w ao longo do tempo, com valor inicial médio de $0,325 \pm 0,021$. Esse comportamento é característico de materiais desidratados, nos

quais ocorre migração de vapor d'água do ambiente para o interior da embalagem, resultando em aumento gradual da pressão de vapor no sistema (Kamble *et al.*, 2020; Zardetto e Barbanti, 2020).

Na condição ambiente, observou-se diferença significativa entre as embalagens quanto à eficiência de barreira ao vapor d'água. O material PET+PE apresentou o maior valor final de a_w ($0,483 \pm 0,001$), evidenciando maior permeabilidade à umidade e, consequentemente, menor capacidade de proteção. Por outro lado, o PEAD apresentou o menor incremento ($0,440 \pm 0,003$), seguido do PLA ($0,453 \pm 0,003$). O melhor desempenho da embalagem PEAD pode ser atribuído à sua estrutura semicristalina, que reduz a mobilidade molecular e restringe a difusão de vapor d'água através da matriz polimérica. Essa tendência está em concordância com os resultados de Deng *et al.* (2024), que relataram menor taxa de permeação de vapor em polímeros de maior cristalinidade durante o armazenamento de bananas.

Sob condição acelerada, a elevação da temperatura intensificou a transferência de vapor para o interior das embalagens, resultando em valores mais elevados de a_w de PET+PE ($0,495 \pm 0,004$), PLA ($0,484 \pm 0,003$) e PEAD ($0,481 \pm 0,002$). O aumento de a_w sob condições de estresse térmico é amplamente observado na literatura e está associado ao incremento da mobilidade molecular e à aceleração das reações de adsorção de umidade (Thakur e Nanda, 2024; Giannakourou *et al.*, 2025).

O aumento de a_w está diretamente associado à interação entre o material de embalagem e o ambiente, refletindo a eficiência da barreira ao vapor d'água e a afinidade do pó por moléculas de água (Kamble *et al.*, 2020; Srisuk, Tudpor e Jirasatid, 2025). Zang *et al.* (2024) observaram comportamento semelhante em pós de ovo acondicionados em filmes de menor barreira, nos quais a adsorção de umidade ocorreu de forma gradual ao longo do armazenamento.

Apesar das variações observadas, todas as amostras mantiveram valores de a_w inferiores a 0,60, limite crítico para o crescimento microbiano (Bashir *et al.*, 2022; Zang *et al.*, 2024). Assim, o pó de *Saccharomyces cerevisiae* manteve-se em faixa segura de estabilidade higroscópica, mesmo sob condição acelerada, garantindo restrição das reações químicas e microbiológicas associadas à umidade.

3.2.2. Teor de umidade

Na Tabela 3 é apresentada a variação do teor de umidade ($X_{b.u.}$) do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* ao longo do tempo de armazenamento, em função do tipo de embalagem utilizado (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem avaliadas (ambiente e acelerada).

Tabela 3

Variação do teor de umidade ($X_{b,u.}$) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	3,090 ± 0,110 ^a	3,090 ± 0,110 ^a	3,090 ± 0,110 ^{aa}
	15	3,444 ± 0,001 ^b	3,610 ± 0,053 ^b	3,908 ± 0,030 ^c
	30	4,284 ± 0,088 ^d	4,466 ± 0,150 ^d	4,472 ± 0,005 ^d
	45	4,382 ± 0,162 ^d	4,498 ± 0,053 ^d	4,562 ± 0,113 ^{de}
	60	4,811 ± 0,153 ^e	5,269 ± 0,017 ^f	5,611 ± 0,085 ^g
	75	5,152 ± 0,049 ^f	5,759 ± 0,077 ^{gh}	5,869 ± 0,055 ^{gh}
	90	5,173 ± 0,025 ^f	5,913 ± 0,065 ^{hi}	6,170 ± 0,089 ⁱ
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	3,090 ± 0,110 ^a	3,090 ± 0,110 ^{aa}	3,090 ± 0,110 ^{aa}
	15	3,616 ± 0,083 ^b	3,739 ± 0,049 ^{bc}	4,300 ± 0,024 ^c
	30	3,948 ± 0,022 ^{cd}	4,989 ± 0,006 ^f	5,832 ± 0,036 ^{jk}
	45	4,167 ± 0,131 ^{de}	5,356 ± 0,028 ^{gh}	5,334 ± 0,060 ^g
	60	4,936 ± 0,049 ^f	5,946 ± 0,086 ^{jk}	6,005 ± 0,015 ^k
	75	5,586 ± 0,072 ^{hi}	5,978 ± 0,021 ^{jk}	6,605 ± 0,116 ⁱ
	90	5,746 ± 0,008 ^{ij}	6,502 ± 0,123 ^l	7,526 ± 0,120 ^m

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Conforme apresentado na Tabela 3, houve aumento significativo do teor de umidade ($X_{b,u.}$) ao longo do armazenamento, independentemente da condição ou do tipo de embalagem. Esse comportamento confirma o caráter higroscópico do pó de *Saccharomyces cerevisiae*, típico de materiais desidratados que adsorvem vapor d'água até atingir o equilíbrio com a umidade relativa do ambiente (Forsido *et al.*, 2021; Stępień e Grzyb, 2023).

Na condição ambiente, com valor inicial médio de $X_{b,u.}$ igual a $3,09 \pm 0,11$ %, observou-se aumento significativo já aos 15 dias, especialmente nas amostras acondicionadas em PET+PE ($3,91 \pm 0,03$ %), que diferiram da PEAD ($3,44 \pm 0,00$ %) e PLA ($3,61 \pm 0,05$ %) ($p < 0,05$). Aos 90 dias, a umidade atingiu $6,17 \pm 0,09$ % em PET+PE, $5,91 \pm 0,07$ % em PLA e $5,17 \pm 0,03$ % em PEAD. O desempenho superior do PEAD indica maior resistência à difusão de vapor d'água, o que também foi verificado nos valores de atividade de água. Karwacka *et al.* (2024) relataram tendência semelhante em pós de bagaço de groselha preta armazenados em diferentes filmes, destacando que materiais com maior cristalinidade apresentam menor permeabilidade e, consequentemente, maior estabilidade durante o armazenamento.

Sob condição acelerada, os valores de $X_{b,u}$ foram superiores em todos os tempos de armazenamento, evidenciando o efeito da temperatura sobre a adsorção de umidade. Aos 15 dias, as amostras acondicionadas em PET+PE apresentaram $4,30 \pm 0,02$ %, enquanto PLA e PEAD registraram $3,74 \pm 0,05$ % e $3,62 \pm 0,08$ %, respectivamente. Ao final de 90 dias, os teores atingiram $7,53 \pm 0,12$ % em PET+PE, $6,50 \pm 0,12$ % em PLA e $5,75 \pm 0,01$ % em PEAD. O aumento da temperatura intensifica as interações água–matriz e a mobilidade molecular, acelerando o processo de adsorção (Aktaş, 2022).

O aumento da umidade compromete a estabilidade físico-química do pó, favorecendo a aglomeração, a perda de fluidez e a ocorrência de reações oxidativas e hidrolíticas (Juárez-Enríquez *et al.*, 2023; Fikry *et al.*, 2025). Portanto, o controle rigoroso do teor de umidade, aliado à utilização de embalagens de baixa permeabilidade, é essencial para preservar a integridade físico-química e microbiológica do produto ao longo do armazenamento.

3.2.3. pH

A evolução do pH do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* ao longo do tempo de armazenamento, em função do tipo de embalagem utilizado (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem avaliadas (ambiente e acelerada) está representada na Tabela 4.

Tabela 4

Variação do pH do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	$5,05 \pm 0,04^c$	$5,05 \pm 0,04^c$	$5,04 \pm 0,04^c$
	15	$5,00 \pm 0,05^{bc}$	$5,02 \pm 0,05^c$	$4,96 \pm 0,06^{abc}$
	30	$5,00 \pm 0,02^{bc}$	$5,00 \pm 0,05^{bc}$	$4,94 \pm 0,04^{abc}$
	45	$4,97 \pm 0,02^{bc}$	$5,01 \pm 0,07^c$	$4,91 \pm 0,04^{abc}$
	60	$4,97 \pm 0,08^{bc}$	$4,99 \pm 0,02^{bc}$	$4,89 \pm 0,03^{abc}$
	75	$4,92 \pm 0,07^{abc}$	$4,94 \pm 0,13^{abc}$	$4,83 \pm 0,08^{ab}$
	90	$4,90 \pm 0,03^{abc}$	$4,92 \pm 0,04^{abc}$	$4,79 \pm 0,06^a$
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	$5,05 \pm 0,04^e$	$5,05 \pm 0,04^e$	$5,05 \pm 0,04^e$
	15	$5,02 \pm 0,03^{de}$	$5,00 \pm 0,04^{cde}$	$5,00 \pm 0,03^{cde}$
	30	$5,00 \pm 0,03^{cde}$	$4,99 \pm 0,02^{cde}$	$4,95 \pm 0,04^{cde}$
	45	$4,96 \pm 0,04^{cde}$	$4,95 \pm 0,04^{bcde}$	$4,90 \pm 0,02^{abcd}$

60	$4,90 \pm 0,06^{abcd}$	$4,87 \pm 0,03^{abc}$	$4,81 \pm 0,07^{ab}$
75	$4,87 \pm 0,04^{abc}$	$4,80 \pm 0,06^a$	$4,78 \pm 0,05^a$
90	$4,87 \pm 0,06^{abc}$	$4,77 \pm 0,04^a$	$4,77 \pm 0,06^a$

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A partir da Tabela 4, foi possível observar uma redução gradual e estatisticamente significativa ($p < 0,05$) do pH ao longo do tempo, independentemente do tipo de embalagem utilizada, indicando leve tendência de acidificação do produto durante o armazenamento. Os valores iniciais foram semelhantes entre as amostras ($5,05 \pm 0,04$), sem diferença estatística ($p > 0,05$).

Sob condição ambiente, o pH manteve-se relativamente estável nas primeiras semanas, seguido de uma discreta redução a partir de 30 dias. Ao final dos 90 dias, o menor valor foi registrado nas amostras acondicionadas em PET+PE ($4,79 \pm 0,06$), enquanto PEAD ($4,90 \pm 0,03$) e PLA ($4,92 \pm 0,04$) apresentaram valores ligeiramente superiores, sem diferença significativa ($p > 0,05$). A discreta acidificação observada pode estar associada à formação de compostos ácidos oriundos de reações oxidativas e hidrolíticas, fenômeno comum em sistemas desidratados com presença de proteínas e lipídios (Forsido *et al.*, 2021; Korese *et al.*, 2022). Tendência semelhante foi relatada por Kumar, Kachhadiya e Nayi (2020) em grãos de milho doce desidratados e Obadina, Ibrahim e Adekoya (2018) em tomate cereja e ameixas secas, nos quais a oxidação de compostos orgânicos e a absorção de umidade contribuíram para a leve redução do pH.

Sob condição acelerada, verificou-se comportamento semelhante, porém com decréscimo mais acentuado do pH, evidenciando a influência da temperatura sobre a taxa das reações químicas. Aos 90 dias, as amostras embaladas em PET+PE e PLA apresentaram os menores valores médios ($4,77 \pm 0,06$ e $4,77 \pm 0,04$, respectivamente), enquanto o PEAD manteve o valor mais elevado ($4,87 \pm 0,06$). A maior queda de pH sob estresse térmico pode ser atribuída à intensificação de reações de oxidação lipídica e degradação de aminoácidos, que resultam na liberação de compostos voláteis ácidos e ligeira modificação do microambiente interno (Kim *et al.*, 2025).

As diferenças observadas entre as embalagens mostraram-se consistentes ao longo do tempo, embora mais evidentes sob condição acelerada. Além disso, observou-se que o pó de *Saccharomyces cerevisiae* acondicionado em PEAD manteve valores de pH mais estáveis durante o armazenamento, seguido por PLA e, por último, PET+PE, que apresentou maior redução ao final do período. Essa tendência reforça a influência do tipo de material sobre a preservação das propriedades químicas, uma vez que embalagens com maior barreira à difusão de oxigênio e vapor d'água reduzem a ocorrência de reações oxidativas e hidrolíticas (Korese *et al.*, 2022; Karwacka *et al.*, 2024).

O pH manteve-se em faixa estreita (4,77–5,05) durante todo o armazenamento, indicando boa estabilidade química do produto. Essa constância é relevante, pois variações mais acentuadas poderiam comprometer a integridade estrutural, a solubilidade e a funcionalidade do material, além de afetar sua conservação microbiológica (Forsido *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2025). Portanto, o controle do pH, aliado ao uso de embalagens com baixa permeabilidade ao oxigênio e à umidade, é determinante para a manutenção da qualidade durante o armazenamento.

3.2.4. Acidez total titulável

Na Tabela 5 é mostrada a variação da acidez total titulável do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* ao longo do tempo de armazenamento, em função do tipo de embalagem utilizado (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem avaliadas (ambiente e acelerada).

Tabela 5

Variação da acidez total titulável do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	2,50 ± 0,08 ^a	2,50 ± 0,08 ^a	2,50 ± 0,08 ^a
	15	2,52 ± 0,02 ^a	2,50 ± 0,04 ^a	2,53 ± 0,06 ^a
	30	2,52 ± 0,05 ^a	2,51 ± 0,06 ^a	2,59 ± 0,07 ^a
	45	2,56 ± 0,02 ^a	2,56 ± 0,03 ^a	2,59 ± 0,04 ^a
	60	2,62 ± 0,04 ^a	2,59 ± 0,16 ^a	2,73 ± 0,09 ^a
	75	2,65 ± 0,12 ^a	2,61 ± 0,07 ^a	2,73 ± 0,08 ^a
	90	2,66 ± 0,12 ^a	2,63 ± 0,10 ^a	2,75 ± 0,19 ^a
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	2,50 ± 0,08 ^a	2,50 ± 0,08 ^a	2,50 ± 0,08 ^a
	15	2,53 ± 0,06 ^{abc}	2,54 ± 0,06 ^{abc}	2,55 ± 0,06 ^{abc}
	30	2,51 ± 0,13 ^{ab}	2,55 ± 0,02 ^{abc}	2,61 ± 0,06 ^{abc}
	45	2,57 ± 0,04 ^{abc}	2,64 ± 0,06 ^{abc}	2,66 ± 0,10 ^{abc}
	60	2,63 ± 0,11 ^{abc}	2,73 ± 0,10 ^{abc}	2,70 ± 0,24 ^{abc}
	75	2,70 ± 0,06 ^{abc}	2,77 ± 0,12 ^{abc}	2,80 ± 0,04 ^{bc}
	90	2,72 ± 0,09 ^{abc}	2,81 ± 0,08 ^c	2,82 ± 0,10 ^c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Na Tabela 5 é mostrado o aumento gradual da acidez total titulável (ATT) ao longo do armazenamento, independentemente da condição ou do tipo de embalagem. Os valores iniciais

($2,50 \pm 0,08$ g ácido cítrico/100 g) foram homogêneos entre as amostras ($p > 0,05$), indicando uniformidade entre os tratamentos no início do experimento.

Sob condição ambiente, o incremento da acidez foi discreto, variando de $2,50 \pm 0,08$ para $2,66 \pm 0,12$ após 90 dias. Apesar da ausência de diferenças significativas ($p > 0,05$), verificou-se tendência de maior elevação nas amostras acondicionadas em PET+PE, seguidas por PEAD e PLA. O aumento discreto da acidez pode estar associado à permeabilidade das embalagens, que permite a difusão de oxigênio e umidade, estimulando reações químicas residuais ao longo do armazenamento, conforme também apontado por Forsido *et al.* (2021) e Korese *et al.* (2022). Sob condição acelerada, a elevação da acidez foi mais expressiva, alcançando cerca de $2,82 \pm 0,10$ g ácido cítrico/100 g ao final de 90 dias, com diferença significativa ($p < 0,05$) em relação ao tempo inicial.

Entre as embalagens avaliadas, o PEAD apresentou os menores valores médios, evidenciando maior eficiência como barreira à difusão de gases e vapor de água. Em contrapartida, o PET+PE exibiu os maiores teores, indicando desempenho protetivo inferior. O PLA apresentou comportamento intermediário, mantendo estabilidade até aproximadamente o 60º dia de armazenamento, seguido de um leve incremento nos valores observados. De modo geral, as diferenças entre as embalagens foram sutis, com tendência comum de aumento moderado da acidez ao longo do tempo. Resultados semelhantes foram relatados por Prisacaru *et al.* (2025) e Kim *et al.*, (2025), que também constataram elevação gradual da acidez em produtos alimentícios submetidos a estresse térmico, sem comprometimento expressivo da estabilidade química.

3.2.5. Índice de solubilidade em água

A variação do índice de solubilidade em água (ISA) do pó de *Saccharomyces cerevisiae*, em função do tipo de embalagem (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem (ambiente e acelerada) está ilustrada na Tabela 6.

Tabela 6

Variação do índice de solubilidade em água do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	41,74 ± 1,42 ^f	41,74 ± 1,42 ^f	41,74 ± 1,42 ^f
	15	39,35 ± 0,56 ^{def}	39,69 ± 0,62 ^{ef}	38,72 ± 0,95 ^{cdef}
	30	39,11 ± 2,01 ^{cdef}	39,48 ± 0,96 ^{cdef}	38,59 ± 0,97 ^{cdef}
	45	38,79 ± 1,85 ^{cdef}	39,47 ± 1,19 ^{cdef}	38,53 ± 1,28 ^{cdef}
	60	38,04 ± 0,74 ^{cdef}	35,51 ± 1,73 ^{bcdef}	33,82 ± 3,09 ^{abcd}
	75	36,45 ± 0,57 ^{bcde}	34,49 ± 4,87 ^{abcde}	31,22 ± 1,90 ^{ab}
	90	35,59 ± 0,40 ^{bcdef}	33,32 ± 4,20 ^{abc}	29,08 ± 2,60 ^a
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	41,74 ± 1,42 ⁱ	41,74 ± 1,42 ⁱ	41,74 ± 1,42 ⁱ
	15	39,68 ± 1,17 ^{hi}	39,23 ± 1,06 ^{hi}	39,14 ± 2,13 ^{gh}
	30	39,38 ± 1,16 ^{hi}	38,96 ± 0,36 ^{gh}	36,31 ± 0,42 ^{efg}
	45	38,87 ± 0,28 ^{gh}	37,72 ± 1,40 ^{fgh}	35,44 ± 0,68 ^{ef}
	60	35,11 ± 0,36 ^{de}	35,83 ± 0,49 ^{ef}	31,64 ± 1,62 ^c
	75	32,36 ± 0,94 ^{cd}	32,37 ± 0,54 ^{cd}	28,11 ± 0,55 ^{ab}
	90	31,16 ± 1,74 ^{bc}	30,39 ± 0,22 ^{bc}	26,15 ± 1,23 ^a

Analisando a Tabela 6, observou-se uma redução gradual do índice de solubilidade em água (ISA) ao longo do período de estocagem, independentemente do tipo de embalagem, o que indica uma perda progressiva da capacidade de dispersão do pó em meio aquoso. Esse comportamento é típico de materiais higroscópicos que sofrem alterações estruturais durante o armazenamento, decorrentes da reorganização das macromoléculas em função da umidade adsorvida, levando à redução da solubilidade (Ng; Ling; Hadinoto, 2022; Jiang *et al.*, 2025).

Na condição ambiente, os valores de ISA mantiveram-se estatisticamente semelhantes ($p > 0,05$) até os 15 primeiros dias, evidenciando estabilidade inicial do sistema. A partir desse ponto, verificou-se uma queda significativa ($p < 0,05$) nos valores, especialmente nas amostras acondicionadas em PET+PE, que apresentaram desempenho inferior ($38,7 \pm 0,9$ %) em relação ao PEAD ($39,4 \pm 0,6$ %) e ao PLA ($39,7 \pm 0,6$ %). Após 60 dias, as diferenças entre os tratamentos tornaram-se mais evidentes, com valores de $33,8 \pm 3,1$ % (PET+PE), $35,5 \pm 1,7$ % (PLA) e $38,0 \pm 0,7$ % (PEAD). Ao final do período experimental (90 dias), o ISA mínimo foi novamente verificado para o PET+PE ($29,1 \pm 2,6$ %), diferindo estatisticamente ($p < 0,05$) das demais embalagens, o que demonstra maior susceptibilidade desse material à penetração de umidade. O PEAD manteve os maiores valores médios, resultado coerente com sua baixa taxa de permeabilidade ao vapor d'água, enquanto o PLA apresentou comportamento intermediário.

Sob armazenamento acelerado, o comportamento seguiu a mesma tendência, porém de forma mais acentuada, refletindo o impacto da temperatura elevada sobre a estabilidade

físico-química do pó. Já aos 15 dias, as médias apresentaram diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,05$). A partir de 30 dias, essa diferença se ampliou, com ISA de $36,3 \pm 0,4 \%$ (PET+PE), $39,0 \pm 0,4 \%$ (PLA) e $39,4 \pm 1,2 \%$ (PEAD). Aos 90 dias, o ISA caiu para $26,2 \pm 1,2 \%$ (PET+PE), $30,4 \pm 0,2 \%$ (PLA) e $31,2 \pm 1,7 \%$ (PEAD), sendo as variações entre as embalagens estatisticamente significativas ($p < 0,05$). Esse declínio mais intenso pode estar associado a reações de escurecimento não enzimático (Maillard), oxidação lipídica e agregação de proteínas e polissacarídeos, que modificam a superfície das partículas e reduzem sua reidratação (Geng *et al.*, 2023; El Hosry *et al.*, 2025; Jiang *et al.*, 2025).

De acordo com Jiang *et al.* (2025), a perda de solubilidade em sistemas em pó está diretamente relacionada à adsorção de umidade pela matriz sólida, que induz alterações na estrutura superficial e interna das partículas, tornando-as mais compactas e menos porosas, o que dificulta a dispersão. De forma semelhante, Ueda *et al.* (2023) observaram que, em materiais higroscópicos, o aumento do teor de umidade promove reorganização das macromoléculas e colapso parcial da matriz sólida, resultando em redução gradual da solubilidade. Outros autores também relataram que temperaturas e umidades elevadas intensificam esses processos, favorecendo reações oxidativas e mudanças conformacionais que comprometem a capacidade de reidratação dos pós (Geng *et al.*, 2023; El Hosry *et al.*, 2025; Jiang *et al.*, 2025).

Dessa forma, a redução gradual do ISA ao longo do armazenamento, acentuada pelo aumento da temperatura, evidencia o fortalecimento das interações entre os constituintes da matriz sólida e a umidade adsorvida.

3.2.6. Proteínas

Na Tabela 7 está apresentada a variação do teor de proteínas do pó de *Saccharomyces cerevisiae* em função do tipo de embalagem (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem (ambiente e acelerada), ao longo de 90 dias de armazenamento.

Tabela 7

Variação do teor de proteínas do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente ($26\text{ }^{\circ}\text{C}$; 75 % UR) e (B) acelerada ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente ($26\text{ }^{\circ}\text{C}$; 75 % UR)	0	$25,56 \pm 0,90^a$	$25,56 \pm 0,90^a$	$25,56 \pm 0,90^a$
	30	$25,40 \pm 0,43^a$	$25,50 \pm 0,50^a$	$25,27 \pm 0,30^a$
	60	$25,26 \pm 1,04^a$	$25,22 \pm 0,93^a$	$25,03 \pm 0,17^a$

	90	25,13 ± 0,14 ^a	25,04 ± 0,81 ^a	24,94 ± 0,21 ^a
	0	25,56 ± 0,90 ^a	25,56 ± 0,90 ^a	25,56 ± 0,90 ^a
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	30	25,31 ± 0,21 ^{ab}	25,02 ± 0,45 ^{ab}	24,99 ± 0,23 ^{ab}
	60	25,19 ± 0,43 ^{ab}	24,95 ± 0,10 ^{ab}	24,16 ± 0,29 ^{ab}
	90	24,83 ± 0,37 ^{ab}	24,13 ± 0,30 ^{ab}	24,02 ± 0,14 ^b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Conforme apresentado na Tabela 7, o teor de proteína dos pós de *Saccharomyces cerevisiae* apresentaram variações discretas e estatisticamente não significativas ($p > 0,05$) ao longo dos 90 dias de armazenamento, evidenciando estabilidade do teor protéico nas diferentes condições e tipos de embalagem analisados.

Sob armazenamento em temperatura ambiente, os valores iniciais foram semelhantes entre os materiais (25,56 ± 0,90 %), mantendo-se praticamente constantes ao longo do tempo. Após 90 dias, os teores variaram entre 24,94 e 25,13 %, sem diferenças estatísticas ($p > 0,05$), o que indica preservação da integridade das proteínas. Resultados semelhantes têm sido descritos para leveduras desidratadas, cuja estabilidade de armazenamento está fortemente associada à baixa atividade de água, que mantém a matriz em estado vítreo e limita reações degradativas (Kawai *et al.*, 2021). Em paralelo, a rigidez da parede celular de *Saccharomyces cerevisiae* contribui para a tolerância a estresses, inclusive oxidativo, preservando a integridade estrutural durante o armazenamento (Ribeiro; Bourbon-Melo; Sá-Correia, 2022; Şek *et al.*, 2023).

Na condição acelerada, verificou-se uma leve redução no teor de proteínas, mais pronunciada no sistema PET+PE (24,02 ± 0,14 % aos 90 dias). Embora a diferença não tenha sido estatisticamente significativa ($p > 0,05$), identificou-se tendência de maior perda em materiais com maior permeabilidade a gases e umidade, indicando que a eficiência de barreira exerce influência direta sobre a estabilidade composicional.

De modo geral, o PEAD apresentou comportamento mais estável, seguido do PLA, destacando-se pela baixa permeabilidade ao vapor d'água e ao oxigênio. Já o PET+PE demonstrou tendência sutil, porém consistente, de redução associada à sua maior taxa de difusão gasosa.

Os resultados obtidos confirmam que, nas condições avaliadas, o pó de *Saccharomyces cerevisiae* manteve alta estabilidade composicional, sendo o controle da temperatura e a escolha de materiais com adequada barreira física fatores determinantes para preservar a qualidade e a integridade das proteínas ao longo do armazenamento.

3.2.7 Lipídios

Na Tabela 8 está descrita a variação do teor de lipídios do pó de *Saccharomyces cerevisiae* em função do tipo de embalagem (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem (ambiente e acelerada), ao longo de 90 dias de armazenamento.

Tabela 8

Variação do teor de lipídios do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	9,50 ± 0,65 ^a	9,50 ± 0,65 ^a	9,50 ± 0,65 ^a
	30	9,40 ± 0,31 ^a	9,41 ± 0,51 ^a	9,30 ± 0,14 ^a
	60	9,23 ± 0,23 ^a	9,14 ± 0,45 ^a	9,04 ± 0,07 ^a
	90	9,11 ± 0,09 ^a	9,00 ± 0,22 ^a	9,00 ± 0,11 ^a
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	9,50 ± 0,65 ^a	9,50 ± 0,65 ^a	9,50 ± 0,65 ^a
	30	9,33 ± 0,09 ^a	9,16 ± 0,15 ^a	9,20 ± 0,24 ^a
	60	9,05 ± 0,13 ^a	9,01 ± 0,23 ^a	8,95 ± 0,05 ^a
	90	9,04 ± 0,11 ^a	8,97 ± 0,24 ^a	8,53 ± 0,22 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A partir da Tabela 8, constatou-se uma discreta redução do teor lipídico ao longo do período experimental, embora sem significância estatística ($p > 0,05$). Na condição ambiente, os valores iniciais foram homogêneos entre as embalagens (9,50 ± 0,65 %), indicando uniformidade das amostras no início do armazenamento. Após 90 dias, verificou-se leve diminuição dos teores, com valores finais de 9,11 ± 0,09 % (PEAD), 9,00 ± 0,22 % (PLA) e 9,00 ± 0,11 % (PET + PE). Essas variações não foram significativas ($p > 0,05$), evidenciando boa estabilidade sob condições ambientais. Resultados semelhantes foram relatados por Nowsad, Al-Shahriar e Hoque (2021), que observaram estabilidade lipídica em pós de peixe embalados a vácuo e armazenados à temperatura ambiente, atribuída à limitação da difusão de oxigênio e à baixa atividade de água.

Sob condição acelerada, o comportamento seguiu tendência semelhante, porém mais pronunciada, refletindo o efeito térmico sobre a estabilidade oxidativa. Após 90 dias, os teores foram de 9,04 ± 0,11 % (PEAD), 8,97 ± 0,24 % (PLA) e 8,53 ± 0,22 % (PET + PE), indicando ligeira redução do conteúdo lipídico, mais evidente no PET + PE. Embora as diferenças não tenham sido significativas ($p > 0,05$), observou-se tendência de maior degradação em embalagens com menor barreira ao oxigênio e ao vapor d'água.

De acordo com Newsad, Al-Shahriar e Hoque (2021), a estabilidade oxidativa de lipídios depende fortemente da presença residual de oxigênio e da eficiência da barreira de embalagem, sendo que materiais com maior permeabilidade favorecem a formação de compostos voláteis e produtos secundários da oxidação. Além disso, o aumento da umidade observado durante o armazenamento pode ter contribuído para a oxidação lipídica, visto que o teor de água influencia diretamente a taxa de reações oxidativas em matrizes desidratadas (Thakur e Nanda, 2023).

Dessa forma, os resultados apresentados na Tabela 8 demonstram que o teor lipídico manteve-se estável, sem diferenças significativas ($p > 0,05$) entre embalagens e condições de estocagem, confirmando a elevada resistência à oxidação e a boa estabilidade do produto durante o armazenamento. Essa característica é desejável, pois a degradação lipídica está associada à formação de compostos voláteis, odores indesejáveis e perda de qualidade sensorial e nutricional (Barden e Decker, 2016).

3.2.8. Densidade aparente e densidade compactada

Na Tabela 9 está apresentada a variação da densidade aparente e compactada de *Saccharomyces cerevisiae* em função do tipo de embalagem (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem (ambiente e acelerada), ao longo de 90 dias de armazenamento.

Tabela 9

Variação da densidade aparente e compactada do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Parâmetro	Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
			PEAD	PLA	PET + PE
Densidade aparente	Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	0,556 ± 0,006 ^a	0,556 ± 0,006 ^a	0,556 ± 0,006 ^a
		30	0,555 ± 0,007 ^a	0,555 ± 0,005 ^a	0,555 ± 0,007 ^a
		60	0,554 ± 0,010 ^a	0,552 ± 0,006 ^a	0,551 ± 0,008 ^a
		90	0,554 ± 0,006 ^a	0,551 ± 0,005 ^a	0,547 ± 0,007 ^a
	Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	0,556 ± 0,006 ^a	0,556 ± 0,006 ^a	0,556 ± 0,006 ^a
		30	0,552 ± 0,004 ^{ab}	0,551 ± 0,001 ^{ab}	0,551 ± 0,005 ^{ab}
		60	0,540 ± 0,011 ^{abc}	0,540 ± 0,006 ^{abc}	0,531 ± 0,016 ^{abc}
		90	0,537 ± 0,005 ^{bc}	0,534 ± 0,007 ^{bc}	0,530 ± 0,007 ^c
Densidade compactada	Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	0,689 ± 0,009 ^a	0,689 ± 0,009 ^a	0,689 ± 0,009 ^a
		30	0,689 ± 0,004 ^a	0,688 ± 0,004 ^a	0,688 ± 0,002 ^a
		60	0,692 ± 0,004 ^a	0,691 ± 0,012 ^a	0,697 ± 0,016 ^a

	90	$0,698 \pm 0,012^a$	$0,696 \pm 0,007^a$	$0,701 \pm 0,015^a$
	0	$0,689 \pm 0,009^a$	$0,689 \pm 0,009^a$	$0,689 \pm 0,01^a$
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	30	$0,685 \pm 0,002^a$	$0,685 \pm 0,002^a$	$0,685 \pm 0,003^a$
	60	$0,691 \pm 0,010^a$	$0,695 \pm 0,007^a$	$0,697 \pm 0,006^a$
	90	$0,695 \pm 0,011^a$	$0,697 \pm 0,014^a$	$0,702 \pm 0,023^a$

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

De modo geral, os valores de densidade aparente e compactada apresentaram variações discretas e não significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos, evidenciando a estabilidade física do pó durante o armazenamento (Tabela 9). Esses parâmetros constituem indicadores fundamentais das propriedades de fluidez e empacotamento de materiais particulados, pois refletem o comportamento de reorganização e acomodação das partículas sob diferentes condições de estocagem (Juarez-Enríquez *et al.*, 2022). Além disso, possuem relevância prática e econômica, influenciando diretamente o volume de embalagem requerido, os custos logísticos e a eficiência do armazenamento (Yadav e Mishra, 2023).

Na condição ambiente, as densidades mantiveram-se praticamente constantes ao longo do tempo, com valores médios de $0,55 \text{ g mL}^{-1}$ para a densidade aparente e $0,69 \text{ g mL}^{-1}$ para a compactada, sem diferenças estatísticas entre as embalagens ($p > 0,05$). Essa estabilidade sugere que, embora tenha ocorrido leve aumento da umidade, o teor de água não foi suficiente para induzir rearranjos estruturais significativos no empacotamento das partículas. Resultados semelhantes foram relatados por Vega-Castro *et al.* (2025) durante o armazenamento de pó de amora seca e por Gül *et al.* (2025) ao avaliarem o pó de boza acondicionado em recipientes de vidro.

Sob condição acelerada, a densidade aparente apresentou redução significativa apenas entre o tempo inicial e 90 dias de estocagem, independentemente da embalagem, indicando o efeito cumulativo da temperatura sobre a estrutura do material. Tal comportamento pode estar relacionado a rearranjos e à compactação parcial das partículas, fenômenos característicos de sistemas secos expostos a estresse térmico (Juarez-Enríquez *et al.*, 2022).

A densidade compactada, por sua vez, manteve-se estável em todo o período experimental, com valores entre $0,685$ e $0,702 \text{ g mL}^{-1}$, sem diferenças significativas em função do tempo ou do tipo de embalagem ($p > 0,05$). Essa constância reforça a integridade estrutural do pó e a ausência de compactação excessiva. Segundo Gül *et al.* (2025) a manutenção da densidade compactada está relacionada à baixa adsorção de umidade e à uniformidade granulométrica, fatores que limitam a aglomeração e preservam a estabilidade mecânica do material.

De forma geral, as análises demonstraram que as densidades aparente e compactada permaneceram estatisticamente inalteradas ($p > 0,05$) na maioria das condições e períodos

avaliados, evidenciando alta estabilidade estrutural e reduzido impacto do tempo e da temperatura sobre a integridade física do pó. Esse comportamento é desejável em produtos desidratados, pois a manutenção da estabilidade volumétrica assegura uniformidade de dosagem, adequada capacidade de reconstituição e fluidez controlada durante o envase e o processamento industrial (Yadav e Mishra, 2023; Suhag; Kellil; Razem, 2024).

3.2.9. Propriedades de escoamento

Na Tabela 10 estão descritos a variação das propriedades de escoamento, como índice de Carr (IC) e razão de Hausner (RH), de *Saccharomyces cerevisiae* em função do tipo de embalagem (PEAD, PLA e PET+PE) e das condições de estocagem (ambiente e acelerada), ao longo de 90 dias de armazenamento.

Tabela 10

Variação das propriedades de escoamento, índice de Carr (IC) e razão de Hausner (RH), do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Parâmetro	Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
			PEAD	PLA	PET + PE
Índice de Carr	Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	19,37 ± 1,03 ^a	19,37 ± 1,03 ^a	19,37 ± 1,03 ^a
		30	19,64 ± 0,58 ^a	19,54 ± 0,33 ^a	19,87 ± 1,31 ^a
		60	19,97 ± 1,23 ^a	20,20 ± 1,49 ^a	20,98 ± 2,92 ^a
		90	20,63 ± 2,04 ^a	20,85 ± 0,71 ^a	21,96 ± 0,88 ^a
	Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	19,37 ± 1,03 ^{ab}	19,37 ± 1,03 ^{ab}	19,37 ± 1,03 ^{ab}
		30	19,26 ± 0,42 ^a	19,42 ± 0,16 ^{ab}	19,57 ± 1,07 ^{abc}
		60	21,86 ± 0,90 ^{abc}	22,23 ± 1,38 ^{abc}	23,76 ± 1,93 ^c
		90	22,70 ± 1,35 ^{abc}	23,29 ± 2,03 ^{bc}	24,44 ± 2,21 ^c
Razão de Hausner	Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	1,24 ± 0,02 ^a	1,24 ± 0,02 ^a	1,24 ± 0,02 ^a
		30	1,24 ± 0,01 ^a	1,24 ± 0,01 ^a	1,25 ± 0,02 ^a
		60	1,25 ± 0,02 ^a	1,26 ± 0,02 ^a	1,27 ± 0,05 ^a
		90	1,26 ± 0,04 ^a	1,26 ± 0,01 ^a	1,28 ± 0,01 ^a
	Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	1,24 ± 0,02 ^a	1,24 ± 0,02 ^a	1,24 ± 0,02 ^a
		30	1,24 ± 0,01 ^a	1,24 ± 0,00 ^a	1,23 ± 0,01 ^{ab}
		60	1,28 ± 0,02 ^{abc}	1,29 ± 0,02 ^{abc}	1,31 ± 0,03 ^{bc}
		90	1,29 ± 0,02 ^{abc}	1,30 ± 0,03 ^{abc}	1,32 ± 0,04 ^c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Avaliando a Tabela 10, constatou-se que as propriedades de escoamento mantiveram-se estáveis sob condição ambiente, enquanto sob condição acelerada houve incremento gradual dos valores de IC e RH ao longo do tempo, sugerindo redução da fluidez e aumento da coesividade do material. Esse comportamento é atribuído à adsorção de umidade superficial, que induz modificações nas interações interparticuladas, favorecendo a aglomeração e o aumento da fricção entre as partículas (Juarez-Enriquez *et al.*, 2022; Yadav e Mishra, 2023).

Na condição ambiente (26 °C; 75 % UR), os valores de RH permaneceram próximos a 1,24–1,28, sem diferenças estatísticas significativas ($p > 0,05$) entre os tempos de armazenamento ou entre as embalagens. O IC apresentou comportamento semelhante, variando entre 19,3 e 21,9 %, mantendo-se dentro da faixa que caracteriza pós com boa fluidez segundo a *United States Pharmacopeia* (USP, 2023). Essa constância demonstra estabilidade física do material sob condições ambientais, sem evidências de compactação ou formação de aglomerados.

Por outro lado, sob condição acelerada (40 °C; 75 % UR), observou-se aumento significativo ($p < 0,05$) de ambos os parâmetros a partir de 60 dias, indicando o impacto da temperatura elevada sobre a mobilidade molecular e o equilíbrio higroscópico do pó. Ao final de 90 dias, os valores de IC alcançaram $22,7 \pm 1,3$ % (PEAD), $23,3 \pm 2,0$ % (PLA) e $24,4 \pm 2,2$ % (PET+PE), enquanto os de RH atingiram $1,29 \pm 0,02$, $1,30 \pm 0,03$ e $1,32 \pm 0,04$, respectivamente. O aumento desses índices está associado à maior retenção de umidade e consequente intensificação das forças coesivas, resultando em menor fluidez (Suhag; Kellil; Razem, 2024). Comportamento análogo foi descrito por Yadav e Mishra (2023), em pós lácteos armazenados sob diferentes temperaturas e por Gül *et al.* (2025) em pó de boza acondicionado em recipientes de vidro.

A elevação simultânea dos valores de IC e RH reflete um aumento da compactabilidade do material, o que indica rearranjo interno e redução da mobilidade do leito de partículas. De acordo com Suhag, Kellil e Razem (2024), esse fenômeno está relacionado à ação plastificante da umidade adsorvida, que modifica a energia de coesão entre as partículas e favorece a formação de agregados estáveis. Assim, as variações observadas ao longo do armazenamento são resultado de transformações microestruturais progressivas, acentuadas pela temperatura e pelo grau de barreira das embalagens.

Sendo assim, os resultados apresentados na Tabela 10 demonstraram que as propriedades de escoamento do pó de *Saccharomyces cerevisiae* mantiveram-se estáveis sob condição ambiente, mas foram sensíveis à exposição a condições aceleradas. A análise estatística confirmou efeito significativo ($p < 0,05$) do tempo e do tipo de embalagem apenas sob estresse térmico, evidenciando

a importância da combinação de baixa temperatura e embalagens de alta barreira para a preservação da estabilidade física do material durante o armazenamento prolongado.

3.2.10. Cor

Os parâmetros colorimétricos L^* , a^* , b^* e ΔE descrevem as variações de luminosidade, tonalidade e diferença total de cor das amostras do pó de *Saccharomyces cerevisiae* ao longo do armazenamento, refletindo alterações físico-químicas associadas à oxidação e à degradação térmica dos constituintes do material. As Tabelas 11 a 14 apresentam o comportamento desses parâmetros durante 90 dias de armazenamento, sob condições ambiente (26 °C; 75 % UR) e acelerada (40 °C; 75 % UR).

Tabela 11. Variação da luminosidade (L^*) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	24,13 ± 0,44 ^b	24,13 ± 0,44 ^b	24,13 ± 0,44 ^b
	30	23,48 ± 0,33 ^b	23,02 ± 0,29 ^{bd}	22,55 ± 0,79 ^{bcd}
	60	21,50 ± 1,11 ^{acd}	21,40 ± 0,62 ^{acd}	20,67 ± 0,58 ^{ac}
	90	20,85 ± 0,62 ^{ac}	20,45 ± 1,11 ^a	19,78 ± 0,58 ^a
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	24,13 ± 0,44 ^a	24,13 ± 0,44 ^a	24,13 ± 0,44 ^a
	30	23,22 ± 0,26 ^{ac}	22,58 ± 0,40 ^{ac}	21,70 ± 0,47 ^{ce}
	60	19,98 ± 0,58 ^{be}	18,36 ± 0,62 ^b	15,27 ± 1,03 ^d
	90	18,07 ± 0,62 ^b	15,48 ± 1,03 ^d	13,17 ± 1,20 ^f

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

O parâmetro L^* , que representa a luminosidade do produto (0 = preto; 100 = branco), constitui um importante indicador da estabilidade visual e oxidativa durante o armazenamento (Arepally *et al.*, 2020). Conforme mostrado na Tabela 11, verificou-se redução progressiva dos valores de L^* em ambas as condições avaliadas, refletindo o escurecimento gradual do pó de *Saccharomyces cerevisiae*.

Sob condição ambiente, observou-se queda contínua da luminosidade ao longo dos 90 dias, independentemente do tipo de embalagem. O valor inicial de 24,13 ± 0,44 reduziu-se para 20,85 ± 0,62 (PEAD), 20,45 ± 1,11 (PLA) e 19,78 ± 0,58 (PET + PE), indicando reduções significativas ($p < 0,05$) em função do tempo de estocagem. Essa tendência de escurecimento pode ser atribuída à oxidação de constituintes orgânicos e às reações de Maillard entre proteínas e açúcares redutores,

fenômeno também relatado por Shishir *et al.* (2017) em pós de goiaba-rosa liofilizados e por Mussi e Pereira (2022) em pó de jambolão armazenado sob condições ambientais por 90 dias.

Na condição acelerada, a redução da luminosidade foi ainda mais acentuada, confirmando o efeito sinérgico da temperatura na intensificação de reações oxidativas e térmicas. Após 90 dias, os valores de L^* atingiram $18,07 \pm 0,62$ (PEAD), $15,48 \pm 1,03$ (PLA) e $13,17 \pm 1,20$ (PET + PE), com diferenças significativas entre os tipos de embalagem ($p < 0,05$).

Do ponto de vista físico-químico, a diminuição da luminosidade reflete a formação de pigmentos escuros oriundos da oxidação lipídica, da degradação de carboidratos e da polimerização térmica de compostos orgânicos, conforme também observado por Mussi e Pereira (2022). Resultados semelhantes foram relatados por Chaturvedi *et al.* (2024), que identificaram correlação direta entre a queda de L^* e o acúmulo de produtos de oxidação em pós de bebidas sinbióticas microencapsuladas submetidos a armazenamento acelerado.

O comportamento descrito para a luminosidade (L^*) apresenta relação direta com as variações no parâmetro a^* , que indica o deslocamento cromático no eixo verde-vermelho. A Tabela 12 ilustra a evolução desse parâmetro ao longo do período de armazenamento, evidenciando a coerência entre as alterações visuais e os processos de oxidação observados.

Tabela 12

Variação da tonalidade (a^*) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	$-3,18 \pm 0,03^a$	$-3,18 \pm 0,03^a$	$-3,18 \pm 0,03^a$
	30	$-3,09 \pm 0,07^{ab}$	$-3,07 \pm 0,08^{ab}$	$-3,00 \pm 0,06^{bd}$
	60	$-2,90 \pm 0,09^{cd}$	$-2,82 \pm 0,05^c$	$-2,36 \pm 0,05^e$
	90	$-2,78 \pm 0,03^c$	$-2,24 \pm 0,05^{ef}$	$-2,15 \pm 0,04^f$
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	$-3,18 \pm 0,03^a$	$-3,18 \pm 0,03^a$	$-3,18 \pm 0,03^a$
	30	$-3,06 \pm 0,11^{ab}$	$-3,02 \pm 0,10^{ab}$	$-2,97 \pm 0,07^b$
	60	$-1,97 \pm 0,08^c$	$-1,90 \pm 0,05^{cd}$	$-1,66 \pm 0,09^{ef}$
	90	$-1,93 \pm 0,08^{cd}$	$-1,76 \pm 0,09^{de}$	$-1,48 \pm 0,08^f$

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Nas amostras mantidas sob condição ambiente, verificou-se um aumento dos valores de a^* , indicando perda da tonalidade esverdeada inicial e leve tendência ao avermelhamento. O valor médio inicial de $-3,18 \pm 0,03$ elevou-se para $-2,78 \pm 0,03$ (PEAD), $-2,24 \pm 0,05$ (PLA) e $-2,15 \pm$

0,04 (PET+PE) ao final de 90 dias. A análise estatística confirmou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os períodos de armazenamento, principalmente após 60 dias, refletindo o efeito cumulativo do tempo sobre as transformações cromáticas.

Sob condição acelerada, a intensificação desse comportamento foi ainda mais evidente, com valores finais de $-1,93 \pm 0,08$ (PEAD), $-1,76 \pm 0,09$ (PLA) e $-1,48 \pm 0,08$ (PET+PE), caracterizando uma mudança perceptível da tonalidade em direção ao vermelho. A diferença significativa entre as embalagens ($p < 0,05$) demonstra o papel determinante das propriedades de barreira, visto que a embalagem PET+PE, mais permeável ao oxigênio, apresentou as maiores alterações de cor. Resultados semelhantes foram relatados por Tan *et al.* (2021), que observaram o aumento de a^* em pós do suco de melão seco por pulverização e armazenados sob altas temperaturas, associando o fenômeno à formação de compostos cromóforos derivados da oxidação de aminoácidos e açúcares.

O aumento dos valores de a^* está relacionado à formação de pigmentos escuros provenientes de reações de Maillard e da oxidação de compostos fenólicos, mecanismos que ocorrem simultaneamente ao decréscimo de L^* . Segundo Murata (2021) o deslocamento da cor para a região avermelhada resulta da condensação e polimerização de produtos intermediários da Maillard. Esse processo é favorecido pelo aumento da temperatura e da umidade, fatores que ampliam a mobilidade molecular e facilitam reações oxidativas (Chaturvedi *et al.*, 2024).

De maneira coerente com as variações observadas para L^* e a^* , o comportamento do parâmetro b^* (Tabela 13) reforça o avanço das alterações cromáticas decorrentes do armazenamento. Esse parâmetro reflete a intensidade da tonalidade amarela do material, estando associado tanto à presença natural de pigmentos quanto à formação de compostos provenientes de reações oxidativas e de escurecimento não enzimático.

Tabela 13

Variação da tonalidade (b^*) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	$13,84 \pm 0,97^a$	$13,84 \pm 0,97^a$	$13,84 \pm 0,97^a$
	30	$14,09 \pm 0,16^a$	$14,15 \pm 0,25^a$	$14,39 \pm 0,38^a$
	60	$13,84 \pm 0,97^a$	$14,46 \pm 0,05^a$	$14,94 \pm 0,05^a$
	90	$14,09 \pm 0,16^a$	$14,90 \pm 0,08^a$	$15,52 \pm 0,08^a$

	0	13,84 ± 0,97 ^a	13,84 ± 0,97 ^a	13,84 ± 0,97 ^a
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	30	14,15 ± 0,47 ^a	14,28 ± 0,87 ^{ab}	14,94 ± 0,81 ^{ab}
	60	14,43 ± 0,03 ^{ab}	14,72 ± 0,05 ^{ab}	16,01 ± 0,08 ^b
	90	15,07 ± 0,03 ^{ab}	15,62 ± 0,06 ^{ab}	18,25 ± 0,05 ^c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Na condição ambiente, observou-se uma leve elevação nos valores de b^* ao longo do tempo, variando de $13,84 \pm 0,97$ no tempo inicial para $14,09 \pm 0,16$ (PEAD), $14,90 \pm 0,08$ (PLA) e $15,52 \pm 0,08$ (PET+PE) aos 90 dias. Embora as diferenças entre embalagens não tenham sido estatisticamente significativas ($p > 0,05$), a tendência crescente de coloração amarelada, especialmente nas embalagens de menor barreira, pode refletir a intensificação gradual de reações de oxidação lipídica e degradação de pigmentos sensíveis à luz (Haile *et al.*, 2011; Wazir *et al.*, 2021).

Sob condição acelerada, o aumento foi mais expressivo, com valores finais de $15,07 \pm 0,03$ (PEAD), $15,62 \pm 0,06$ (PLA) e $18,25 \pm 0,05$ (PET+PE), revelando diferença significativa ($p < 0,05$) entre as embalagens. O comportamento confirma o efeito catalisador da temperatura sobre as reações de oxidação, fenômeno observado por Obadina, Ibrahim e Adekoya (2018) e Yadav e Mishra (2023). O incremento do parâmetro b^* indica a formação progressiva de compostos cromóforos derivados de açúcares redutores e aminoácidos residuais, cuja polimerização contribui para o amarelecimento observado. O conjunto das variações de L^* , a^* e b^* se reflete no comportamento da diferença total de cor (ΔE), apresentada na Tabela 14.

Tabela 14

Variação da diferença total de cor (ΔE) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* armazenado em diferentes tipos de embalagem ao longo de 90 dias, sob duas condições de armazenamento: (A) ambiente (26 °C; 75 % UR) e (B) acelerada (40 °C; 75 % UR).

Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
		PEAD	PLA	PET + PE
Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	0,00 ± 0,00 ^a	0,00 ± 0,00 ^a	0,00 ± 0,00 ^a
	30	1,26 ± 0,21 ^{ab}	1,37 ± 0,66 ^{ab}	1,78 ± 0,39 ^{ab}
	60	2,14 ± 0,84 ^b	1,58 ± 0,50 ^{ab}	2,38 ± 0,84 ^b
	90	1,58 ± 1,09 ^{ab}	1,52 ± 1,30 ^{ab}	1,38 ± 0,48 ^{ab}
Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	0,00 ± 0,00 ^d	0,00 ± 0,00 ^d	0,00 ± 0,00 ^d
	30	1,37 ± 0,38 ^{ad}	2,10 ± 0,62 ^{ab}	2,80 ± 0,70 ^{abc}
	60	3,53 ± 0,51 ^{bc}	4,56 ± 0,73 ^c	6,85 ± 1,24 ^e
	90	2,04 ± 0,94 ^{ab}	3,03 ± 0,56 ^{abc}	3,24 ± 0,86 ^{abc}

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Na condição ambiente, os valores de ΔE permaneceram baixos durante todo o período de armazenamento, todos inferiores a 3 unidades, o que indica que as variações de cor foram visualmente pouco perceptíveis e estatisticamente não significativas ($p > 0,05$). Esse comportamento está de acordo com o relatado por Pathare, Opara e Al-Said (2013), que definem $\Delta E < 3$ como o limiar abaixo do qual as diferenças de cor não são detectáveis a olho nu. Resultados semelhantes foram descritos por Almeida *et al.* (2018), que observaram alta estabilidade visual ($\Delta E < 3$) em produtos vegetais desidratados mantidos sob condições controladas de temperatura e umidade.

Sob condição acelerada, observou-se aumento expressivo de ΔE ao longo do armazenamento. Aos 60 dias, os valores médios atingiram $3,53 \pm 0,51$ (PEAD), $4,56 \pm 0,73$ (PLA) e $6,85 \pm 1,24$ (PET + PE), todos significativamente diferentes entre si ($p < 0,05$). Valores superiores a 3 indicam mudanças cromáticas perceptíveis, confirmando o efeito combinado da temperatura e da menor barreira de oxigênio/luz das embalagens sobre a estabilidade da cor, comportamento semelhante foi relatado por El-Mesery *et al.* (2024) em tomates frescos submetidos a estresse térmico e por Xing *et al.* (2025) durante o armazenamento de cerejas doces em diferentes temperaturas. O aumento das variações cromáticas em condições mais elevadas pode estar relacionado à formação de pigmentos oriundos da oxidação lipídica e das reações de Maillard (Liao *et al.*, 2024; Gül *et al.*, 2025).

Após 90 dias verificou-se tendência de estabilização de ΔE , sugerindo que o sistema alcançou um equilíbrio nas reações degradativas, possivelmente devido à saturação dos sítios reativos e ao consumo dos precursores de pigmentos, fenômeno semelhante ao relatado por Jakubczyk *et al.* (2021) em extratos secos de sopa de beterraba: o ΔE apresentou pequeno aumento inicial e depois menor variação durante a estocagem prolongada.

Em conjunto, as Tabelas 11 a 14 demonstram de forma integrada que tempo e temperatura são os principais fatores responsáveis pelas alterações cromáticas do pó de *Saccharomyces cerevisiae*. As modificações observadas, redução de L^* , aumento de a^* , elevação de b^* e incremento de ΔE , são típicas de processos oxidativos e reações de escurecimento não enzimático, que comprometem gradualmente a aparência e a estabilidade físico-química do produto. Dessa forma, os parâmetros colorimétricos se confirmam como ferramentas robustas de monitoramento da estabilidade, refletindo o efeito sinérgico entre tempo, temperatura e propriedades de barreira das embalagens sobre a qualidade visual e funcional do pó de levedura.

3.2.11. Análise microbiológica

A Tabela 15 apresenta os resultados da contagem de microrganismos mesófilos totais (log UFC/g) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* ao longo do armazenamento, em diferentes condições de temperatura e umidade relativa e para os distintos tipos de embalagem avaliados.

Tabela 15

Contagem de microrganismos mesófilos totais (log UFC/g) do pó de *Saccharomyces cerevisiae* sob diferentes condições de armazenamento.

Microrganismo	Condição de armazenamento	Tempo de armazenamento (dia)	Embalagem		
			PEAD	PLA	PET + PE
Mesófilos totais aeróbios (log UFC/g)	Ambiente (26 °C; 75 % UR)	0	2,38 ± 0,27 ^a	2,38 ± 0,27 ^a	2,38 ± 0,27 ^a
		90	2,45 ± 0,10 ^a	2,43 ± 0,16 ^a	2,56 ± 0,09 ^a
	Acelerada (40 °C; 75 % UR)	0	2,38 ± 0,27 ^a	2,38 ± 0,27 ^a	2,38 ± 0,27 ^a
		90	2,48 ± 0,35 ^a	2,50 ± 0,13 ^a	2,52 ± 0,21 ^a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

De acordo com os resultados expressos na Tabela 15, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) nas contagens de microrganismos mesófilos totais aeróbios entre os diferentes tempos de armazenamento (0 e 90 dias), tipos de embalagem (PEAD, PLA e PET + PE) ou condições de temperatura (ambiente: 26 °C; acelerada: 40 °C).

No início do armazenamento (tempo 0), todas as amostras apresentaram contagem média de $2,38 \pm 0,27$ log UFC/g, equivalente a aproximadamente $2,4 \times 10^2$ UFC/g, independentemente do tipo de embalagem. Após 90 dias, as contagens mantiveram-se praticamente inalteradas: sob condição ambiente, variaram de 2,38 a 2,56 log UFC/g ($2,4 \times 10^2$ a $3,6 \times 10^2$ UFC/g) e, sob condição acelerada, de 2,48 a 2,52 log UFC/g ($3,0 \times 10^2$ a $3,3 \times 10^2$ UFC/g).

Essa baixa variação entre os tempos e condições demonstra que não houve crescimento microbiano ao longo do armazenamento, evidenciando a eficiência do processo de secagem e a eficácia das embalagens na proteção contra a umidade. Mesmo na condição acelerada, o leve aumento das médias não foi significativo, o que reforça que a temperatura de 40 °C não favoreceu a multiplicação microbiana. Esse comportamento pode ser explicado pelos baixos valores de atividade de água ($a_w < 0,60$) e de umidade residual, que limitam a atividade metabólica dos microrganismos aeróbios e garantem a estabilidade microbiológica do pó.

Além disso, observou-se ausência de *Staphylococcus aureus* e coliformes totais em 1 g de produto em todas as amostras, tempos e condições, confirmando a segurança microbiológica do material. Esses resultados estão plenamente em conformidade com a Resolução RDC nº 907, de 19 de setembro de 2024, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que estabelece os critérios microbiológicos para produtos cosméticos. Segundo o Art. 31, os produtos classificados

como Tipo II, suscetíveis à contaminação microbiana, devem apresentar contagem máxima de microrganismos mesófilos totais de 10^3 UFC/g ou mL, admitindo-se até 5×10^3 UFC/g ou mL, e ausência de *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* e coliformes totais e fecais em 1 g ou mL de produto (Brasil, 2024).

Portanto, o pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* manteve-se dentro dos limites regulamentares e microbiologicamente estável durante todo o período experimental, tanto sob condição ambiente quanto acelerada. Dessa forma, conclui-se que esse material apresentou alta estabilidade microbiológica, corroborando a eficiência do processo de desidratação e das embalagens utilizadas. O controle rigoroso da umidade e da atividade de água foi determinante para garantir a qualidade e segurança microbiológica do produto, em consonância com os padrões estabelecidos pela RDC nº 907/2024 da ANVISA.

3.3. Modelagem para predição da vida útil

3.3.1. Modelagem cinética

A modelagem cinética é amplamente empregada para descrever as alterações físico-químicas que ocorrem em produtos desidratados durante o armazenamento, permitindo compreender os mecanismos de degradação e estimar a vida útil sob diferentes condições de temperatura (Kamble *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2022; Gül *et al.*, 2025). Em geral, as variações nos parâmetros da qualidade seguem modelos de reação de ordem zero ou de primeira ordem, os quais descrevem a relação entre o tempo de armazenamento e a taxa de variação do parâmetro em estudo (Xing *et al.*, 2025; Liao *et al.*, 2024).

No presente trabalho, a modelagem cinética foi aplicada aos parâmetros que apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) em função do tempo e da temperatura de armazenamento, conforme demonstrado na Tabela 1. Assim, foram considerados o teor de umidade, a atividade de água (a_w), a variação total de cor (ΔE), o parâmetro de cor b^* , o pH, o índice de solubilidade em água (ISA) e a densidade aparente.

Os parâmetros cinéticos estimados para cada variável da qualidade nas diferentes temperaturas de armazenamento encontram-se apresentados na Tabela 16, incluindo a constante da taxa de degradação (k), o coeficiente de determinação (R^2), o erro quadrático médio (RMSE) e o erro percentual médio absoluto (P%) para os modelos de ordem zero e de primeira ordem. A escolha do modelo cinético mais adequado baseou-se na análise conjunta dos critérios de ajuste, adotando-se como referência o maior R^2 e os menores valores de RMSE e P% (Liao *et al.*, 2024; Xing *et al.*, 2025).

Tabela 16

Parâmetros cinéticos e critérios de ajuste para os modelos de ordem zero e primeira ordem.

Parâmetro	Embalagem	T °C	Ordem zero					Primeira ordem				
			k	R ²	ΣR ²	RMSE	P (%)	k	R ²	ΣR ²	RMSE	P (%)
Atividade de água (a _w)	PEAD	26	0,00114	0,911	1,824	0,022	4,778	0,00297	0,885	1,767	0,025	5,599
		40	0,00148	0,913		0,028	5,691	0,00368	0,882		0,033	7,017
	PLA	26	0,00137	0,925	1,870	0,021	4,301	0,00349	0,902	1,821	0,026	5,328
		40	0,00174	0,945		0,022	4,144	0,00427	0,919		0,028	5,567
	PET+PE	26	0,00152	0,926	1,848	0,026	5,467	0,00375	0,895	1,783	0,032	6,904
		40	0,00176	0,922		0,031	6,068	0,00425	0,888		0,038	7,737
pH	PEAD	26	-0,00152	0,941	1,905	0,014	0,241	-0,000307	0,941	1,905	0,014	0,233
		40	-0,00224	0,964		0,014	0,235	-0,000452	0,964		0,014	0,237
	PLA	26	-0,00133	0,903	1,868	0,013	0,230	-0,000268	0,902	1,865	0,013	0,228
		40	-0,00324	0,965		0,024	0,340	-0,000660	0,963		0,025	0,349
	PET+PE	26	-0,00260	0,960	1,931	0,020	0,329	-0,000528	0,961	1,932	0,020	0,321
		40	-0,00338	0,971		0,018	0,244	-0,000690	0,971		0,017	0,251
Índice de solubilidade em água (ISA)	PEAD	26	-0,0603	0,933	1,868	0,761	1,548	-0,00157	0,936	1,863	0,695	1,349
		40	-0,1210	0,935		1,127	2,028	-0,00333	0,927		1,318	2,225
	PLA	26	-0,0944	0,922	1,874	0,845	1,482	-0,00253	0,919	1,818	0,921	1,459
		40	-0,1210	0,952		0,875	1,989	-0,00330	0,899		1,039	2,285
	PET+PE	26	-0,1380	0,924	1,910	1,259	2,177	-0,00392	0,915	1,891	1,507	2,620
		40	-0,1750	0,986		0,650	1,239	-0,00524	0,976		1,080	2,064

Teor de umidade ($X_{b,u.}$)	PEAD	26	0,0243	0,940	1,916	0,237	3,979	0,00588	0,914	1,893	0,336	5,845
		40	0,0307	0,976		0,146	2,304	0,00703	0,979		0,183	3,176
	PLA	26	0,0323	0,970	1,900	0,205	3,054	0,00725	0,948	1,835	0,359	5,819
		40	0,0374	0,930		0,437	5,888	0,00799	0,887		0,668	9,987
	PET+PE	26	0,0341	0,966	1,868	0,268	4,239	0,00742	0,941	1,793	0,465	7,899
		40	0,0431	0,902		0,656	8,693	0,00847	0,852		0,991	14,786
Densidade aparente	PEAD	26	-0,000023	0,965	1,911	0,00017	0,0226	-0,000041	0,965	1,911	0,00018	0,0225
		40	-0,000226	0,946		0,00193	0,2965	-0,000413	0,946		0,00194	0,2944
	PLA	26	-0,000057	0,956	1,935	0,00042	0,0643	-0,000104	0,956	1,935	0,00042	0,0657
		40	-0,000251	0,979		0,00149	0,1953	-0,000460	0,979		0,00151	0,1935
	PET+PE	26	-0,000103	0,951	1,836	0,00114	0,1511	-0,000187	0,951	1,835	0,00116	0,1530
		40	-0,000328	0,885		0,00410	0,6489	-0,000604	0,884		0,00410	0,6450
b*	PEAD	26	0,0083	0,999	1,957	0,352	1,783	0,00012	0,999	1,961	0,122	0,713
		40	0,0132	0,958		0,112	0,572	0,00092	0,962		0,107	0,534
	PLA	26	0,0116	0,992	1,955	0,043	0,225	0,00081	0,994	1,960	0,038	0,196
		40	0,0193	0,963		0,157	0,784	0,00131	0,970		0,140	0,705
	PET+PE	26	0,0186	0,999	1,962	0,009	0,050	0,00127	0,999	1,975	0,007	0,035
		40	0,0477	0,963		0,388	1,795	0,00300	0,976		0,304	1,378

De maneira geral, os valores de R^2 obtidos foram elevados (superiores a 0,90 na maior parte das combinações de embalagem e temperatura), acompanhados de RMSE inferiores a 1 e P% abaixo de 10, o que reforça a qualidade dos ajustes e confirma a robustez dos modelos cinéticos empregados. Esses critérios são amplamente reconhecidos na literatura como indicadores de ajuste satisfatório em estudos de estabilidade de produtos desidratados (Kamble *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2022; Gül *et al.*, 2025).

A análise integrada desses indicadores demonstrou que a atividade de água (a_w) e o teor de umidade ($X_{b,u}$) foram consistentemente melhor ajustados pelo modelo cinético de ordem zero em todas as embalagens avaliadas (PEAD, PLA e PET+PE). O valor positivo da constante k para ambos os parâmetros em todas as condições indica um ganho progressivo de umidade e de a_w pelo produto ao longo do armazenamento, sendo o aumento da taxa de degradação a 40 °C um indicativo de maior permeabilidade das embalagens à umidade sob condições aceleradas.

O modelo de ordem zero também se mostrou o mais adequado para descrever a cinética de alteração do pH, da densidade aparente e do índice de solubilidade em água (ISA). Os valores negativos de k observados para o pH e o ISA indicam, respectivamente, um aumento da acidez e uma redução da solubilidade do produto ao longo do tempo, comportamento coerente com a oxidação de constituintes residuais e a perda de integridade da matriz seca (Kamble *et al.*, 2020; Xing *et al.*, 2025).

Por outro lado, o parâmetro de cor b^* (intensidade amarela) apresentou melhor ajuste ao modelo de primeira ordem, conforme indicado pelos maiores valores de R^2 e pelos menores RMSE e P%. O valor positivo de k reflete o aumento gradual da tonalidade amarela, associado à formação de pigmentos de escurecimento não enzimático e à oxidação de compostos residuais, fenômenos frequentemente relatados durante o armazenamento de materiais biológicos desidratados (Yin *et al.*, 2022; Gül *et al.*, 2025).

A variação total de cor (ΔE), entretanto, apresentou desempenho insatisfatório em ambos os modelos, com valores de R^2 inferiores a 0,70 e RMSE e P% elevados. Por esse motivo, ΔE não foi incluída na avaliação cinética, uma vez que não segue uma cinética simples de ordem zero ou primeira ordem. Esse comportamento sugere que múltiplos mecanismos de degradação atuam simultaneamente, tornando o parâmetro inadequado para fins de predição de vida útil.

3.3.2. Modelo de Arrhenius

A dependência da constante da taxa de degradação (k) em relação à temperatura de armazenamento foi descrita pelo modelo de Arrhenius, que estabelece uma relação logarítmica linear entre $\ln(k)$ e o inverso da temperatura absoluta ($1/T$) (Yin *et al.*, 2022; Gül *et al.*, 2025).

Os valores de k obtidos para os modelos mais ajustados (Tabela 16), de ordem zero para $X_{b,u}$, a_w , pH, ISA e densidade aparente, e de primeira ordem para b^* , foram utilizados para determinar a energia de ativação (E_a) e o fator pré-exponencial (k_0), conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17

Equação de Arrhenius de diferentes índices da qualidade e parâmetros cinéticos.

Parâmetro	Embalagem	Equação de Arrhenius	E_a (kJ/ mol)	k_0
Atividade de água (a_w)	PEAD	$\ln(k) = -1812,64 (1/T) - 0,73$	15,700	0,482
	PLA	$\ln(k) = -1660,21 (1/T) - 1,06$	14,371	0,346
	PET+PE	$\ln(k) = -1018,06 (1/T) - 3,10$	8,812	0,045
pH	PEAD	$\ln(k) = -2692,78 (1/T) + 2,49$	23,309	12,064
	PLA	$\ln(k) = -6183,33 (1/T) + 13,99$	53,523	$1,19 \times 10^6$
	PET+PE	$\ln(k) = -1821,94 (1/T) + 0,12$	15,771	1,127
Índice de solubilidade em água (ISA)	PEAD	$\ln(k) = -4836,53 (1/T) + 13,32$	41,865	$6,08 \times 10^5$
	PLA	$\ln(k) = -1723,96 (1/T) + 3,39$	14,922	29,678
	PET+PE	$\ln(k) = -1649,51 (1/T) + 3,52$	14,278	33,795
Teor de umidade ($X_{b,u}$)	PEAD	$\ln(k) = -1623,54 (1/T) + 1,70$	14,053	5,474
	PLA	$\ln(k) = -1018,12 (1/T) - 0,04$	8,813	0,961
	PET+PE	$\ln(k) = -1626,60 (1/T) + 2,04$	14,080	7,689
Densidade aparente	PEAD	$\ln(k) = -15868,33 (1/T) + 42,22$	137,357	$2,20 \times 10^{18}$
	PLA	$\ln(k) = -10257,99 (1/T) + 24,43$	88,794	$4,08 \times 10^{10}$
	PET+PE	$\ln(k) = -8043,61 (1/T) + 17,64$	69,626	$4,58 \times 10^7$
b^*	PEAD	$\ln(k) = -14145,00 (1/T) + 38,13$	122,440	$3,65 \times 10^{16}$
	PLA	$\ln(k) = -3338,54 (1/T) + 4,01$	28,900	55,155
	PET+PE	$\ln(k) = -5969,44 (1/T) + 13,23$	51,672	$5,55 \times 10^5$

A energia de ativação (E_a) é um parâmetro fundamental na modelagem cinética, pois expressa a energia mínima necessária para que uma reação de degradação ocorra. Em produtos desidratados, esse parâmetro é amplamente empregado como um indicador da sensibilidade térmica dos componentes, refletindo o grau em que a taxa de degradação é influenciada pela elevação da

temperatura (Ibarz; Garvin; Ibarz, 2017; Giannakourou *et al.*, 2025). Dessa forma, valores mais altos de E_a indicam maior estabilidade térmica, uma vez que as reações exigem maior aporte energético para ocorrer, enquanto valores baixos revelam processos facilmente acelerados pelo calor, característicos de mecanismos controlados por difusão de umidade ou oxidação superficial (Choosuk *et al.*, 2022; Kim; Kim; Kim, 2022).

Nos resultados apresentados na Tabela 17, observou-se ampla variação dos valores de E_a entre os diferentes parâmetros da qualidade e tipos de embalagem, o que reflete a existência de comportamentos cinéticos distintos. As menores energias de ativação foram observadas para a atividade de água (a_w) e o teor de umidade ($X_{b.u.}$), variando entre 8,81 e 15,70 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, especialmente nas amostras acondicionadas em PET+PE. Esses valores reduzidos indicam que pequenos incrementos de temperatura são suficientes para intensificar a mobilização e adsorção de umidade, evidenciando a alta sensibilidade higroscópica e a menor estabilidade físico-química do produto sob condições de armazenamento acelerado.

O pH e o índice de solubilidade em água (ISA) apresentaram valores intermediários de E_a , variando de 14,27 a 53,52 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, o que indica estabilidade térmica moderada desses parâmetros. As amostras embaladas em PLA destacaram-se pelo maior valor de E_a para o pH (53,52 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), sugerindo maior resistência às alterações químicas que reduzem o pH, possivelmente devido à menor difusão de gases oxidantes, como o oxigênio, através dessa embalagem. De forma semelhante, o ISA apresentou valores mais elevados de E_a nas amostras em PEAD (41,86 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), o que indica menor tendência à perda de solubilidade ao longo do tempo. Tal comportamento pode ser atribuído à maior integridade estrutural da matriz seca, que preserva a dispersibilidade das partículas no meio aquoso. Resultados comparáveis foram observados por Madhu *et al.* (2021) e El-Mesery *et al.* (2024), que relataram redução da solubilidade e do pH em pós alimentares armazenados em materiais de baixa barreira, em decorrência da oxidação de constituintes protéicos e da formação de compostos ácidos durante o armazenamento.

Em contrapartida, os maiores valores de E_a foram obtidos para os parâmetros b^* (intensidade amarela) e densidade aparente, variando entre 69,63 e 137,36 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, o que denota maior resistência térmica e menor sensibilidade às variações de temperatura. Essa diferença está relacionada à natureza estrutural mais complexa desses parâmetros, uma vez que tanto a densidade quanto a cor dependem de rearranjos estruturais e reações químicas lentas, como o escurecimento não enzimático e a oxidação de compostos residuais. Essas transformações requerem maior aporte energético para ocorrer, justificando as elevadas E_a observadas (Arepally *et al.*, 2020).

A variação dos valores de E_a entre os tipos de embalagem reforça a influência do material de acondicionamento sobre a estabilidade térmica. As amostras embaladas em PEAD apresentaram, em geral, as maiores energias de ativação, seguidas por PLA e PET+PE, confirmando que materiais

de menor permeabilidade ao vapor d'água e maior barreira ao oxigênio são mais eficientes em retardar trocas de umidade e, consequentemente, processos de degradação térmica (Akbar *et al.*, 2025; Forsido *et al.*, 2021). Tendência semelhante foi descrita por Madhu *et al.* (2021), que observaram aumento da E_a e prolongamento da vida útil de alhos desidratados embalados em filmes multicamadas de alta barreira.

Além da E_a , o fator pré-exponencial (k_0) também contribui para a interpretação dos resultados, representando a frequência de colisões moleculares eficazes e a complexidade do mecanismo de degradação (Ibarz; Garvin; Ibarz, 2017). Verificou-se que parâmetros com E_a mais elevadas, como a densidade aparente e o b^* , apresentaram também valores mais altos de k_0 , o que sugere mecanismos reacionais multietapas, envolvendo rearranjos estruturais e reorganização molecular da matriz. Essa relação direta entre E_a e k_0 , conhecida como efeito de compensação cinética, é amplamente documentada em estudos de estabilidade de produtos secos e liofilizados (Ibarz; Garvin; Ibarz, 2017; Labuza; Saguy; Taoukis, 1997).

Sendo assim, os resultados indicam que o comportamento cinético do pó de *Saccharomyces cerevisiae* é determinado pela natureza do parâmetro de qualidade e pelo tipo de embalagem. A combinação de E_a e k_0 reduzidos para a_w e $X_{b,u}$ indica mecanismos governados por difusão de umidade e adsorção superficial, enquanto as altas E_a e k_0 observadas para densidade aparente e b^* refletem transformações estruturais complexas, típicas da degradação térmica em matrizes proteicas desidratadas. Os valores intermediários de E_a obtidos para o pH e o ISA sugerem que esses parâmetros sofrem influência simultânea de reações químicas e estruturais moderadas. Em conjunto, os resultados reforçam que a atividade de água e o teor de umidade são os parâmetros limitantes da estabilidade do produto, devendo ser priorizados na modelagem e predição da vida útil.

3.3.3. Predição da vida útil (*shelf life*)

A predição da vida útil (*shelf life*) constitui uma etapa fundamental da modelagem cinética, pois permite estimar o período durante o qual o produto mantém suas características de qualidade dentro dos padrões aceitáveis. No presente estudo, a vida útil do pó de *Saccharomyces cerevisiae* foi determinada a partir dos modelos cinéticos de ordem zero, selecionados em função dos maiores valores de ΣR^2 , bem como dos menores valores de RMSE e P%, e calculados segundo a Eq. 16. A modelagem foi aplicada aos parâmetros críticos de estabilidade, atividade de água (a_w) e teor de umidade ($X_{b,u}$), que, de acordo com os resultados obtidos, destacaram-se como os principais indicadores de deterioração do produto e os mais sensíveis às variações de temperatura e às propriedades de barreira das embalagens (Kamble *et al.*, 2020; Madhu *et al.*, 2021).

Para a determinação da vida útil, adotaram-se como limites de qualidade aceitáveis os valores de 0,60 para a atividade de água (a_w) e 12% para o teor de umidade ($X_{b,u}$). O limite de a_w foi estabelecido com base em critérios de estabilidade microbiológica amplamente descritos na literatura, uma vez que valores inferiores a 0,60 impedem o crescimento de microrganismos deteriorantes e patogênicos, garantindo a segurança e a estabilidade do produto durante o armazenamento (Zang *et al.*, 2024; Bashir *et al.*, 2022).

O limite de teor de umidade, por sua vez, foi definido a partir da análise das isotermas de adsorção, nas quais se observou que, ao atingir uma atividade de água próxima de 0,62, o teor de umidade em base úmida alcançou aproximadamente 12%. Esse ponto foi considerado o limiar crítico de estabilidade, a partir do qual o material passa a apresentar maior higroscopicidade e redução da estabilidade físico-estrutural, favorecendo o início de fenômenos de aglomeração, colapso da matriz e perda de fluidez (Arepally *et al.*, 2020; El-Mesery *et al.*, 2024).

Com base nesses critérios, a Tabela 18 apresenta os resultados da predição da vida útil do pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* nas duas temperaturas de armazenamento avaliadas (26 °C e 40 °C) e nos diferentes tipos de embalagem estudados.

Tabela 18

Predição da vida útil do pó de *Saccharomyces cerevisiae* com base na modelagem cinética de ordem zero.

Parâmetro	Embalagem	T (°C)	Predição de vida útil (meses)
Atividade de água (a_w)	PEAD	26	11
		40	8
	PLA	26	9
		40	7
	PET+PE	26	7
		40	6
Teor de umidade ($X_{b,u}$)	PEAD	26	12
		40	10
	PLA	26	9
		40	7
	PET+PE	26	9
		40	8

A partir dos resultados apresentados na Tabela 18, verificou-se que a vida útil predita para o pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae* variou entre 6 e 12 meses, dependendo da temperatura

de armazenamento e do tipo de embalagem utilizado. Essa variação confirmou que tanto a temperatura quanto às propriedades de barreira do material de acondicionamento exerceram influência direta sobre a estabilidade físico-química do produto ao longo do tempo.

O aumento da temperatura de 26 °C para 40 °C reduziu a vida útil em aproximadamente 25 % a 35 %, tanto para a atividade de água quanto para o teor de umidade, demonstrando a forte dependência térmica dos processos de adsorção de umidade. Esse comportamento esteve em concordância com o modelo de Arrhenius discutido anteriormente, segundo o qual a elevação da temperatura acelera a difusão de vapor d'água e as reações de degradação associadas à oxidação e à reorganização estrutural da matriz seca (Yin *et al.*, 2022; Giannakourou *et al.*, 2025).

Entre as embalagens avaliadas, o PEAD (polietileno de alta densidade) apresentou o melhor desempenho, com vida útil estimada de 11 meses a 26 °C e 8 meses a 40 °C para o parâmetro a_w , e de 12 e 10 meses, respectivamente, para o teor de umidade. Esse resultado evidenciou a superior capacidade de barreira do PEAD, atribuída à sua estrutura semicristalina compacta, baixa polaridade e reduzida permeabilidade ao vapor d'água (Forsido *et al.*, 2021; Madhu *et al.*, 2021). Dessa forma, o uso desse material mostrou-se o mais adequado para o armazenamento prolongado do pó, especialmente em condições ambientais com elevada umidade relativa.

O PLA (polietileno laminado de alumínio) apresentou desempenho intermediário, com vida útil variando de 7 a 9 meses, dependendo da temperatura e do parâmetro avaliado. Embora esse tipo de material ofereça boa resistência mecânica e moderada barreira à umidade, sua estabilidade foi inferior à do PEAD, possivelmente devido a descontinuidades interlaminares e microdefeitos de selagem, que favoreceram a difusão de vapor d'água, principalmente sob temperatura elevada (Akbar *et al.*, 2025; El-Mesery *et al.*, 2024).

Por sua vez, a embalagem PET + PE apresentou as menores estimativas de *shelf life*, entre 6 e 9 meses, sugerindo que a laminação entre as camadas não ofereceu isolamento total contra a umidade. Pequenas falhas estruturais ou diferenças de coesão entre as interfaces podem ter favorecido o ganho de umidade e reduzido a eficiência global de barreira (El-Mesery *et al.*, 2024).

Ao comparar os parâmetros de estabilidade, observou-se que o teor de umidade ($X_{b,u}$) apresentou valores de vida útil ligeiramente superiores aos da atividade de água (a_w), independentemente da embalagem ou da temperatura. Essa diferença reforçou que a a_w foi o parâmetro mais sensível às mudanças ambientais, respondendo mais rapidamente às trocas de umidade com o meio, enquanto o $X_{b,u}$ refletiu uma resposta mais lenta e cumulativa.

Em conjunto, os resultados demonstraram que a estabilidade do pó de *Saccharomyces cerevisiae* dependeu fortemente da temperatura e da barreira à umidade proporcionada pela embalagem. O desempenho superior do PEAD confirmou sua adequação para o acondicionamento

de materiais desidratados sensíveis, enquanto a redução progressiva da vida útil em temperaturas elevadas evidenciou a necessidade de controle rigoroso das condições de armazenamento. Esses achados corroboraram os estudos de Arepally *et al.* (2020) e Kamble *et al.* (2020), que destacaram a importância do controle da atividade de água e da escolha de materiais de embalagem como fatores determinantes para a longevidade e a qualidade de produtos biológicos desidratados.

4. Conclusão

O estudo permitiu compreender o comportamento de estabilidade do pó da biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae* obtido por secagem em camada de espuma, fornecendo subsídios para a estimativa da vida útil e a definição de condições adequadas de armazenamento. O tempo de estocagem foi o principal fator de degradação, seguido pela temperatura e pelo tipo de embalagem. Entre os materiais testados, o PEAD apresentou a melhor barreira ao vapor d'água, resultando em menores variações de atividade de água e teor de umidade, enquanto PLA e PET+PE exibiram desempenho intermediário. O produto manteve-se microbiologicamente seguro durante todo o período experimental. A modelagem cinética indicou comportamento predominantemente de ordem zero para atividade de água e teor de umidade, permitindo projetar vida útil de aproximadamente 12 meses para o pó acondicionado em PEAD sob condição ambiente. Esses resultados demonstram a eficiência da secagem em camada de espuma e da seleção adequada de embalagens na produção de pós estáveis, reforçando o potencial de valorização de resíduos fermentativos para aplicações cosméticas e outras áreas.

Referências

- AKBAR, U.; MONDOL, M. S. A.; SINGH, J.; RASANE, P.; NANDA, V.; ABDI, G.; KAUR, S. Effects of various packaging materials and temperature conditions on the storage stability of *Zea mays* L. (baby corn) powder. **Applied Food Research**, v. 5, n. 1, p. 100913, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100913>.
- AKTAŞ, N. Moisture Adsorption Isotherms and Adsorption Isosteric Heat of Dry Ground Meat. **Gida/The Journal of Food**, v. 47, n. 5, p. 717–728, 2022. <https://doi.org/10.15237/gida.GD22043>.
- ALMEIDA, D. T.; VIANA, T. V.; COSTA, M. M.; SILVA, C. S.; FEITOSA, S. Effects of different storage conditions on the oxidative stability of crude and refined palm oil, olein and stearin (*Elaeis guineensis*). **Food Science and Technology**, v. 39, n. 1, p. 211–217, 2019. <https://doi.org/10.1590/fst.43317>.
- AREPALLY, D.; REDDY, R. S.; GOSWAMI, T. K. Encapsulation of *Lactobacillus acidophilus* NCDC 016 cells by spray drying: characterization, survival after *in vitro* digestion, and storage stability. **Food & Function**, v. 11, n. 10, p. 8694–8706, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0FO01394C>.

BARDEN, L.; DECKER, E. A. Lipid Oxidation in Low-moisture Food: A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 56, n. 15, p. 2467–2482, 2016. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.848833>.

BASHIR, O.; HUSSAIN, S. Z.; AMEER, K.; AMIN, T.; BEENISH; AHMED, I. A. M.; ALJOB AIR, M. O.; GANI, G.; MIR, S. A.; AYAZ, Q.; NAZIR, N. Influence of Anticaking Agents and Storage Conditions on Quality Characteristics of Spray Dried Apricot Powder: Shelf Life Prediction Studies Using Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) Model. **Foods**, v. 12, n. 1, p. 171, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods12010171>.

BRASIL. Resolução - RDC Nº 907, de 19 de setembro de 2024. **Diário Oficial da União, Brasília, DF**, 19 de setembro de 2024. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-907-de-19-de-setembro-de-2024-585939539>>. Acesso em: 08 abr. 2025.

CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDAL, J. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5, n. 4, p. 420–428, 2005.

CHATURVEDI, S.; CHAKRABORTY, S. Effect of temperature and packaging materials on the shelf-life stability and in vitro properties of microencapsulated and spray-dried synbiotic legume-based instant beverage powder. **Sustainable Food Technology**, v. 2, n. 1, p. 162–174, 2024. <https://doi.org/10.1039/d3fb00094j>.

CHOOSUK, N.; MEESUK, P.; RENUMARN, P.; PHUNGAMNGOEN, C.; JAKKRANUHWAT, N. Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. **Processes**, v. 10, n. 7, p. 1392, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10071392>.

CIURZYŃSKA, A.; JANOWICZ, M.; KARWACKA, M.; ZWIERZCHOWSKI, J.; GALUS, S.; The Influence of Storage Conditions and Gelatin Concentration on Changes in Selected Physical Properties of Freeze-Dried Coated Carrot Bars. **Gels**, v. 11, n. 10, p. 788, 2025. <https://doi.org/10.3390/gels11100788>.

DENG, P.; ZHANG, Y.; DENG, Q.; SUN, Y.; LI, Y.; WANG, Z.; JIANG, F. Multifunctional sodium alginate-based self-healing edible cross-linked coating for banana preservation. **Food hydrocolloids**, v. 151, p. 109753–109753, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109753>.

EL HOSRY, L.; ELIAS, V.; CHAMOUN, V.; HALAWI, M.; CAYOT, P.; NEHME, A.; BOU-MAROUN, E. Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications: A Review. **Foods**, v. 14, n. 11, p. 1881, 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14111881>.

EL-MESERY, H. S.; ADELUSI, O. A.; GHASHI, S.; NJOBEH, P. B.; HU, Z.; KUN, W. (2024). Effects of storage conditions and packaging materials on the postharvest quality of fresh Chinese tomatoes and the optimization of the tomatoes' physiochemical properties using machine learning techniques. **LWT**, v. 201, p. 116280, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116280>.

ELGHANDOUR, M. M. Y.; TAN, Z. L.; ABU HAFSA, S. H.; ADEGBEYE, M. J.; GREINER, R.; UGBOGU, E. A.; MONROY, J. C.; SALEM, A. Z. M. *Saccharomyces cerevisiae* as a probiotic feed additive to non and pseudo-ruminant feeding: a review. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, n. 3, p. 658–674, 2020. <https://doi.org/10.1111/jam.14416>.

FIKRY, M.; AL-GHAMDI, S.; ALFAIFI, B.; IBRAHIM, M. N.; ALQAHTANI, N.; UMAR, M.; ASSATARAKUL, K. Mathematical modeling of sorption isotherms and the thermodynamic properties of vacuum-dried and freeze-dried Barhi dates. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 19781, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01935-x>.

FOLCH, J.; LEES, M.; STANLEY, G. H. S. A Simple Method for the Isolation and Purification of Total Lipides from Animal Tissues. **Journal of Biological Chemistry**, v. 226, n. 1, p. 497–509, 1957. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)64849-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)64849-5).

FORSIDO, S. F.; WELELAW, E.; BELACHEW, T.; HENSEL, O. Effects of storage temperature and packaging material on physico-chemical, microbial and sensory properties and shelf life of extruded composite baby food flour. **Heliyon**, v. 7, n. 4, p. e06821, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06821>.

FU, S.; GARATE, D.; FRANCIS, A.; GARCIA, B.; HUYNH, D.; ORENGO, I. Revisão sistemática do benefício cosmético da aplicação tópica do filtrado de fermentação. **Surgical Cosmetic Dermatology**, v. 15, p. e20230166, 2023. <http://www.dx.doi.org/10.5935/scd1984-8773.2023150166>.

GENG, L.; LIU, K.; ZHANG, H. Lipid oxidation in foods and its implications on proteins. Rising Stars in Nutrition and Food Science Technology: **Food Quality and Safety**, v. 10, <https://doi.org/2023.10.3389/fnut.2023.1192199>.

GIANNAKOUROU, M. C.; SEMENOGLOU, I.; ARVANITI, M.; DERMESONLOUOGLOU, E.; TAOUKIS, P. Effect of Temperature and Water Activity on the Quality Kinetics of Packaged Fish Powder During Storage. **Food and Bioprocess Technology**, v. 18, p.8482–8497, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03931-5>.

GÜL, O.; ÖZGEÇEN, A. B.; SERT, D.; AKGÜN, A.; ATALAR, İ.; TÖRNÜK, F.; YAZICI, F. Evaluation of Moisture Sorption Isotherms and Storage Stability of Agglomerated Boza Powder. **Journal of Food Science**, v. 90, n. 7, 2025. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70404>.

IAL. Instituto Adolfo Lutz - **Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos** - 4ª Edição. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

IBARZ, R.; GARVÍN, A.; IBARZ, A. Kinetic and thermodynamic study of the photochemical degradation of patulin. **Food Research International**, v. 99, p. 348–354, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.025>.

HAILE, D. M.; DE SMET, S.; CLAEYS, E.; VOSSEN, E. Effect of light, packaging condition and dark storage durations on colour and lipid oxidative stability of cooked ham. **Journal of Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 239–247, 2011. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0352-x>.

JAKUBCZYK, E.; JASKULSKA, A. The Effect of Freeze-Drying on the Properties of Polish Vegetable Soups. **Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 654, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11020654>.

JEBRI, S.; AMRI, I.; BOUALLEG, M.; JAOUADI, R.; YAGOUBI, Y.; ZAOUALI, Y.; SLAMA, M. B.; AMRI, I.; TRABELSI, M. H.; SMETI, S. Synergistic effects of E-Beam irradiation and dried herbs powder (*Thymus capitatus*) on the physicochemical and microbiological quality of minced beef. **LWT**, v. 230, p. 118315, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118315>.

JIANG, H.; ZHANG, N.; XIE, L.; LI, G.; CHEN, L.; LIAO, Z. A Comprehensive Review of the Rehydration of Instant Powders: Mechanisms, Influencing Factors, and Improvement Strategies. **Foods**, v. 14, n. 16, p. 2883–2883, 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14162883>.

JUAREZ-ENRIQUEZ, E.; OLIVAS, G. I.; ZAMUDIO-FLORES, P. B.; PEREZ-VEGA, S.; SALMERON, L.; ORTEGA-RIVAS, E.; SEPULVEDA, D. R. A review on the influence of water on food powder flowability. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 3, p. e14031, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14031>.

KAMBLE, D. B.; SINGH, R.; KAUR, B. P.; RANI, S. Storage stability and shelf life prediction of multigrain pasta under different packaging material and storage conditions. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 8, 2020. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14585>.

KAMDI, H. S.; SIVARANJANI, S.; RAO, P. S. Effect of packaging and storage conditions on the shelf life of vacuum fried and atmospheric fried millet-based snacks. **Food and Humanity**, v. 5, p. 100781, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100781>.

KARWACKA, M.; GALUS, S.; JANOWICZ, M. Development and physicochemical characteristics of multicomponent freeze-dried snacks obtained with blackcurrant pomace powder and calcium ions as structuring agents. **Journal of Food Science and Technology**, v. 61, n. 7, p. 1363–1373, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05906-w>.

KAWAI, K.; SATO, K.; LEE, K.; KOSEKI, S. Effects of glass transition and hydration on the biological stability of dry yeast. **Journal of Food Science**, v. 86, n. 4, p. 1343–1353, 2021. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15663>.

KIM, A. N.; KIM, O. W.; KIM, H. Degradation kinetics of physicochemical and sensory properties of rice during storage at different temperatures. **LWT**, v. 164, p. 113688, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113688>.

KIM, M.-S.; YE, S.-J.; ROH, J.-H.; CHOI, H.-W.; BAIK, M.-Y. Comprehensive Analysis of Storage Stability of Hong-Jam Under Various Conditions: Correlation Between Lipid Oxidation Factors and Alternative Quality Parameters. **Foods**, v. 14, n. 9, p. 1593, 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14091593>.

KORESE, J. K.; ACHAGLINKAME, M. A.; CHIKPAH, S. K. Effect of hot air temperature on drying kinetics of palmyra (*Borassus aethiopum* Mart.) seed-sprout fleshy scale slices and quality attributes of its flour. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 6, p. 100249, 2021. [10.1016/j.jafr.2021.100249](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100249).

KORESE, J.K.; ACHAGLINKAME, M.A.; ADZITEY, F. Effect of different packaging materials on storage stability of *Gardenia erubescens* Stapf. & Hutch. dried fruits and powder. **Applied Food Research**, v. 2, p. 100143, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100143>.

KUMAR, G.; KUMAR, N.; PRABHAKAR, P. K.; KISHORE, A. Foam mat drying: Recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 26, p. 8275-8291, 2023. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2053061>.

KUMAR, N.; KACHHADIYA, S.; NAYI, P. Storage stability and characterization of biochemical, rehydration and colour characteristics of dehydrated sweet corn kernels. **Journal of Stored**

Products Research, v. 87, p. 101619, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101619>.

LABUZA, T.; SAGUY, I.; TAOUKIS, P. Kinetics of Food Deterioration and Shelf-Life Prediction. **The Editors**, v. 30, 1997.

LIAO, B.-K.; GOH, A. P.; LIO, C. I.; HSIAO, H.-I. Kinetic models applied to quality change and shelf-life prediction of fresh-cut pineapple in food cold chain. **Food Chemistry**, v. 437, p. 137803, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137803>.

MADHU, B.; MUDGAL, V. D.; CHAMPAWAT, P. S. Influence of the packaging material and storage temperature on the shelf life of garlic powder. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 11, p. 4333–4343, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04913-5>.

MAURÍCIO, E. M.; BRANCO, P.; ARAÚJO, A. L. B.; ROMA-RODRIGUES, C.; LIMA, K.; DUARTE, M. P.; FERNANDES, A. R.; ALBERGARIA, H. Evaluation of Biotechnological Active Peptides Secreted by *Saccharomyces cerevisiae* with Potential Skin Benefits. **Antibiotics**, v. 13, n. 9, 881, 2024. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13090881>.

MELO, G. M. P. C.; BOMFIM, K. S.; SILVA, P. B.; NÓBREGA, M. M. G.; NEGREIROS, J. K. S.; OLIVEIRA, B. F.; LEITE, A. C. N.; CAVALCANTE, J. A. Estudo das isotermas de adsorção do pó obtido da folha da graviola. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 10, p. 14609-14629, 2023. <https://doi.org/10.55905/oelv21n10-011>.

MORGAN, A. I.; GINETTE, L. F.; GRAHAM, R. P.; WILLIAMS, G. S. Recent developments in foam-mat drying. **Food technology**, v. 15, n. 1, p. 37-39, 1961.

MUNIANDY, A.; BENYATHIAR, P.; OZADALI, F.; MISHRA, D. K. Development of predictive model for the novel ultra-accelerated shelf-life test (UASLT) for shelf-life of packaged beverage. **LWT-Food Science and Technology**, v. 210, p. 116686, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116686>.

MURATA, M. Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction. **Glycoconjugate Journal**, v. 38, p. 283–292, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10719-020-09943-x>.

MUSSI, L. P.; PEREIRA, N. R. Storage stability of freeze-dried powder of jambolan (*Syzygium cumini* (L.)) fruits at different degrees of maturity and packages. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 25, p. e2021096, 2022. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.09621>.

NG, L. H.; LING, J. K. U.; HADINOTO, K. Formulation strategies to improve the stability and handling of oral solid dosage forms of highly hygroscopic pharmaceuticals and nutraceuticals. **Pharmaceutics**, v. 14, p. 2015, 2022. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14102015>.

NOWSAD, A. A.; AL-SHAHRIAR; HOQUE, MD. S. Biochemical properties and shelf life of value-added fish cube and powder developed from hilsa shad (*Tenualosa ilisha*). *Heliyon*, v. 7, n. 10, p. e08137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08137>.

OBADINA, A.; IBRAHIM, J.; ADEKOYA, I. Influence of drying temperature and storage period on the quality of cherry and plum tomato powder. **Food Science and Nutrition**, v. 6, p. 1146–1153, 2018. <https://doi.org/10.1002/fsn3.658>.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A.-J. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36–60, 2013.

- PINHEIRO, W. S.; SILVA, F. L. H.; CAVALCANTE, J. A.; SANTOS, S. F. M.; MELO, D. J. N.; GADELHA, B. S. O.; SANTOS, L. V. A. Secagem da biomassa de levedura *Rhodotorula glutinis* em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9437>.
- PRISACARU, A. E.; GHINES, C.; ALBU, E.; PĂDUREȚ, S. Storage Impact on the Physicochemical and Microbiological Stability of Apricot, Cherry, Raspberry, and Strawberry Jams. **Foods**, v. 14, n. 10, p. 1695, 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14101695>.
- RIBEIRO, R. A.; BOURBON-MELO, N.; SÁ-CORREIA, I. The cell wall and the response and tolerance to stresses of biotechnological relevance in yeasts. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.953479>.
- RUAN, J.; LI, M.; LIU, Y.; YE, B.; LING, C. Adsorption isotherm and thermodynamic properties of microwave vacuum dried tilapia fillets. **LWT-Food Science and Technology**, v. 166, p. 113766, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113766>.
- SCHLABITZ, C.; LEHN, D. N.; SOUZA, C. F. V. D. A review of *Saccharomyces cerevisiae* and the applications of its byproducts in dairy cattle feed: Trends in the use of residual brewer's yeast. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, p. 130059, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130059>.
- SEK, W.; KOT, A. M.; RAPOPORT, A.; KIELISZEK, M. Physiological and genetic regulation of anhydrobiosis in yeast cells. **Archives of Microbiology**, v. 205, n. 10, p. 348, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03683-w>.
- SHISHIR, M. R. I.; TAIP, F. S.; SAIFULLAH, MD.; AZIZ, N. AB.; TALIB, R. A. Effect of packaging materials and storage temperature on the retention of physicochemical properties of vacuum packed pink guava powder. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 12, p. 83–90, 2017.
- SRISUK, N.; TUDPOR, K.; JIRASATID, S. Quality evaluation of herbal tea (*Curcuma longa* Linn. and *Pandanus amaryllifolius* Roxb.) and development of predictive models for its shelf life. **LWT**, p. 117895–117895, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117895>.
- STĘPIEŃ, A.; GRZYB, K. Comparison of critical storage parameters of the powders containing soy protein isolate and inulin, based on the concepts: Water activity and Temperature of glass transition. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 230, p. 123174, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123174>.
- SUHAG, R.; KELLIL, A.; RAZEM, M. Factors Influencing Food Powder Flowability. **Powders**, v. 3, n. 1, p. 65-76, 2024. <https://doi.org/10.3390/powders3010006>.
- SURYATAPA, D.; LAKSHMISHRI, R.; ANNALAKSHMI, C.; KUMAR, P. T. Impact of domestic packaging and storage on shelflife and sensory quality of organic and conventional *Cucumis sativus* L. **Food Chemistry Advances**, v. 3, p. 100527, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100527>.
- TAN, S. L.; SULAIMAN, R.; RUKAYADI, Y.; RAMLI, N. S. Physical, chemical, microbiological properties and shelf life kinetics of spray-dried cantaloupe juice powder during storage. **LWT - Food Science and Technology**, v. 140, p. 110597, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110597>.

THAKUR, M.; NANDA, V. Effect of packaging materials and storage conditions on physico-chemical, phytochemical and microstructural properties of bee pollen enriched milk powder. **Food Chemistry Advances**, v. 4, p. 100567. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100567>.

THAKUR, M.; NANDA, V. Composition and functionality of bee pollen: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 98, p. 82–106, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.001>.

THUY, N. M.; HAO, H. V.; MINH, V. Q.; TAI, N. V.; DUONG, L. T. T.; GIAU, T. N. Foam-mat drying of lucuma powder: Mathematical and artificial modeling of drying kinetics, physicochemical and microstructural properties. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 19, p. 101656, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101656>.

UEDA, J. M.; MORALES, P.; FERNÁNDEZ-RUIZ, V.; FERREIRA, A.; BARROS, L.; CAROCHO, M.; HELENO, S. A. Powdered Foods: Structure, Processing, and Challenges: A Review. **Applied sciences**, v. 13, n. 22, p. 12496–12496, 2023. <https://doi.org/10.3390/app132212496>.

UNITED STATES PHARMACOPEIA. **General Chapter <1174> – Powder Flow**. Rockville: United States Pharmacopeial Convention, 2023. Disponível em: <<https://www.usp.org/harmonization-standards/pdg/general-chapters/powder-flow>>. Acesso em: 3 set. 2025.

VEGA-CASTRO, O.; DIEGO, V.-M.; SANTIAGO, C.-T.; LAURA, V.-M.; VALENTINA, V.-A.; DANIEL, H.-G.; FAVER, G.-N. Exploring the Potential of Spray-Dried Blackberry Powder Enriched with Zinc and Folic Acid as a Nutritional Alternative for Children and Pregnant Women. **Food Biophysics**, v. 20, n. 1, p. 11, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09892-0>.

WAZIR, H.; CHAY, S. Y.; IBADULLAH, W. Z. W.; ZAREI, M.; MUSTAPHA, N. A.; SAARI, N. Lipid oxidation and protein co-oxidation in ready-to-eat meat products as affected by temperature, antioxidant, and packaging material during 6 months of storage. **RSC Advances**, v. 11, n. 61, p. 38565–38577, 2021. <https://doi.org/10.1039/d1ra06872e>.

XING, W.; LIU, W.; LI, H.; ZENG, X.; FAN, X.; XING, S.; GONG, H. Development of predictive models for shelf-life of sweet cherry under different storage temperatures. **LWT-Food Science and Technology**, v. 217, p. 117442, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117442>.

YADAV, S.; MISHRA, S. Moisture sorption isotherms and storage study of spray-dried probiotic finger millet milk powder. **Journal of Stored Products Research**, v. 102, p. 102128, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102128>.

YIN, C.; WANG, J.; QIAN, J.; XIONG, K.; ZHANG, M. Quality changes of rainbow trout stored under different packaging conditions and mathematical modeling for predicting the shelf life. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 32, p. 100824, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100824>.

ZANG, J.; QING, M.; CHI, Y.; CHI, Y. Extending the shelf-life of whole egg powder with different packaging: Based on the multivariate accelerated shelf-life test model. **Food Chemistry**, v. 460, p. 140602, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140602>.

ZARDETTO, S.; BARBANTI, D. Shelf life assessment of fresh green pesto using an accelerated test approach. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 25, p. 100524, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100524>.

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E ESTRUTURAL DE SISTEMAS COSMÉTICOS CONTENDO PÓ DE *Saccharomyces cerevisiae* OBTIDO POR SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA.

Resumo

A valorização de subprodutos agroindustriais representa uma alternativa sustentável para o desenvolvimento de ingredientes cosméticos com alto valor agregado. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência do pó da biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*), sobre as propriedades físico-químicas, reológicas e estruturais de emulsões cosméticas do tipo cristal líquido. O pó foi produzido a partir da biomassa proveniente do processo de fermentação da cachaça e incorporado à formulação em concentração de 0,5 % (m/m). A estabilidade foi monitorada durante 28 dias sob três condições experimentais: refrigeração (5 ± 2 °C), exposição solar e estufa (50 ± 2 °C). Foram avaliados pH, viscosidade, propriedades organolépticas, parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^*), comportamento de fluxo, viscoelasticidade e microestrutura. Os resultados mostraram variações discretas de pH, mantendo-se dentro dos limites aceitáveis para formulações cutâneas, e viscosidade constante ao longo do período experimental ($p > 0,05$), indicando preservação da estrutura coloidal. As análises colorimétricas evidenciaram aumento da luminosidade (L^*) sem prejuízo estético da formulação. A microscopia óptica revelou organização lamelar típica de sistemas cristal-líquido, caracterizada por bicamadas lipídicas intercaladas por água e gotículas finamente dispersas. A análise de fluxo ajustada ao modelo de Herschel–Bulkley confirmou comportamento pseudoplástico em ambas as formulações ($0,39 \leq n \leq 0,50$; $R^2 = 0,996$), enquanto os ensaios oscilatórios demonstraram predominância do módulo elástico ($G' > G''$), refletindo estrutura coesa e boa recuperação após deformação. De forma geral, a incorporação do pó de *Saccharomyces cerevisiae* promoveu leve redução da tensão de escoamento e do índice de consistência, resultando em textura mais leve e espalhabilidade aprimorada, sem comprometer a estabilidade físico-química ou reológica. Esses achados demonstram a viabilidade do uso da biomassa residual de levedura como ingrediente funcional em emulsões dermocosméticas sustentáveis, reforçando seu potencial de aplicação na formulação de produtos de alto desempenho sensorial e baixo impacto ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: barreira da pele, biomassa residual, cristal líquido, emulsões, estabilidade.

Abstract

The valorization of agro-industrial by-products represents a sustainable approach for developing high-value cosmetic ingredients. This study aimed to evaluate the influence of *Saccharomyces cerevisiae* residual biomass powder, obtained by foam-mat drying, on the physicochemical, rheological, and structural properties of cosmetic emulsions with a liquid-crystalline organization. The powder was produced from yeast biomass derived from the cachaça fermentation process and incorporated into the formulation at 0.5% (w/w). Stability was monitored for 28 days under three experimental conditions: refrigeration (5 ± 2 °C), sunlight exposure, and oven storage (50 ± 2 °C). The parameters evaluated included pH, viscosity, organoleptic properties, color coordinates (L^* , a^* , b^*), flow behavior, viscoelasticity, and microstructure. Results showed minor variations in pH within the acceptable range for topical formulations and stable viscosity throughout the test period ($p > 0.05$), indicating preservation of colloidal structure. Colorimetric analysis revealed increased lightness (L^*) without compromising product appearance. Optical microscopy confirmed a lamellar organization typical of liquid-crystal systems, characterized by lipid bilayers intercalated with water and finely dispersed droplets. Flow analysis fitted to the Herschel–Bulkley model confirmed

pseudoplastic behavior in both formulations ($0.39 \leq n \leq 0.50$; $R^2 = 0.996$), while oscillatory tests demonstrated the predominance of the elastic modulus ($G' > G''$), indicating cohesive structure and efficient recovery after deformation. Overall, the incorporation of *Saccharomyces cerevisiae* powder slightly reduced yield stress and consistency index, resulting in a lighter texture and improved spreadability without compromising physicochemical or rheological stability. These findings demonstrate the feasibility of using residual yeast biomass as a functional ingredient in sustainable dermocosmetic emulsions, reinforcing its potential for the development of high-performance, environmentally responsible products.

KEYWORDS: emulsions; liquid crystal; residual biomass; skin barrier; stability.

INTRODUÇÃO

A valorização de subprodutos agroindustriais tem se tornado uma estratégia eficaz para reduzir impactos ambientais e otimizar o aproveitamento de recursos. No setor sucroalcooleiro, a biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, gerada durante a fermentação alcoólica da cachaça, é uma fonte promissora de compostos bioativos [1]. Embora seja comumente descartada após sucessivos ciclos fermentativos, essa levedura contém proteínas, vitaminas do complexo B, lipídios, minerais e polissacarídeos estruturais, como β -glucanas e mananas, que lhe conferem propriedades funcionais de interesse tecnológico e biológico [2,3,4].

O uso de ingredientes naturais e de origem biotecnológica tem crescido de forma expressiva na indústria cosmética, acompanhando a demanda por produtos mais seguros, eficazes e ambientalmente responsáveis [5,6]. Compostos derivados de *Saccharomyces cerevisiae* destacam-se por sua ação antioxidante, hidratante e regeneradora, além de estimularem a síntese de colágeno e fortalecerem a barreira epidérmica [7,8]. Essas propriedades fazem dessa biomassa um ingrediente de grande potencial em formulações dermocosméticas. Entretanto, para viabilizar sua aplicação, é necessário empregar métodos de conservação que assegurem a integridade química e funcional dos compostos bioativos [9,10].

Entre as técnicas utilizadas para esse fim, a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) tem se mostrado particularmente eficiente. O processo transforma um líquido ou semilíquido em uma espuma estável, que é então submetida à desidratação [11,12,13]. Essa abordagem reduz o teor de água, prolonga a estabilidade da matéria-prima e preserva suas propriedades originais. Além disso, apresenta vantagens como baixo custo, simplicidade operacional e a possibilidade de operar em temperaturas mais baixas, o que minimiza a degradação térmica e mantém a qualidade do produto [12,14,15].

Mesmo com a estabilidade conferida pela secagem, incorporar ingredientes bioativos a emulsões cosméticas continua sendo um desafio técnico, especialmente quando se busca preservar a textura e o desempenho sensorial do produto. Entre as estruturas emulsificadas mais promissoras,

destacam-se as emulsões de cristal líquido, reconhecidas por sua organização lamelar e excelente estabilidade físico-química [16,17,18]. Nesses sistemas, tensoativos e coemulsificantes se organizam em bicamadas lipídicas intercaladas por moléculas de água, formando uma rede capaz de controlar a liberação de ativos e reduzir a mobilidade das gotículas dispersas, o que resulta em consistência cremosa e aparência homogênea [19,20].

A caracterização reológica é essencial para compreender o comportamento de fluxo e a integridade estrutural dessas emulsões. Parâmetros como tensão de escoamento (τ_0), índice de consistência (K) e módulos viscoelásticos (G' e G'') fornecem informações sobre a organização interna e a estabilidade mecânica do sistema [6,21]. O modelo de Herschel–Bulkley descreve de forma adequada o comportamento pseudoplástico característico desses produtos, nos quais a viscosidade diminui sob cisalhamento e se recupera parcialmente em repouso, comportamento que assegura boa espalhabilidade e estabilidade durante o uso e o armazenamento [20,22].

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência do pó da biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma, sobre as propriedades físico-químicas, reológicas e estruturais de emulsões cosméticas do tipo cristal líquido.

MATERIAIS E MÉTODOS

Obtenção das leveduras

A levedura *Saccharomyces cerevisiae* empregada neste estudo foi obtida do pé de cuba das dornas de fermentação utilizadas no processo de produção de cachaça. A coleta ocorreu no Engenho Vitória, localizado no município de Alagoa Nova, Estado da Paraíba, Brasil (7° 01' 46.1" S; 35° 44' 17.7" W).

O material foi acondicionado em frascos plásticos, previamente higienizados, e transportado ao Laboratório de Termodinâmica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) para posterior processamento. No laboratório, a amostra foi homogeneizada e submetida ao congelamento a -18 °C, com o intuito de preservar suas propriedades físico-químicas e microbiológicas, assegurando a integridade da biomassa até sua utilização nas etapas experimentais subsequentes.

Preparo da massa celular de levedura

Para a obtenção da massa celular de levedura, a amostra descongelada foi centrifugada em equipamento (Novatecnica®, modelo NT 812, Brasil) a 5000 rpm por 5 min. Esse procedimento promoveu a separação da biomassa, originando uma massa celular concentrada e um sobrenadante

líquido. Ambas as frações foram utilizadas nas etapas subsequentes do processo de secagem em camada de espuma.

Produção da espuma

A espuma foi preparada pela combinação da massa celular de levedura concentrada com o respectivo sobrenadante, na proporção mássica de 1:2, à qual se adicionou 10% (m/m) do agente espumante Portogel® (ICE Ingredientes, Brasil). A mistura resultante foi submetida à agitação vigorosa em batedeira planetária (Arno®, modelo Deluxe Inox SX-84, Brasil) por 16 min, até atingir textura homogênea e estabilidade adequada ao processo de secagem.

Condições e procedimento de secagem

A espuma obtida foi espalhada de maneira uniforme em bandejas de zinco galvanizado, com 1 mm de espessura, fundo removível e sem bordas laterais, previamente taradas, formando uma camada de aproximadamente 5 mm de espessura.

O processo de secagem ocorreu em estufa de circulação e renovação de ar (Solab, modelo SL-102, Brasil) mantida a 60 °C, até que a variação de massa entre pesagens sucessivas fosse inferior a 0,01 g, indicando o equilíbrio de umidade [23].

Concluída a secagem, o material foi transferido para embalagens plásticas de polietileno de baixa densidade (PEBD), seladas hermeticamente e envoltas em camada de papel-alumínio, com o objetivo de protegê-lo da luz e da umidade. As amostras permaneceram acondicionadas em dessecador sob temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa de 57 ± 3 %, até ser empregada no desenvolvimento da formulação do creme facial.

Desenvolvimento de formulação cosmética contendo o pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*

O creme facial contendo o pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*), foi elaborado conforme a composição apresentada na Tabela I. A formulação foi preparada incorporando 0,5% (m/m) do pó como ingrediente ativo. Paralelamente, desenvolveu-se um creme controle, de mesma base, sem a adição do ativo, destinado à comparação das características físico-químicas e de estabilidade.

TABELA I – Composição proposta para o creme facial contendo o pó de *Saccharomyces cerevisiae*.

Fase	Matéria-prima	%
A	Água	q.s.p
	Quelante	0,01 - 0,05
	Espessante	0,15 - 0,35
B	Ativo	0,50 - 2,00
	Emoliente	3,00 - 5,00
	Conservante	0,10 - 0,15
C	Tensoativo catiônico	3,00 - 6,00
	Emulsionante	6,00 - 8,00

O preparo seguiu a metodologia de emulsificação do tipo cristal líquido [24]. A fase aquosa (A) foi aquecida entre 70 e 75 °C sob agitação constante até completa dispersão do espessante e solubilização do quelante. Em seguida, incorporou-se a fase oleosa (C), mantendo-se as condições de temperatura e agitação até o estabelecimento do sistema emulsificante.

Após o resfriamento para cerca de 45 °C, adicionou-se gradualmente a fase (B) sob agitação moderada, garantindo a uniformidade da mistura. O processo prosseguiu até o resfriamento completo, obtendo-se uma emulsão estável, homogênea e de textura leve.

Concluído o preparo, a formulação foi submetida à centrifugação (Excelsa® II, modelo 206-BL, Brasil) a 3500 rpm por 15 minutos, visando à verificação da estabilidade inicial. Esse ensaio, que simula o aumento da força gravitacional, acelera a mobilidade das partículas e permite prever eventuais instabilidades físico-químicas do sistema [25].

Análises físico-químicas da formulação cosmética

Determinação do potencial hidrogeniônico

A verificação do pH foi realizada por leitura direta das amostras em um pHmetro (Hanna Instruments, modelo HI98103, Brasil), previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,0, 7,0 e 10,0, de acordo com a metodologia descrita pelo Guia de Estabilidade de Produtos Cosméticos [25].

Viscosidade

A viscosidade foi determinada em viscosímetro rotacional (modelo NDJ-5S, China), conforme metodologia descrita pelo Guia de Estabilidade de Produtos Cosméticos [25]. As leituras foram realizadas com o spindle nº 3, mantendo-se a velocidade de rotação constante de 6 rpm.

Cor

A medição da cor das amostras ocorreu por leitura direta em colorímetro portátil (Konica Minolta, modelo CR-400, Japão), conforme o sistema de coordenadas CIELAB. Obtiveram-se os parâmetros L^* , a^* e b^* , em que L^* expressa a luminosidade (0 = preto; 100 = branco), a^* representa a variação cromática entre o verde ($-a^*$) e o vermelho ($+a^*$), e b^* indica a transição do azul ($-b^*$) para o amarelo ($+b^*$) [37].

Análise de estabilidade da formulação cosmética

Os testes de estabilidade acelerada foram realizados conforme o Guia de Estabilidade de Produtos Cosméticos da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), que orienta a avaliação da estabilidade físico-química e organoléptica de produtos cosméticos [25].

Foram monitorados os parâmetros aspecto, cor, odor, pH e viscosidade sob três condições experimentais: estufa (50 ± 2 °C), exposição à luz solar direta e refrigeração (5 ± 2 °C), durante 28 dias. As análises ocorreram nos tempos 0, 7, 14 e 28 dias. Os atributos visuais (aspecto, cor e odor) foram avaliados e classificados segundo os critérios do referido guia.

A cor também foi determinada de forma instrumental, nos dias 0 e 28, por leitura direta em colorímetro portátil (Konica Minolta, modelo CR-400, Japão), conforme descrito no item 2.2.3, obtendo-se os parâmetros L^* , a^* e b^* do sistema CIELAB, correspondentes à luminosidade, à variação verde-vermelho e azul-amarelo, respectivamente [37]. As medições de pH e viscosidade seguiram as metodologias apresentadas anteriormente [25].

Reologia

As medições reológicas ocorreram em reômetro rotacional (TA Instruments, modelo AR2000ex, EUA), comparando duas formulações: uma contendo o ativo (pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*) e outra controle (sem o ativo). Os ensaios foram conduzidos a 25 °C, empregando geometria de cone de aço inoxidável com 60 mm de diâmetro, ângulo de 1° e gap de 29 µm.

Análise de fluxo

A análise de fluxo foi realizada variando-se a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de 0,1 a 100 s⁻¹, registrando simultaneamente a tensão de cisalhamento (τ) e a viscosidade aparente (η). Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de Herschel-Bulkley (Eq. 1), com o objetivo de descrever o comportamento de fluxo das amostras e determinar os parâmetros reológicos característicos.

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 corresponde a tensão de escoamento (Pa), K é o índice de consistência ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$), γ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}) e n é o índice de comportamento de fluxo (adimensional).

Os parâmetros foram obtidos por regressão não linear utilizando o *software* OriginPro 2018 (OriginLab, Northampton, USA), e o coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para avaliar a qualidade do ajuste.

Análise viscoelástica

A caracterização viscoelástica foi conduzida em modo oscilatório, sob frequência constante de 1 Hz ($6,283 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$) e amplitude de tensão variando de 0,1 a 100 Pa. Os parâmetros módulo de armazenamento (G') e módulo de perda (G'') foram determinados em função da tensão aplicada, permitindo identificar a faixa linear viscoelástica (LVR) e o limite de escoamento (*yield point*), ponto no qual ocorre a transição do comportamento predominantemente elástico ($G' > G''$) para o comportamento viscoso ($G'' > G'$).

Microscopia óptica

A microestrutura das formulações foi analisada por microscopia óptica em microscópio biológico trinocular (Lumen®, modelo LM2200TL, Brasil), operado em campo claro, sob aumento total aproximado de $400\times$ (objetiva de $40\times$ e ocular de $10\times$). Este teste foi realizado para avaliar a microestrutura da emulsão e a formação de fases de cristal líquido na emulsão [45].

Foram avaliadas três amostras distintas: emulsão do tipo cristal líquido contendo o ativo (pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*), emulsão do tipo cristal líquido sem o ativo e uma emulsão óleo em água convencional (O/A).

Para o preparo das lâminas, uma pequena quantidade da amostra foi colocada sobre a superfície de vidro juntamente com uma gota de água destilada, a fim de facilitar a dispersão e a observação das estruturas microscópicas. Em seguida, as lâminas foram recobertas com lamínulas, evitando a formação de bolhas de ar. As observações ocorreram à temperatura ambiente, e as micrografias foram registradas por câmera acoplada ao tubo trinocular para posterior análise comparativa da morfologia e organização das fases.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de estabilidade da formulação cosmética contendo o pó da levedura *Saccharomyces cerevisiae*

A avaliação da estabilidade de emulsões é um aspecto essencial para assegurar a qualidade e o desempenho do produto, podendo ser conduzida por estudos sob condições reais de armazenamento ou testes acelerados que simulam o uso prolongado [26]. Com base nesse princípio, o comportamento físico-químico e organoléptico da emulsão contendo o pó de *Saccharomyces cerevisiae* foi monitorado durante 28 dias sob três condições experimentais: refrigeração (5 ± 2 °C), exposição direta à luz solar e aquecimento em estufa (50 ± 2 °C). Ao longo do estudo, acompanharam-se os parâmetros de pH, viscosidade, propriedades organolépticas cor e odor, apresentados nas Tabelas II a V.

pH

Os valores médios de pH da formulação ao longo do período de armazenamento, sob diferentes condições, estão apresentados na Tabela II.

TABELA II - Valores médios de pH da formulação durante o período de armazenamento.

Dia	Condição		
	Geladeira (5 ± 2 °C)	Luz solar	Estufa (50 ± 2 °C)
0	$8,30 \pm 0,05^a$	$8,44 \pm 0,02^b$	$8,44 \pm 0,03^a$
7	$8,25 \pm 0,03^a$	$8,39 \pm 0,06^{ab}$	$8,39 \pm 0,03^{ab}$
14	$8,25 \pm 0,01^a$	$8,30 \pm 0,05^a$	$8,36 \pm 0,02^{ab}$
28	$8,00 \pm 0,05^b$	$8,12 \pm 0,03^c$	$8,36 \pm 0,01^b$

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

O pH é um parâmetro fundamental na avaliação da estabilidade química de emulsões cosméticas, pois influencia diretamente as interações eletrostáticas entre as fases oleosa e aquosa. Alterações nesse valor podem modificar o balanço de cargas interfaciais e, consequentemente, afetar a coesão e a estabilidade do sistema [27]. Dessa forma, o monitoramento do pH neste estudo teve como finalidade avaliar a estabilidade química da emulsão ao longo do tempo, empregando esse parâmetro como indicativo de possíveis reações de oxidação, hidrólise ou alterações interfaciais associadas às diferentes condições de armazenamento.

Os resultados apresentados na Tabela II evidenciaram uma redução gradual do pH ao longo dos 28 dias de armazenamento, mais pronunciada nas amostras expostas à radiação solar e à temperatura elevada. Essa diferença foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), confirmando que o ambiente de armazenamento exerce influência direta sobre a estabilidade química do sistema. As

formulações submetidas à luz solar apresentaram decréscimo de pH de $8,44 \pm 0,02$ para $8,12 \pm 0,03$, enquanto aquelas mantidas em estufa a 50 ± 2 °C reduziram de $8,44 \pm 0,03$ para $8,36 \pm 0,01$.

Segundo [28], produtos cosméticos que apresentam variações de pH de até 10% podem ser considerados estáveis, desde que mantenham sua integridade físico-química. Dessa forma, as oscilações observadas neste estudo permanecem dentro dos limites aceitáveis, indicando que o sistema preservou comportamento estável mesmo sob condições de estresse térmico e luminoso.

A discreta acidificação verificada nas amostras expostas à luz e ao calor pode estar associada ao aumento da mobilidade molecular e a ajustes nas cargas elétricas interfaciais, que modificam a distribuição de íons na fase aquosa e afetam o equilíbrio ácido-base. Além disso, reações oxidativas e a degradação de componentes orgânicos sensíveis, como álcoois graxos e tensoativos não iônicos, podem gerar espécies ácidas responsáveis por pequenas variações no pH. Tendência semelhante foi relatada por [29,30,31], que observaram oscilações discretas de pH em emulsões óleo-em-água submetidas a estresse térmico e luminoso.

Por outro lado, a amostra armazenada sob refrigeração (5 ± 2 °C) manteve valores estáveis, variando de $8,30 \pm 0,05$ a $8,00 \pm 0,05$, com diferença significativa apenas entre o início e o final do período experimental ($p < 0,05$). Esse resultado indica que temperaturas mais baixas reduzem a taxa de reações químicas e preservam o equilíbrio coloidal, retardando possíveis transformações estruturais na interface. Assim, o armazenamento em condições amenas contribui para a conservação do sistema, enquanto a exposição à energia térmica e luminosa induz oscilações sutis, sem comprometer a estrutura global da emulsão.

Viscosidade

Os valores de viscosidade da formulação, determinados ao longo do período de armazenamento sob as diferentes condições avaliadas, estão apresentados na Tabela III.

TABELA III - Viscosidade da formulação durante o período de armazenamento.

Dia	Condição		
	Geladeira (5 ± 2 °C)	Luz solar	Estufa (50 ± 2 °C)
0	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$
7	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$
14	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$
28	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$	$19980 \pm 0,0^a$

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A viscosidade é um parâmetro reológico essencial na caracterização de emulsões, pois expressa a resistência ao escoamento e reflete o nível de organização da rede emulsificante responsável pela consistência do produto [32,33]. Variações nesse parâmetro geralmente sinalizam modificações estruturais que antecedem processos de instabilidade, como floculação ou coalescência. Por isso, o acompanhamento da viscosidade é amplamente utilizado para avaliar a estabilidade físico-química de formulações cosméticas, especialmente em condições de estabilidade acelerada [34].

De acordo com os resultados apresentados na Tabela III, os valores de viscosidade permaneceram constantes durante os 28 dias de ensaio, sem diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos avaliados. Essa uniformidade demonstrou que a estrutura coloidal da emulsão foi preservada, mantendo as interações entre tensoativos, álcoois graxos e agentes espessantes que conferem consistência ao sistema. Esse comportamento é característico de emulsões com estrutura lamelar de cristal líquido, nas quais as bicamadas lipídicas intercaladas por água proporcionam alta resistência à deformação e reduzem a mobilidade das gotículas dispersas [21].

Sendo assim, a estabilidade observada confirma que o sistema manteve seu arranjo estrutural durante o período de armazenamento. Além disso, a constância da viscosidade indica que a adição do pó de *Saccharomyces cerevisiae* foi compatível com a matriz emulsificante, não promovendo alterações nas propriedades físicas da formulação.

Parâmetros organolépticos

O creme facial contendo 0,5% (m/m) do pó de *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*), apresentou aspecto homogêneo, odor característico e coloração acinzentada, conforme ilustrado na Fig. 1.

FIGURA 1 – Creme facial formulado com o pó de *Saccharomyces cerevisiae* como ativo cosmético.



A inspeção visual das características organolépticas da emulsão, como aparência, cor e odor, durante o armazenamento é um método simples e direto para obter informações sobre a estabilidade física e sensorial do sistema [26]. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela IV.

TABELA IV - Avaliação organoléptica da formulação sob diferentes condições de armazenamento.

Condição	Aspecto				Cor				Odor			
	0	7	14	28	0	7	14	28	0	7	14	28
Geladeira	N	N	LM	LM	N	N	N	N	N	N	N	N
Luz solar	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
50 °C	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Legenda: N = Normal; LM = Levemente modificado.

De acordo com a Tabela IV, as amostras mantiveram seu aspecto homogêneo, coloração acinzentada e odor característico em todas as condições avaliadas, indicando boa conservação das propriedades sensoriais ao longo do período experimental. Apenas as amostras mantidas sob refrigeração (5 ± 2 °C) apresentaram leve modificação de aspecto a partir do 14º dia, percebida como aumento sutil da consistência, sem alteração de cor, odor ou viscosidade medida.

Esse comportamento pode ser atribuído à reorganização da estrutura interna da emulsão em temperaturas mais baixas. Em sistemas O/A estabilizados por tensoativos não iônicos e álcoois graxos, o resfriamento reduz a mobilidade molecular da fase contínua e favorece o empacotamento das bicamadas lamelares, conferindo textura visualmente mais firme, mas sem modificar as propriedades reológicas globais, conforme relatado por [35]. De modo semelhante, [36] observaram

que o resfriamento promove maior ordenamento das lamelas lipídicas, resultando em aspecto mais denso e estável, sem alteração significativa da viscosidade.

As formulações expostas à luz solar e à temperatura de 50 ± 2 °C não apresentaram mudanças perceptíveis, demonstrando boa resistência físico-sensorial às condições de estresse. Assim, os resultados organolépticos corroboram os parâmetros de pH e viscosidade, confirmando que a emulsão manteve integridade estrutural e aparência estável durante os 28 dias de armazenamento.

Cor

Além da avaliação visual, os parâmetros L^* (luminosidade), a^* (tonalidade avermelhada) e b^* (tonalidade amarelada) foram determinados com o intuito de complementar a observação da cor da emulsão e permitir uma descrição mais precisa das possíveis variações ocorridas durante o armazenamento. Os resultados obtidos sob as diferentes condições experimentais encontram-se apresentados na Tabela V.

Tabela V - Parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^*) da formulação sob diferentes condições de armazenamento.

Condição	L^*		a^*		b^*	
	0	28	0	28	0	28
Geladeira	$37,41 \pm 0,01^a$	$42,06 \pm 0,41^b$	$1,89 \pm 0,02^a$	$1,89 \pm 0,01^a$	$2,25 \pm 0,05^a$	$2,71 \pm 0,40^b$
Luz solar	$29,96 \pm 0,14^a$	$38,90 \pm 0,11^b$	$2,04 \pm 0,08^a$	$2,40 \pm 0,03^b$	$4,47 \pm 0,17^a$	$3,74 \pm 0,03^b$
50 °C	$34,31 \pm 0,09^a$	$35,23 \pm 0,09^b$	$2,51 \pm 0,01^a$	$2,67 \pm 0,02^b$	$3,03 \pm 0,10^a$	$4,68 \pm 0,05^b$

Os dados apresentados na Tabela V evidenciaram variações estatisticamente significativas ($p < 0,05$) após 28 dias de armazenamento, com destaque para o aumento dos valores de L^* em todas as condições avaliadas, o que indica maior claridade do creme facial. Em sistemas emulsificados, a aparência óptica, incluindo a claridade expressa por L^* , é fortemente influenciada pelo contraste de índice de refração entre as fases, assim como pelo tamanho e pela distribuição das gotículas dispersas [37]. Dessa forma, tais fatores podem explicar, em parte, o incremento observado na luminosidade ao longo do período experimental.

Sob armazenamento refrigerado (5 ± 2 °C), além do aumento de L^* , verificou-se uma elevação discreta no parâmetro b^* e manutenção de a^* , sugerindo leve intensificação do tom amarelado, sem prejuízo perceptível à aparência do produto. Nas amostras expostas à luz solar direta, observou-se incremento de L^* acompanhado de redução de b^* e aumento moderado de a^* ,

comportamento compatível com ajustes ópticos e redistribuição interna das fases decorrentes da exposição luminosa. Por sua vez, na condição de estufa (50 ± 2 °C), registrou-se aumento expressivo de b^* e elevação de a^* , indicando tendência à coloração mais amarelada e ligeiramente avermelhada sob estresse térmico. Tal comportamento está em consonância com os resultados de [38] e [39], que relatam alterações cromáticas dependentes da temperatura em sistemas emulsificados.

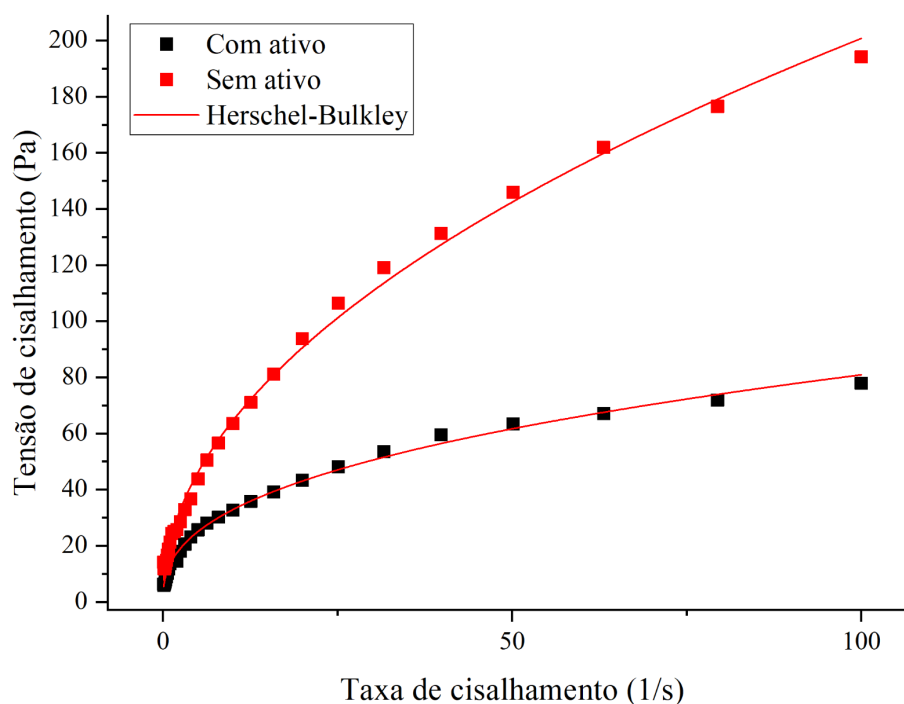
O uso do sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*) constitui metodologia amplamente consolidada para a avaliação da estabilidade cromática em emulsões e produtos cosméticos, pois permite quantificar variações de cor não perceptíveis visualmente [40]. Dessa forma, as alterações observadas foram discretas e não comprometeram o aspecto visual do creme facial, demonstrando boa estabilidade cromática ao longo do período de armazenamento.

Reologia

Análise de fluxo

Na Fig. 2 é apresentada as curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) para as emulsões com e sem a adição do ativo.

FIGURA 2 - Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), para as emulsões com e sem ativo.



De modo geral, todos os fluidos podem ser caracterizados por análises reológicas que aplicam o estresse de cisalhamento sobre o material. Durante o escoamento, diferentes forças atuam simultaneamente sobre o sistema, como forças de arrasto decorrentes do movimento das fronteiras, forças gravitacionais, forças causadas pelo gradiente de pressão e forças intermoleculares resultantes das interações entre as moléculas constituintes [6,27]. Assim, a caracterização reológica de emulsões constitui uma ferramenta essencial para a compreensão da microestrutura interna e da estabilidade cinética, permitindo correlacionar o comportamento macroscópico de fluxo com o arranjo espacial das gotículas e moléculas no sistema [20,27].

Nesse contexto, observou-se na Fig. 2 uma diferença evidente entre os perfis das amostras. A emulsão sem ativo apresentou valores mais elevados de tensão de cisalhamento (τ) em toda a faixa de taxas avaliadas, evidenciando uma estrutura interna mais rígida e resistente à deformação. Em contraste, a emulsão com ativo exibiu valores inferiores de τ , indicando maior fluidez e menor resistência ao escoamento. Esse comportamento sugere que a presença do pó de *Saccharomyces cerevisiae* atua como um modificador reológico, promovendo a redução das interações intermoleculares e o deslizamento entre as lamelas da matriz emulsificante, o que confere ao sistema maior mobilidade estrutural.

Na Tabela VI são apresentados os parâmetros obtidos pelo ajuste das curvas experimentais ao modelo de Herschel–Bulkley, amplamente utilizado para descrever fluidos com comportamento de escoamento não linear e presença de tensão inicial de escoamento [20,41].

TABELA VI – Parâmetros do modelo de Herschel–Bulkley para as emulsões cosméticas.

Amostra	τ_0 (Pa)	K (Pa $\times$ s ⁿ)	n	R ²
Com ativo	0,000	13,344	0,391	0,996
Sem ativo	1,540	19,937	0,499	0,996

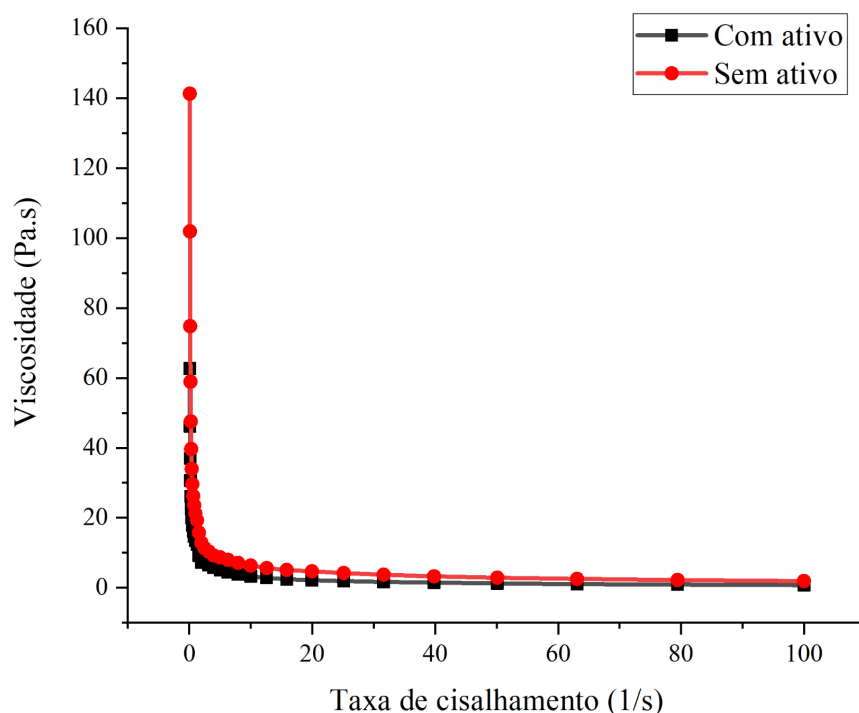
Os resultados exibidos na Tabela VI mostram que a emulsão sem ativo apresentou maior índice de consistência ($K = 19,937$ Pa·sⁿ) e tensão de escoamento ($\tau_0 = 1,540$ Pa), indicando a presença de uma rede interna mais coesa e resistente à deformação inicial. Em contrapartida, a formulação com ativo exibiu valores de $\tau_0 = 0,000$ Pa e $K = 13,344$ Pa·sⁿ, evidenciando um sistema viscoelástico mais flexível e com menor resistência ao escoamento. Essa diferença estrutural pode ser atribuída à interferência física das partículas do ativo nas interfaces óleo–água, as quais alteram o empacotamento das bicamadas lipídicas ou modificam a tensão interfacial, promovendo redução das interações entre as gotículas e resultando em um perfil de fluxo mais homogêneo e de menor resistência [42].

Além disso, o índice de comportamento de fluxo (n) apresentou valores inferiores à unidade ($0,391 \leq n \leq 0,499$) para ambas as formulações, confirmando o comportamento pseudoplástico. Esse tipo de fluido é desejável em sistemas cosméticos, pois combina alta viscosidade em repouso, que previne separação de fases, com facilidade de espalhamento durante a aplicação, uma vez que a viscosidade diminui sob cisalhamento e se recupera parcialmente após o repouso [6,43].

Por fim, o ajuste das curvas experimentais ao modelo de Herschel–Bulkley apresentou elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,996$), confirmando a adequação do modelo para descrever o comportamento de escoamento observado. De modo geral, a incorporação do pó de *Saccharomyces cerevisiae* promoveu uma leve redução na coesão interna e na resistência ao fluxo, sem comprometer a estabilidade cinética do sistema, o que se traduz em melhor espalhabilidade, textura leve e consistência uniforme, atributos essenciais para emulsões faciais de alto desempenho sensorial e estabilidade físico-química [20,44].

Na Fig. VI é ilustrado o comportamento da viscosidade aparente (η) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) para ambas as formulações.

FIGURA VI - Curvas de viscosidade aparente (η) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), para as emulsões com e sem ativo.



A análise da Fig. VI revela que ambas as emulsões, com e sem ativo, apresentaram uma redução exponencial da viscosidade aparente à medida que a taxa de cisalhamento aumentou,

comportamento típico de fluidos pseudoplásticos. Essa tendência reflete a desorganização progressiva da rede estrutural interna do sistema, acompanhada do alinhamento e orientação das cadeias poliméricas, tensoativos e cristais líquidos na direção do fluxo, o que reduz a resistência interna e facilita o escoamento [20,27].

Em baixas taxas de cisalhamento, a amostra sem ativo apresentou viscosidade inicial mais elevada (140 Pa·s), enquanto a formulação contendo o pó de *Saccharomyces cerevisiae* exibiu valores inferiores e um declínio mais gradual. Esse comportamento indica uma estrutura mais fluida e menos resistente à deformação, confirmando os resultados obtidos pelo modelo de Herschel–Bulkley e reforçando as diferenças microestruturais entre as formulações.

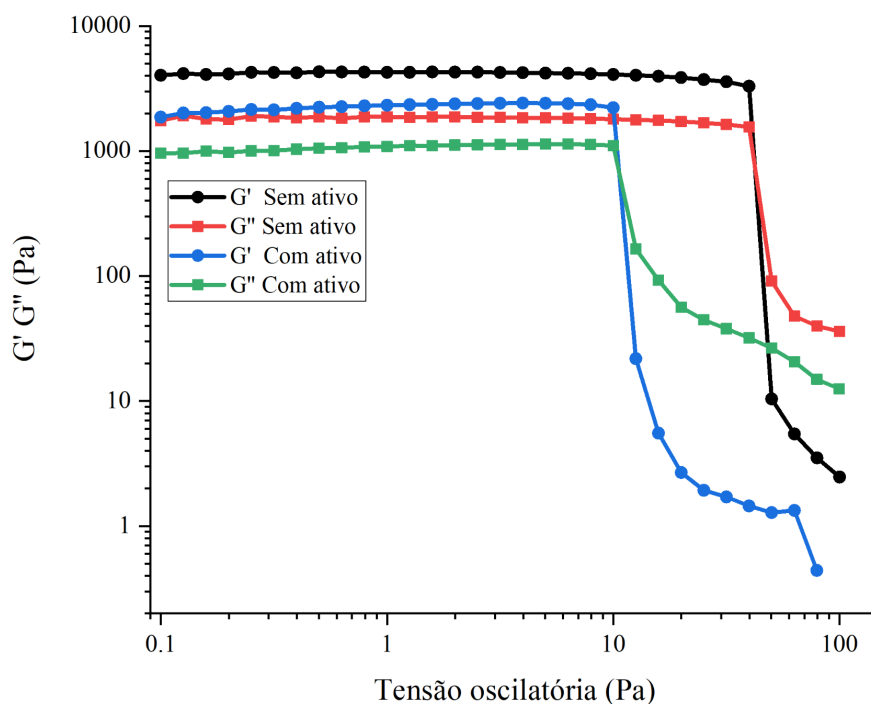
Além disso, a presença do ativo parece ter promovido uma redução da coesão lamelar e maior mobilidade molecular dentro da fase contínua, o que favorece o deslizamento das camadas internas e, conseqüentemente, proporciona melhor espalhabilidade e sensação sensorial mais leve. Esses efeitos são consistentes com observações de [6] e [43], que destacam a influência da microestrutura lamelar e das interações tensoativas sobre o perfil reológico e a percepção tátil de emulsões cosméticas.

De modo geral, o comportamento descrito reforça a natureza pseudoplástica e viscoelástica das emulsões cosméticas, nas quais a viscosidade diminui sob cisalhamento e se recupera parcialmente em repouso. Essa resposta garante boa espalhabilidade durante a aplicação e estabilidade cinética durante o armazenamento, propriedades amplamente associadas a sistemas estabilizados por tensoativos não iônicos e álcoois graxos, cuja combinação adequada confere textura cremosa, fluidez controlada e elevado desempenho sensorial [6,43].

Análise viscoelástica

A análise reológica sob cisalhamento oscilatório permite avaliar as propriedades viscoelásticas de emulsões cosméticas e compreender sua estabilidade estrutural frente à deformação mecânica. Nesta técnica, aplica-se uma deformação senoidal de pequena amplitude, da qual se obtêm os módulos de armazenamento (G') e perda (G''), que representam, respectivamente, a energia elástica armazenada e a energia viscosa dissipada pelo sistema [41]. Na Fig.VII é apresentada a variação desses módulos em função da tensão oscilatória (τ) para as formulações com e sem a incorporação do ativo.

FIGURA VII – Módulos de armazenamento (G') e perda (G'') em função da tensão oscilatória (τ) para as emulsões com e sem ativo.



Conforme descrito por [27], a relação entre G' e G'' permite distinguir o comportamento viscoelástico das emulsões. Quando o módulo de armazenamento (G') supera o módulo de perda (G''), o sistema apresenta predominância elástica, típica de sólidos viscoelásticos fracos, com textura cremosa consistente e estrutura tridimensional organizada. Em contrapartida, a condição $G'' > G'$ reflete comportamento mais fluido, associado à textura leve e espalhabilidade superior. A interseção entre as curvas G' e G'' define o ponto de ruptura estrutural, e quanto maior a distância entre esses módulos na região linear, maior é a estabilidade estrutural, uma vez que o material mantém sua integridade por mais tempo antes da fluência.

Na Fig. VII, verificou-se que em ambas as formulações, G' manteve-se superior a G'' nas menores tensões aplicadas, evidenciando predominância elástica e uma estrutura coesa e estável, típica de sistemas cosméticos com matriz lamelar organizada [6]. Essa relação entre os módulos manteve-se até a tensão crítica, indicando que as deformações impostas não provocaram desestruturação imediata da emulsão.

Com o aumento da tensão, observou-se redução gradativa de G' e G'' , caracterizando a transição do regime predominantemente elástico para o regime viscoso, associada à ruptura parcial da rede interna. A emulsão sem ativo exibiu maiores valores de G' e G'' e resistiu à deformação até tensões mais elevadas, sugerindo maior coesão e estabilidade mecânica. Por outro lado, a formulação contendo o pó de *Saccharomyces cerevisiae* apresentou valores inferiores de G' e G'' , com ruptura antecipada, indicando uma estrutura mais flexível e facilmente deformável.

Esse resultado corrobora as análises de fluxo e viscosidade, segundo as quais a adição do ativo reduziu a tensão de escoamento e o índice de consistência. Ainda assim, a predominância de

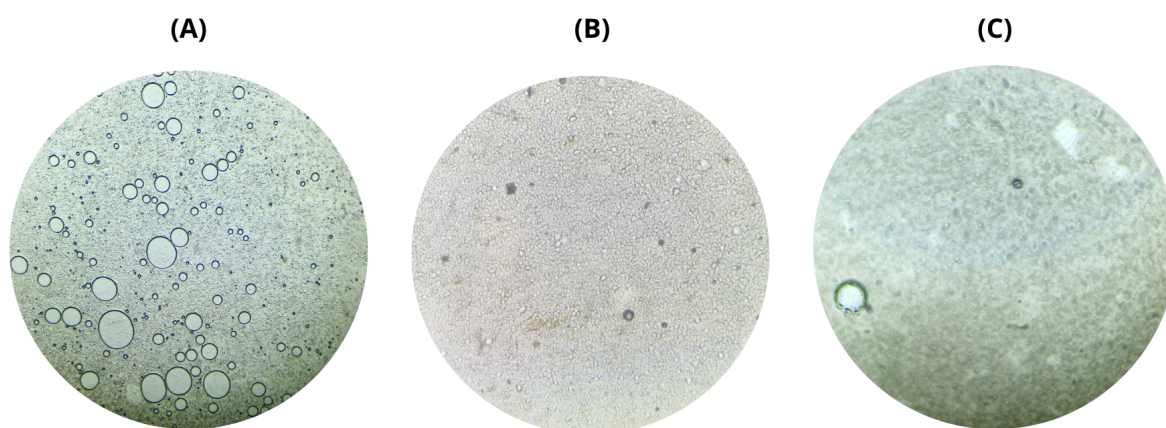
G' sobre G'' em ampla faixa de tensões indica que o sistema preservou comportamento elástico predominante e capacidade de recuperação estrutural, propriedades desejáveis para emulsões estáveis e sensorialmente equilibradas.

De forma geral, os resultados confirmam que ambas as formulações exibem comportamento viscoelástico típico de cremes estáveis, com estrutura lamelar contínua, boa resistência a deformações e espalhabilidade satisfatória. A presença do pó de *Saccharomyces cerevisiae* conferiu maior flexibilidade e leveza sensorial, sem comprometer a integridade físico-química da emulsão.

Microscopia óptica

A microestrutura das emulsões desenvolvidas foi avaliada por microscopia óptica em campo claro, permitindo observar a morfologia da fase dispersa e a organização estrutural do sistema. As micrografias ópticas obtidas estão exibidas na Fig. VII.

FIGURA VII - Microscopia óptica das formulações. (A) emulsão cristal-líquido sem o ativo; (B) emulsão cristal-líquido com o ativo; (C) emulsão óleo em água convencional (O/A).



Na formulação sem ativo (A), observou-se uma dispersão uniforme de gotículas finas, imersas em uma matriz contínua e bem estruturada. Essa configuração foi típica de sistemas estabilizados por tensoativos não iônicos combinados a álcoois graxos, cuja associação favoreceu a formação de bicamadas lamelares intercaladas por água, responsáveis pela textura cremosa e pela estabilidade físico-química do sistema [18,20].

Na amostra contendo o pó de *Saccharomyces cerevisiae* (B), verificou-se uma estrutura mais compacta, com redução no diâmetro médio das gotículas e menor contraste interfacial. Esses aspectos indicam interações entre as partículas do ativo e as bicamadas lipídicas, promovendo maior continuidade estrutural e organização do sistema. Essa microestrutura é compatível com sistemas

cosméticos que apresentam boa estabilidade físico-química, facilidade de espalhamento e comportamento reológico adequado à aplicação tópica, em concordância com os resultados reológicos, que evidenciaram redução da tensão de escoamento e manutenção da predominância elástica ($G' > G''$) [6,27].

Por sua vez, a emulsão convencional O/A (C) apresentou gotículas de dimensões variadas e distribuição heterogênea, sem indícios de ordenamento lamelar. Esse tipo de arranjo, mais desorganizado, é associado a maior mobilidade interfacial e tendência à coalescência, o que resultou em menor estabilidade cinética da formulação [43,44].

De modo geral, as observações microscópicas demonstraram que as emulsões de fase cristal-líquido, tanto com quanto sem o ativo, apresentaram estrutura lamelar bem definida, coerente com o comportamento pseudoplástico e viscoelástico descrito nas análises reológicas. A incorporação do pó de *Saccharomyces cerevisiae* contribuiu para uma dispersão mais homogênea e compacta, reforçando sua compatibilidade com a matriz emulsificante e seu potencial como ingrediente funcional em formulações cosméticas estáveis e sensorialmente equilibradas.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a incorporação do pó da biomassa residual de *Saccharomyces cerevisiae*, obtido por secagem em camada de espuma, influenciou positivamente as propriedades físico-químicas, reológicas e estruturais de emulsões cosméticas do tipo cristal líquido. A formulação manteve pH, viscosidade e aspecto estáveis sob diferentes condições de armazenamento, evidenciando a compatibilidade do ingrediente biotecnológico com a matriz emulsificante. As análises reológicas e microscópicas indicaram comportamento pseudoplástico, predominância elástica ($G' > G''$) e organização lamelar homogênea, associadas à boa estabilidade e à adequada espalhabilidade do sistema. Assim, os resultados confirmam o potencial do pó de biomassa de levedura como ingrediente funcional em emulsões cosméticas estáveis, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais.

REFERÊNCIAS

- [1] Schlabitz C, Kuhn D, Grambusch IM, Pedralli L, Jacobs W, Lehn DN, et al. Reuse of residual brewer's yeast: valorization of industrial waste as a source of nutrients for dairy cattle. *Waste Biomass Valorization*. 2024;15:5487–5499.
- [2] Elghandour MMY, Tan ZL, Abu Hafsa SH, Adegbeye MJ, Greiner R, Ugbogu EA, et al. *Saccharomyces cerevisiae* as a probiotic feed additive to non and pseudo-ruminant feeding: a review. *J Appl Microbiol*. 2020;128(3):658–674.

- [3] Fu S, Garate D, Francis A, Garcia B, Huynh D, Orengo I. Revisão sistemática do benefício cosmético da aplicação tópica do filtrado de fermentação. *Surg Cosmet Dermatol*. 2023;15:e20230166.
- [4] Maurício EM, Branco P, Araújo ALB, Roma-Rodrigues C, Lima K, Duarte MP, et al. Evaluation of biotechnological active peptides secreted by *Saccharomyces cerevisiae* with potential skin benefits. *Antibiotics*. 2024;13(9):881.
- [5] Costa GMD, Alves GA, Maia Campos PMBG. Application of design of experiments in the development of cosmetic formulation based on natural ingredients. *Int J Phytocosm Nat Ingred*. 2019;6(1):4.
- [6] Kim J, Jeong EH, Baik JH, Park JD. The role of rheology in cosmetics research: a review. *Korea-Aust Rheol J*. 2024;36:271–282.
- [7] Muthuramaligam K, Choi SI, Hyun C, Kim YM, Cho M. β -Glucan-based wet dressing for cutaneous wound healing. *Adv Wound Care*. 2019;8(4):125–133.
- [8] Yao Y, Xu B. Skin health promoting effects of natural polysaccharides and their potential application in the cosmetic industry. *Polysaccharides*. 2022;3:818–830.
- [9] Pinheiro WS, Silva FLH, Cavalcante JA, Santos SFM, Melo DJN, Gadelha BSO, et al. Secagem da biomassa de levedura *Rhodotorula glutinis* em camada de espuma. *Res Soc Dev*. 2020;9(11).
- [10] Suhag R, Kellil A, Razem M. Factors influencing food powder flowability. *Powders*. 2024;3(1):65–76.
- [11] Hossain MA, Mitra S, Belal M, Zzaman W. Effect of foaming agent concentration and drying temperature on biochemical properties of foam mat dried tomato powder. *Food Res*. 2021;5(1):291–297.
- [12] Kumar G, Kumar N, Prabhakar PK, Kishore A. Foam mat drying: recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2023;63(26):8275–8291.
- [13] Melo GMPC, Bomfim KS, Silva PB, Nóbrega MMG, Negreiros JKS, Oliveira BF, et al. Estudo das isotermas de adsorção do pó obtido da folha da graviola. *Rev Observ Econ Latinoam*. 2023;21(10):14609–14629.
- [14] Khatri B, Hamid S, Shams R, Dash KK, Shaikh AM, Béla K. Sustainable drying techniques for liquid foods and foam mat drying. *Discov Food*. 2024;4:166.
- [15] Patange DD, Patil SA, Khandekar SP. Applications of foam-mat drying for milk and milk products: an innovative preservation technique. *J Future Foods*. 2024;6(2):184–194.
- [16] Vitek M, Matjaž MG. Clinical application of hempseed or flaxseed oil-based lyotropic liquid crystals: evaluation of their impact on skin barrier function. *Acta Pharm*. 2024;74(2):301–313.
- [17] Pobirk AZ, Roškar R, Bešter-Rogač M, Gašperlin M, Matjaž MG. Impact of phospholipid-based liquid crystals' microstructure on stability and release profile of ascorbyl palmitate and skin performance. *Molecules*. 2024;29(13):3173.

- [18] Liu H, Luo Y, Ma X, Gao X, Tai X. Preparation and characterization of emulsifier and polymer-stabilized liquid crystal emulsion. *J Dispersion Sci Technol*. 2025;1–13.
- [19] Hua Z, Zhang C, He J, Chen Y, Zhang S, Sun J, et al. Ultra-micro liquid crystal in cosmetic emulsion with excellent moisture retention and delivery selectivity. *ACS Omega*. 2024;9(47):47194–47202.
- [20] Caritá AC, Kichou H, Legrand FX, Verger A, Perse X, Rapetti L, et al. Improvement of the rheological properties and performance of liquid crystal emulsions: influence of oil addition and/or high-frequency ultrasound treatment. *Int J Pharm*. 2025;682:125934.
- [21] Franceschini M, Pizzetti F, Rossi F. On the key role of polymeric rheology modifiers in emulsion-based cosmetics. *Cosmetics*. 2025;12(2):76.
- [22] Raja A, Wilfert PK, Picken SJ. Using the Herschel–Bulkley consistency index to characterise complex biopolymer systems—the effect of screening. *Polymers*. 2024;16(19):2822.
- [23] Morgan AI, Ginnette LF, Graham RP, Williams GS. Recent developments in foam-mat drying. *Food Technol*. 1961;15(1):37–39.
- [24] Terrel A, del Moral S, Martínez-Bueno A, Concellón A. Dynamically reconfigurable complex liquid crystal emulsions. *Liq Cryst*. 2024;51(13–14):2321–2338.
- [25] Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). *Guia de Estabilidade de Produtos Cosméticos*. 1. ed. Brasília (DF); 2004.
- [26] Cekić N, Savić S, Savić S. Stability evaluation of emulsion-based topical preparations: a valuable potential of dynamic-mechanical thermoanalysis (DMTA) test as a rapid rheological alternative to conventional freeze-thaw test. *Arh Farm*. 2023;73:358–389.
- [27] Franzol A, Banin TM, Brazil TR, Rezende MC. Assessment of kinetic stability of cosmetic emulsions formulated with different emulsifiers using rheological and sensory analyses. *J Sol-Gel Sci Technol*. 2021;99(3):469–481.
- [28] Fabbron-Appas CT, Pandey P, Parekh HS, Sales CC, Duque MD, Andréo-Filho N, et al. Impact of different emollient esters on body emulsions: sensory, physicochemical, and biometrological characterization. *J Sens Stud*. 2021;36(4).
- [29] Zhao D, Yu D, Kim M, Gu MY, Kim SM, Pan CH, et al. Effects of temperature, light, and pH on the stability of fucoxanthin in an oil-in-water emulsion. *Food Chem*. 2019;291:87–93.
- [30] Östbring K, Matos M, Marefati A, Ahlström C, Gutiérrez G. Effect of pH and storage temperature on the stability of emulsions stabilized by rapeseed proteins. *Foods*. 2021;10(7):1657.
- [31] Ghelichi S, Hajfathalian M, Yesiltas B, Sørensen AM, García-Moreno PJ, et al. Oxidation and oxidative stability in emulsions. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2023;22:1864–1901.
- [32] Restu WK, Sampora Y, Meliana Y, Haryono A. Effect of accelerated stability test on characteristics of emulsion systems with chitosan as a stabilizer. *Procedia Chem*. 2015;16:171–176.
- [33] Navarro-Pérez Y, Cedeño-Linares E, Norman-Montenegro O, Ruz-Sanjuan V, Mondeja-Rivera Y, et al. Prediction of the physical stability and quality of O/W cosmetic emulsions using full factorial design. *J Pharm Pharmacogn Res*. 2021;9(1):98–112.

- [34] Tafuro G, Di Domenico E, Costantini A, Francescato S, Busata L, Baratto G, et al. Stability and application properties of surfactant-free cosmetic emulsions: an instrumental approach to evaluate their potential. *Cosmetics*. 2022;9(6):123.
- [35] Dahl V, Friedrich A, Meyer J, Venzmer J, Belkoura L, Strey R, et al. Structural analysis of a modern o/w-emulsion stabilized by a polyglycerol ester emulsifier and consistency enhancers. *Colloids Interfaces*. 2018;2(1):3.
- [36] Ahmadi D, Mahmoudi N, Heenan RK, Barlow DJ, Lawrence MJ. Influence of co-surfactants on lamellar liquid crystal structures formed in creams. *Pharmaceutics*. 2020;12(9):864.
- [37] Bufalini C, Campardelli R. Versatile emulsion-based encapsulation system production processes: a review. *Processes*. 2025;13(5):1409.
- [38] Ponphaiboon J, Limmatvapirat S, Limmatvapirat C. Development and evaluation of a dry emulsion of ostrich oil as a dietary supplement. *Foods*. 2024;13(16):2570.
- [39] Ismaiel L, Rizzo V, Di Mattia C, Fanesi B, Lucci P, D'Alessio G, et al. Oil-in-water emulsions made of pistachio oil: physical and chemical properties and stability. *Foods*. 2024;14(1):60.
- [40] Chen W, Sixdenier L, McMullen A, Grier DG, Brujic J. Refractive-index and density-matched emulsions with programmable DNA interactions. *Soft Matter*. 2024.
- [41] Akanny E, Kohlmann C. Predicting tactile sensory attributes of personal care emulsions based on instrumental characterizations: a review. *Int J Cosmet Sci*. 2024.
- [42] Arinina MP, Zuev KV, Kulichikhin VG, Malkin AYa. Effect of composition and interfacial tension on the rheology and morphology of heavy oil-in-water emulsions. *ACS Omega*. 2020;5(27):16460–16469.
- [43] Andonova A, Gugleva V, Sotirova Y, Nikolova K, Marcheva M, Petkova Z, et al. Influence of natural oils on the textural and rheological properties of cosmetic creams. *Pharmacia*. 2024;71:1–10.
- [44] Rios AM, Teuta JP, Palomeque LA, Vera RE, Marquez R, García J. Statistical simplex centroid experimental design and formulation maps to predict the stability in cosmetic emulsions containing commercial emulsifiers. *J Surfactants Deterg*. 2025.
- [45] Ueoka AR, Moraes CAP. Development and stability evaluation of liquid crystal-based formulations containing glycolic plant extracts and nano-actives. *Cosmetics*. 2018;5(2):25.

6 CONCLUSÕES

- O pó da biomassa de *Saccharomyces cerevisiae* foi obtido por secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) sob duas condições experimentais: fatorial máximo e ponto central, correspondentes a 15 e 10 % de agente espumante e temperaturas de secagem de 70 e 60 °C, respectivamente;
- As isotermas de adsorção de umidade apresentaram comportamento sigmoidal do tipo II, sendo o modelo de Henderson o que melhor representou os dados experimentais;
- O calor isotérico de sorção (Q_{st}) variou entre 44 e 50 kJ mol⁻¹, indicando forte interação entre as moléculas de água e os sítios ativos da matriz;
- À medida que o teor de umidade aumentou, observaram-se reduções nos valores de entalpia (ΔH) e entropia (ΔS), o que demonstra que o processo se tornou energeticamente menos exigente e mais ordenado. Os valores negativos de energia livre de Gibbs (ΔG) confirmaram que a adsorção de água ocorreu de forma espontânea e estável;
- A condição de ponto central (60 °C e 10 % de agente espumante) foi identificada como a mais estável e menos higroscópica, apresentando desempenho superior à condição do fatorial máximo (70 °C e 15 %);
- O estudo de estabilidade por 90 dias sob condições ambiente (26 °C/75 % UR) e acelerada (40 °C/75 % UR) demonstrou que o tempo de estocagem foi o fator mais influente, seguido pela temperatura e pelo tipo de embalagem;
- O polietileno de alta densidade (PEAD) apresentou o melhor desempenho de barreira ao vapor d'água, seguido pelo polietileno laminado de alumínio (PLA) e pelo politereftalato de etileno e polietileno (PET+PE), garantindo maior preservação das propriedades físico-químicas;
- O comportamento do produto ajustou-se ao modelo de ordem zero, conforme a equação de Arrhenius, permitindo estimar uma vida útil de 12 meses para o pó acondicionado em PEAD sob condição ambiente;
- O creme contendo o ativo apresentou aparência homogênea e ausência de separação de fases, confirmando compatibilidade entre o pó e a base emulsificante;
- Os ensaios de estabilidade físico-química confirmaram a manutenção das propriedades de viscosidade, pH e aparência ao longo do tempo;
- A formulação apresentou comportamento pseudoplástico ajustado ao modelo de Herschel–Bulkley, com predomínio de resposta elástica em baixas tensões e transição gradual para regime viscoso sob cisalhamento, evidenciando estabilidade estrutural;

- A presença do ativo atuou como modulador reológico, reduzindo a rigidez e melhorando o escoamento, o que proporcionou melhor espalhabilidade e desempenho sensorial superior à formulação controle.

REFERÊNCIAS

- ACAR, C.; DINCER, I.; MUJUMDAR, A. A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future. **Drying Technology**, v. 40, n. 6, p. 1029-1050, 2022.
- ACS-SZABO, L.; PAPP, L. A.; MIKLOS, I. Understanding the molecular mechanisms of human diseases: the benefits of fission yeasts. **Microbial Cell**, v. 11, n. 8, p. 288-311, 2024.
- ADAM, H. B.; YOUSFI, M.; MAAZOUZ, A.; LAMNAWAR, K. Recycling of multilayer polymeric barrier films: an overview of recent pioneering works and main challenges. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 310, p. 1-25, 2025.
- AKBAR, U.; MONDOL, M. S. A.; SINGH, J.; RASANE, P.; NANDA, V.; ABDI, G.; KAUR, S. Effects of various packaging materials and temperature conditions on the storage stability of *Zea mays* L. (baby corn) powder. **Applied Food Research**, v. 5, p. 100913, 2025.
- ALI, A.; SKEDUNG, L.; BURLEIGH, S.; LAVANT, E.; RINGSTAD, L.; ANDERSON, C. D.; WAHLGREN, M.; ENGBLOM, J. Relationship between sensorial and physical characteristics of topical creams: A comparative study on effects of excipients. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 613, p. 121370, 2022.
- ARSLAN-TONTUL, S. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. **Food Science and Technology**, v. 119, p. 108859, 2020.
- ATAEIAN, P.; AROYAN, L.; PARWEZ, W.; TAM, K. C. Emulsions undergoing phase transition: effect of emulsifier type and concentration. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 617, p. 214-223, 2022.
- AZAMAT, U.; DILMUROD, M.; ASLIDDINJON, F.; NOSIROV, N.; SAMADOV, B.; NIYAZMETOV, A.; KURBANOV, G.; MASHAEV, E.; KHEZERLOO-YE AGHDAM, S. Experimental study and modeling adsorption behavior of a robust cross-linker on carbonate rocks at different temperatures. **Scientific Reports**, v. 15, p. 21240, 2025.
- AZEVEDO, A. D. de; SILVA, A. C. C. da; OLIVEIRA, A. C. de; LOPES, L. de O.; SANTOS, K. D. de A. Rheological characterization of body lotions: influence of temperature and wetting agents. **Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management**, v. 17, n. 2, 2021.
- BAI, F.-Y.; HAN, D.-Y.; DUAN, S.-F.; WANG, Q.-M. The Ecology and Evolution of the Baker's Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. **Genes**, v. 13, n. 2, p. 230, 2022.
- BAKHATTAR, I.; KOUKOUCH, A.; CHATER, H.; ASBIK, M.; MOUAKY, A.; IDLIMAM, A. Thermodynamic analysis of batch adsorption isotherms of different types of olive pomace. **Heat and Mass Transfer**, v. 58, p. 613-630, 2022.
- BAUER, A.-S.; TACKER, M.; UYSAL-UNALAN, I.; CRUZ, R. M. S.; VARZAKAS, T.; KRAUTER, V. Recyclability and redesign challenges in multilayer flexible food packaging—A review. **Foods**, v. 10, p. 2702, 2021.
- BELWAL, T.; CRAVOTTO, C.; PRIETO, M. A.; VENSKUTONIS, P. R.; DAGLIA, M.; DEVKOTA, H. P.; BALDI, A.; EZZAT, S. M.; GÓMEZ-GÓMEZ, L.; SALAMA, M. M.; CAMPONE, L.; RASTRELLI, L.; ECHAVE, J.; JAFARI, S. M.; CRAVOTTO, G. Effects of

different drying techniques on the quality and bioactive compounds of plant-based products: a critical review on current trends. **Drying Technology**, v. 40, n. 8, p. 1539-1561, 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Anuário da Cachaça 2025: ano de referência 2024**. Brasília, DF: MAPA/SDA, 2025. 42 p. ISBN 978-85-7991-238-2.

BRASIL. Resolução - RDC Nº 907, de 19 de setembro de 2024. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 19 de setembro de 2024.

BUFALINI, C.; CAMPARDELLI, R. Versatile Emulsion-Based Encapsulation System Production Processes: A Review. **Processes**, v. 13, p. 1409, 2025.

CALIENNI, M. N.; MARTÍNEZ, L. M.; IZQUIERDO, M. C.; ALONSO, S. d. V.; MONTANARI, J. Rheological and Viscoelastic Analysis of Hybrid Formulations for Topical Application. **Pharmaceutics**, v. 15, p. 2392, 2023.

CARITÁ, A. C.; KICHOU, H.; LEGRAND, F. X.; VERGER, A.; PERSE, X.; RAPETTI, L.; LEONARDI, G. R.; GILLET, G.; MUNNIER, E. Improvement of the rheological properties and performance of liquid crystal emulsions: influence of oil addition and/or high-frequency ultrasound treatment. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 682, p. 125934, 2025.

CHAVDA, V. P.; DYAWANAPALLY, S.; DAWRE, S.; FERREIRA-FARIA, I.; BEZBARUAH, R.; GOGOI, N. R.; KOLIMI, P.; DAVE, D. J.; PAIVA-SANTOS, A. C.; VORA, L. K. Lyotropic liquid crystalline phases: Drug delivery and biomedical applications. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 647, p. 123546, 2023.

CHEVER, S.; MÉJEAN, S.; DOLIVET, A.; MEI, F.; DEN BOER, C. M.; LE BARZIC, G.; JEANTET, R.; SCHUCK, P. Agglomeration during spray drying: physical and rehydration properties of whole milk/sugar mixture powders. **LWT – Food Science and Technology**, v. 83, p. 33–41, 2017.

CHOOSUK, N.; MEESUK, P.; RENUMARN, P.; PHUNGAMNGOEN, C.; JAKKRANUHWAT, N. Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. **Processes**, v. 10, p. 1392, 2022.

CHOUNTOULESI, M.; PISPAS, S.; TSEITI, I.; DEMETZOS, C. Lyotropic Liquid Crystalline Nanostructures as Drug Delivery Systems and Vaccine Platforms. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 4, p. 429, 2022.

COLLAZOS-ESCOBAR, G. A.; GUTIÉRREZ-GUZMÁN, N.; VÁQUIRO-HERRERA, H. A.; AMOROCHO-CRUZ, C. M. Water dynamics adsorption properties of dried and roasted cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). **International Journal of Food Properties**, v. 23, n. 1, p. 434-444, 2020.

CONAB. **Safra 2024/25 de cana-de-açúcar encerra com produção estimada em 676,96 milhões de toneladas**. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-2024-25-de-cana-de-acucar-encerra-com-producao-estimada-em-676-96-milhoes-de-toneladas>>. Acesso em: 18 ago. 2025.

CORNEJO, P. E. F.; NOGUEIRA, I. R.; WILBERG, C. V. **Secagem como método de conservação de frutas**. Rio de Janeiro: Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2003.

COSTA, E. M.; OLIVEIRA, A. S.; SILVA, S.; RIBEIRO, A. B.; PEREIRA, C. F.; FERREIRA, C.;

CASANOVA, F.; PEREIRA, J. O.; FREIXO, R.; PINTADO, M. E.; CARVALHO, A. P.; RAMOS, O. L. Spent Yeast Waste Streams as a Sustainable Source of Bioactive Peptides for Skin Applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, p. 2253, 2023.

COUTINHO, N. M.; LOPES, L. S.; SILVA, F. A.; RODRIGUES, B. L.; VIDAL, T. F. Lipid distribution in the meat of *Jau* (*Zungaro jahu*) and the influence of storage temperature on its fat stability. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 56, n. 2, p. 1–10, 2019.

DE MARCO, I.; SILVA, C. M.; MORAES, J. O.; MENEZES, L. A. A.; MIOTTO, M.; LAURINDO, J. B.; LINDNER, J. D. D. A systematic review of drying methods and their impact on technological characteristics of sourdough type III. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 6, n. 1, e2022003, 2022.

DO CARMO, J. R.; CORRÊA, J. L. G.; CRUZ, M. S.; MARTINS, M. J. N.; SANCHES, M. A. R.; TELIS-ROMERO, J. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of isomaltulose-enriched mango. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 105, n. 2, p. 883-894, 2025.

DU, B.; BIAN, Z.; XU, B. Skin Health Promotion Effects of Natural Beta-Glucan Derived from Cereals and Microorganisms: A Review. **Phytotherapy Research**, v. 28, p. 159-166, 2014.

DZIADOWIEC, D.; MATYKIEWICZ, D.; SZOSTAK, M.; ANDRZEJEWSKI, J. Overview of the cast polyolefin film extrusion technology for multi-layer packaging applications. **Materials**, v. 16, p. 1071, 2023.

ECAVARRIA, J. A. C.; RIVERA TORRES, A. M.; ZAPATA MONTTOYA, J. E. Sorption isotherms and thermodynamic properties of the dry silage of red tilapia viscera (*Oreochromis* spp.) obtained in a direct solar dryer. **Heliyon**, v. 7, n. 4, p. e06798, 2021.

ELGHANDOUR, M. M. Y.; TAN, Z. L.; ABU HAFSA, S. H.; ADEGBEYE, M. J.; GREINER, R.; UGBOGU, E. A.; MONROY, J. C.; SALEM, A. Z. M. *Saccharomyces cerevisiae* as a probiotic feed additive to non and pseudo-ruminant feeding: a review. **Journal of Applied Microbiology**, v. 128, n. 3, p. 658-674, 2020.

ELKHATEEB, W. A.; EL-GHWAS, D. E.; AL KOLAIBE, A. G.; AKRAM, M.; DABA, G. M. The Superiority of Yeast Secondary Metabolites, from Industrial applications, Biological activities to Pharmaceutical potential. **Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 14, n. 1, p. 1-6, 2022.

EL-QURASHI, M. A.; AL-YAHYA, F. A. A Comprehensive Review of Biological Agents Against Plant-Parasitic Nematodes. **Egyptian Journal of Phytopathology**, v. 53, n. 2, p. 51-72, 2025.

FAUSTINO, M.; PEREIRA, C. F.; DURÃO, J.; OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, J. O.; FERREIRA, C.; PINTADO, M. E.; CARVALHO, A. P. Effect of drying technology in *Saccharomyces cerevisiae* mannans: Structural, physicochemical, and functional properties. **Food Chemistry**, v. 412, p. 135545, 2023.

FERNÁNDEZ-PACHECO, P.; PINTADO, C.; BRIONES PÉREZ, A.; ARÉVALO-VILLENA, M. Potential Probiotic Strains of *Saccharomyces* and Non-*Saccharomyces*: Functional and Biotechnological Characteristics. **Journal of Fungi**, v. 7, n. 3, p. 177, 2021.

- FERREIRA, A.; CANDEIAS, M. Secagem solar de frutos e plantas aromáticas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 28, n. 1, p. 363-370, 2005.
- FORNARO, M.; LIGUORI, B.; AMBROGI, V.; CAPUTO, D. Zeolite additives for flexible packaging polymers: current status review and future perspectives. **Polymers**, v. 16, p. 3399, 2024.
- FORSIDO, S. F.; WELELAW, E.; BELACHEW, T.; HENSEL, O. Effects of storage temperature and packaging material on physico-chemical, microbial and sensory properties and shelf life of extruded composite baby food flour. **Heliyon**, v. 7, p. e06821, 2021.
- FOURNAISE, T.; PETIT, J.; GAIANI, C. Main powder physicochemical characteristics influencing their reconstitution behavior. **Powder Technology**, v. 383, p. 65–73, 2021.
- FRANÇA, T.; PRADA, M. H. Caracterização dos nutrientes presentes em levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) submetida à liofilização. **Bioenergia em Revista: Diálogos**, v. 9, n. 1, p. 48–61, 2019.
- FRANCESCHINI, M.; PIZZETTI, F.; ROSSI, F. On the Key Role of Polymeric Rheology Modifiers in Emulsion-Based Cosmetics. **Cosmetics**, v. 12, n. 2, p. 76, 2025.
- FU, S.; GARATE, D.; FRANCIS, A.; GARCIA, B.; HUYNH, D.; ORENGO, I. Revisão sistemática do benefício cosmético da aplicação tópica do filtrado de fermentação. **Surgical Cosmetic Dermatology**, v. 15, p. e20230166, 2023.
- GASPAR, L.R.; CAMARGO Jr., F.B.; GIANETI, M. D.; MAIA CAMPOS, P. M. B. G. Evaluation of dermatological effects of cosmetic formulations containing *Saccharomyces cerevisiae* extract and vitamins. **Food and Chemical Toxicology**, v. 46, p. 3493-3500, 2008.
- GIRISH, C. R. Determination of thermodynamic parameters in adsorption studies: a review. **Chemical Papers**, v. 79, p. 5687-5706, 2025.
- GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. D. C.; VILHASANTI, H. D. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.
- GUERRITORE, M.; OLIVIERI, F.; CASTALDO, R.; AVOLIO, R.; COCCA, M.; ERRICO, M. E.; GALDI, M. R.; CARFAGNA, C.; GENTILE, G. Recyclable-by-design mono-material flexible packaging with high barrier properties realized through graphene hybrid coatings. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 179, p. 106126, 2022.
- GÜNAYDIN, S.; ÇETIN, N.; SAĞLAM, C.; KARAMAN, K. Change of bioactive properties, spectral reflectance, and color characteristics of European cranberry (*Viburnum opulus* L.) juice as affected by foam mat drying technique. **Scientific Reports**, v. 14, p. 22974, 2024.
- GUPTA, P.; AGARWAL, A.; KOLI, A. G.; CHATURVEDI, N. **Advances in Yeast Biotechnology for Biofuels and Sustainability: Value-Added Products and Environmental Remediation Applications**. 1. ed. Londres: Academic Press, 2024.
- GUPTA, R. K.; PIPLIYA, S.; KARUNANITHI, S.; ESWARAN, G. M.; KUMAR, S.; MANDLIYA, S.; SRIVASTAV, P. P.; SUTHAR, T.; SHAIKH, A. M.; HARSÁNYI, E.; KOVÁCS, B. Migration of chemical compounds from packaging materials into packaged foods: interaction, mechanism, assessment, and regulations. **Foods**, v. 13, p. 3125, 2024.

- GURT, A.; KHONSARI, M. A Review of the Rheological Consistency of Materials. **Lubricants**, v. 12, n. 7, p. 236, 2024.
- HAJAR-AZHARI, S.; MOHD ROBY, B. H.; JEMAIN, S. N.; MEOR HUSSIN, A. S. Sourdough powder: physicochemical, microbiological properties and shelf-life stability in different package type. **Journal of Food Science and Technology**, v. 61, n. 9, p. 1701–1710, 2024.
- HAN, Z.; MOORE, G. A.; MITTER, R.; DIRAC SVEJSTRUP, A. B.; RUEDA, D. S.; SVEJSTRUP, J. Q. DNA-directed termination of RNA polymerase II transcription. **Molecular Cell**, v. 83, n. 18, p. 3253–3267, 2023.
- HE, X.; GAO, X.; GUO, Y.; XIE, W. Research Progress on Bioactive Factors against Skin Aging. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 7, p. 3797, 2024.
- HONG, X.; ZHAO, Q.; LIU, Y.; LI, J. Recent advances on food-grade water-in-oil emulsions: Instability mechanism, fabrication, characterization, application, and research trends. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, p. 1406–1436, 2021.
- HOSSAIN, M. A.; MITRA, S.; BELAL, M.; ZZAMAN, W. Effect of foaming agent concentration and drying temperature on biochemical properties of foam mat dried tomato powder. **Food Research**, v. 5, n. 1, p. 291–297, 2021.
- HUA, Z.; ZHANG, C.; HE, J.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; SUN, J.; WANG, N.; ZHANG, J.; YANG, X.; CHEN, J.; WEI, X. Ultra-micro Liquid Crystal in Cosmetic Emulsion with Excellent Moisture Retention and Delivery Selectivity. **ACS Omega**, v. 9, n. 47, p. 47194–47202, 2024.
- IBRAHIM, I. D.; HAMAM, Y.; SADIKU, E. R.; NDAMBUKI, J. M.; KUPOLATI, W. K.; JAMIRU, T.; EZE, A. A.; SNYMAN, J. Need for sustainable packaging: an overview. **Polymers**, v. 14, n. 20, p. 4430, 2022.
- ISKANNDAR, B.; LIU, T. W.; MEI, H. C.; KUO, I. C.; SURBOYO, M. D. C.; LIN, H. M.; LEE, C. K. Herbal nanoemulsions in cosmetic science: A comprehensive review of design, preparation, formulation, and characterization. **Journal of Food and Drug Analysis**, v. 32, n. 4, p. 428–458, 2024.
- ITURRALDE-GARCÍA, R. D.; CINCO-MOROYOQUI, F. J.; MARTÍNEZ-CRUZ, O.; RUIZ-CRUZ, S.; WONG-CORRAL, F. J.; BORBOA-FLORES, J.; CORNEJO-RAMÍREZ, Y. I.; BERNAL-MERCADO, A. T.; DEL-TORO-SÁNCHEZ, C. L. Emerging Technologies for Prolonging Fresh-Cut Fruits' Quality and Safety during Storage. **Horticulturae**, v. 8, n. 8, p. 731, 2022.
- JIN, Y.; TANG, J.; SABLANI, S. S. Food component influence on water activity of low-moisture powders at elevated temperatures in connection with pathogen control. **LWT-Food Science and Technology**, v. 112, p. 108257, 2019.
- JO, D. -U.; CHIN, Y. -W.; KIM, Y.; KIM, K. -T.; KIM, T. -W.; LIM, T. -G. By-product of Korean liquor fermented by *Saccharomyces cerevisiae* exhibits skin whitening activity. **Food Science and Biotechnology**, v. 31, n. 5, p. 587–596, 2022.
- JO, M.; CHANG, M. J.; GOH, K. K. T.; BAN, C.; CHOI, Y. J. Rheology, Microstructure, and Storage Stability of Emulsion-Filled Gels Stabilized Solely by Maize Starch Modified with Octenyl Succinylation and Pregelatinization. **Foods**, v. 10, n. 4, p. 837, 2021.

JUAREZ-ENRIQUEZ, E.; OLIVAS, G. I.; ZAMUDIO-FLORES, P. B.; PEREZ-VEGA, S.; SALMERON, L.; ORTEGA-RIVAS, E.; SEPULVEDA, D. R. A review on the influence of water on food powder flowability. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, n. 3, p. e14031, 2022.

KALININA, I.; FATKULLIN, R.; NAUMENKO, N.; POPOVA, N.; STEPANOVA, D. Using Spent Brewer's Yeast to Encapsulate and Enhance the Bioavailability of Sonochemically Nanostructured Curcumin. **International Journal of Food Science**, 2024.

KEPIŃSKA-PACELIK, J.; PACELIK, M.; SZCZEPAŃSKA, J. Changes in the fatty acid composition and antioxidant properties in mono-protein commercial dry dog foods during storage. **Molecules**, v. 30, n. 17, p. 3524, 2025.

KHATRI, B.; HAMID; SHAMS, R.; DASH, K. K.; SHAIKH, A. M.; BÉLA, K. Sustainable drying techniques for liquid foods and foam mat drying. **Discover Food**, v. 4, p. 166, 2024.

KIM, J.; JEONG, E. H.; BAIK, J. H.; PARK, J. D. The role of rheology in cosmetics research: a review. **Korea-Australia Rheology Journal**, v. 36, n. 4, p. 271-282, 2024.

KORESE, J.K.; ACHAGLINKAME, M.A.; ADZITEY, F. Effect of different packaging materials on storage stability of *Gardenia erubescens* Stapf. & Hutch. dried fruits and powder. **Applied Food Research**, v. 2, p. 100143, 2022.

KOWALSKA, M.; WOŹNIAK, M.; LUDWIŃSKI, P. Emulsions, their quality and importance in food, cosmetic, and pharmaceutical industries. **Acta Poloniae Pharmaceutica—Drug Research**, v. 80, n. 6, p. 863-877, 2023.

KRISHNAN, R.; MOHAN, K.; RAGAVAN, K. V.; NISHA, P. Insights into Headway in Essential Oil-Based Pickering Emulsions for Food Applications. **Sustainable Food Technology**, v. 1, p. 363–376, 2023.

KUMAR, G.; KUMAR, N.; PRABHAKAR, P. K.; KISHORE, A. Foam mat drying: Recent advances on foam dynamics, mechanistic modeling and hybrid drying approach. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 63, n. 26, p. 8275-8291, 2023.

KUMAR, L. Comparative analysis of cell wall composition in yeast species: Structural and functional insights. **International Journal of Advance Research in Multidisciplinary**, v. 1, n. 1, p. 888-892, 2023.

KUPIKOWSKA-STOBBA, B.; DOMAGAŁA, J.; KASPRZAK, M. M. Critical Review of Techniques for Food Emulsion Characterization. **Applied Sciences**, v. 14, n. 1069, p. 1-50, 2024.

LAHIR, Y. K. General Overview of Yeast and Yeast Cell as a Novel Model for Investigations. **Advances in Clinical Toxicology**, v. 7, n. 4, p. 1-17, 2022.

LAHUE, C.; MADDEN, A. A.; DUNN, R. R.; SMUKOWSKI HEIL, C. History and Domestication of *Saccharomyces cerevisiae* in Bread Baking. **Frontiers in Genetics**, v. 11, p. 584718, 2020.

LEE, J.; LU, J.; POTANIN, A.; BOYKE, C. Prediction of Tactile Sensory Attributes of Facial Moisturizers by Rheology and Tribology. **Biotribology**, v. 28, p. 100201, 2021.

LI, S.; GE, H.; WANG, H. Hygroscopic properties modeling and thermodynamic analysis of a seamless popping capsule. **Scientific Reports**, v. 15, p. 30041, 2025.

LI, D.-Y.; YUAN, Z.; LIU, Z.-Q.; YU, M.-M.; GUO, Y.; LIU, X.-Y.; ZHANG, M.; LIU, H.-L.; ZHOU, D.-Y. Effect of oxidation and Maillard reaction on color deterioration of ready-to-eat shrimps during storage. **LWT – Food Science and Technology**, v. 131, p. 109696, 2020.

LIAO, B.-K.; GOH, A. P.; LIO, C. I.; HSIAO, H.-I. Kinetic models applied to quality change and shelf-life prediction of fresh-cut pineapple in food cold chain. **Food Chemistry**, v. 437, p. 137803, 2024.

LIU, Y.; LIU, K.; ZHAO, Y. Effect of Storage Conditions on the Protein Composition and Structure of Peanuts. **ACS Omega**, v. 7, n. 25, p. 21694–21700, 2022.

MACIEL, K. S.; TEIXEIRA, L. J. Q.; LUCIA, S. M. D.; SARAIVA, S. H. Optimization of foam mat drying for instant coffee processing and its effect on drying kinetics and quality characteristics. **Drying Technology**, v. 40, n. 9, p. 1866–1880, 2021.

MAPHOSA, B.; TSIGE, A. A.; BREDA, V. V.; CALEB, O. J.; OPARA, U. L. Investigating the effects of pre-treatment, drying techniques and packaging on nutritional quality and shelf-life of pomegranate arils. **LWT**, v. 215, 117240, 2025.

MARANGONI JÚNIOR, L.; AUGUSTO, P. E. D.; SOARES, B. M. C.; VIEIRA, R. P.; MORAES, G. H.; KIYATAKA, P. H. M.; DANTAS, F. B. H.; PADULA, M. Effect of ultrasonic processing on the physical-chemical properties and migration of metallized flexible packaging materials. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 19, p. 7314–7328, 2025.

MARTINS, E.; CNOSSEN, D. C.; SILVA, C. R. J.; CEZARINO JUNIOR, J. C.; NERO, L. A.; PERRONE, I. T.; CARVALHO, A. F. Determination of ideal water activity and powder temperature after spray drying to reduce *Lactococcus lactis* cell viability loss. **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 7, p. 6013–6022, 2019.

MAURÍCIO, E. M.; BRANCO, P.; ARAÚJO, A. L. B.; ROMA-RODRIGUES, C.; LIMA, K.; DUARTE, M. P.; FERNANDES, A. R.; ALBERGARIA, H. Evaluation of Biotechnological Active Peptides Secreted by *Saccharomyces cerevisiae* with Potential Skin Benefits. **Antibiotics**, v. 13, n. 9, 881, 2024.

MELO, G. M. P. C.; BOMFIM, K. S.; SILVA, P. B.; NÓBREGA, M. M. G.; NEGREIROS, J. K. S.; OLIVEIRA, B. F.; LEITE, A. C. N.; CAVALCANTE, J. A. Estudo das isotermas de adsorção do pó obtido da folha da graviola. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 10, p. 14609-14629, 2023.

MENDES, T. A. D.; PINTO, L. M.; MENDES, D. D. S. O.; MALTA, H. L.; OLIVEIRA, E. D. S. Aumento na produção de biomassa de levedura em propagador aerado por processo descontínuo e semicontínuo para produção de cachaça. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 16, n. 2, p. 81-89, 2013.

MENGOZZI, A.; CARULLO, D.; BOT, F.; FARRIS, S.; CHIAVARO, E. Functional properties of food packaging solutions alternative to conventional multilayer systems. **Journal of Food Science and Technology**, v. 62, p. 483–491, 2025.

MOUD, A. A. Rheology and microscopy analysis of polymer–surfactant complexes. **Colloid and Polymer Science**, v. 300, p. 733-762, 2022.

MUNIANDY, A.; BENYATHIAR, P.; OZADALI, F.; MISHRA, D. K. Development of predictive model for the novel ultra-accelerated shelf-life test (UASLT) for shelf-life of packaged beverage. **LWT-Food Science and Technology**, v. 210, p. 116686, 2024.

MUTHURAMALINGAM, K.; CHOI, S. I.; HYUN, C.; KIM, Y. M.; CHO, M. β -Glucan-Based Wet Dressing for Cutaneous Wound Healing. **Advances in Wound Care**, v. 8, n. 4, p. 125-133, 2019.

NASCIMENTO, B. S.; BATISTA, G. A.; PRAVATO, V. T.; ALEXANDRE, G. P. D. L.; VERÍSSIMO, L. A. A.; RESENDE, J. V. Thermodynamic analysis of water vapor adsorption onto freeze-dried ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller) mucilage. **The Journal of Engineering and Exact Sciences - JCEC**, v. 9, n. 6, p. 16200-01e, 2023.

NG, L. H.; LING, J. K. U.; HADINOTO, K. Formulation strategies to improve the stability and handling of oral solid dosage forms of highly hygroscopic pharmaceuticals and nutraceuticals. **Pharmaceutics**, v. 14, p. 2015, 2022.

NWANKWO, J. A.; LIU, W.; GUO, X.; LIN, Y.; HUSSAIN, M.; KHAN, I.; JOSHUA, M.; IBRAHIM, A. N.; NGOZI, O. J.; ALI, A.; ZOU, X. Microemulsion gel systems: Formulation, stability studies, biopolymer interactions, and functionality in food product development. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 24, n. 2, p. e70110, 2025.

OGBUEWU, I. P.; OKORO, V. M.; MBAJIORGU, E. F.; MBAJIORGU, C. A. Yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) and its effect on production indices of livestock and poultry-a review. **Comparative Clinical Pathology**, v. 28, p. 669-677, 2019.

OLIVEIRA, A. C. D.; OLIVEIRA, C. A. F. D.; KAMIMURA, E. S. Microbial Contamination in the Ethanol and Cachaça Fermentation Process: Impacts and Applications. **Food Science and Technology**, v. 43, 2023.

OUAABOU, R.; ENNAHLI, S.; DI LORENZO, C.; HANINE, H.; BAJOUB, A.; LAHLALI, R.; IDLIMAM, A.; AIT OUBAHOU, A.; MESNAOUI, M. Hygroscopic Properties of Sweet Cherry Powder: Thermodynamic Properties and Microstructural Changes. **Journal of Food Quality**, v. 2021, p. 3925572, 2021.

PATANGE, D. D.; PATIL, S. A.; KHANDEKAR, S. P. Applications of foam-mat drying for milk and milk products: an innovative preservation technique. **Journal of Future Foods**, v. 6, n. 2, p. 184-194, 2024.

PHUONG, N. N. M.; LE, T. T.; CAMP, J. V.; RAES, K. Dehydration of phenolic-rich extract from rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) peel by foam mat drying. **Food Science and Technology**, v. 198, p. 115973, 2024.

POBIRK, A. Z.; ROŠKAR, R.; BEŠTER-ROGAČ, M.; GAŠPERLIN, M.; MATJAŽ, M. G. The Impact of Phospholipid-Based Liquid Crystals' Microstructure on Stability and Release Profile of Ascorbyl Palmitate and Skin Performance. **Molecules**, v. 29, n. 13, p. 3173, 2024.

PINHEIRO, W. S.; SILVA, F. L. H.; CAVALCANTE, J. A.; SANTOS, S. F. M.; MELO, D. J. N.; GADELHA, B. S. O.; SANTOS, L. V. A. Secagem da biomassa de levedura *Rhodotorula glutinis* em camada de espuma. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, 2020.

RAJA, A.; WILFERT, P. K.; PICKEN, S. J. Using the Herschel–Bulkley Consistency Index to Characterise Complex Biopolymer Systems —The Effect of Screening. **Polymers**, v. 16, n. 19, p.

2822, 2024.

RAN, R.; WANG, L.; SU, Y.; HE, S.; HE, B.; LI, C.; WANG, C.; LIU, Y.; CHEN, S. Preparation of pH-indicator films based on soy protein isolate/bromothymol blue and methyl red for monitoring fresh-cut apple freshness. **Journal of Food Science**, v. 86, n. 10, p. 4594-4610, 2021.

RIESUTE, R.; SALOMSKIENE, J.; MORENO, D. S.; GUSTIENE, S. Effect of yeasts on food quality and safety and possibilities of their inhibition. **Trends in Food Science & Technology**, v. 108, p. 1-10, 2021.

ROBERTS, M. S.; MOHAMMED, Y.; PASTORE, M. N.; NAMJOSHI, S.; YOUSEF, S.; ALINAGHI, A.; HARIDASS, I. N.; ABD, E.; LEITE-SILVA, V. R.; BENSON, H. A. E.; GRICE, J. E. Topical and cutaneous delivery using nanosystems. **Journal of Controlled Release**, v. 247, p. 86-105, 2017.

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

RUAN, J.; LI, M.; LIU, Y.; YE, B.; LING, C. Adsorption isotherm and thermodynamic properties of microwave vacuum dried tilapia fillets. **LWT-Food Science and Technology**, v. 166, p. 113766, 2022.

SANCHES, M. A. R.; AUGUSTO, P. E. D.; POLACHINI, T. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption properties of brewer's spent grain: A study aimed at its stabilization for further conversion into value-added products. **Biomass and Bioenergy**, v. 170, p. 106718, 2023.

SANTIN, A. P. **Estudo da secagem e da inativação de leveduras *Saccharomyces cerevisiae***. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

SCHLABITZ, C.; KUHN, D.; GRAMBUSCH, I. M.; PEDRALLI, L.; JACOBS, W.; LEHN, D. N.; DE SOUZA, C. F. V. Reuse of Residual Brewer's Yeast: Valorization of Industrial Waste as a Source of Nutrients for Dairy Cattle. **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, p. 5487-5499, 2024.

SCHLABITZ, C.; LEHN, D. N.; SOUZA, C. F. V. D. A review of *Saccharomyces cerevisiae* and the applications of its byproducts in dairy cattle feed: Trends in the use of residual brewer's yeast. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, p. 130059, 2022.

SHEVTSOVA, T.; MAALIHAN, R. D.; DEMCHUK, Z.; BYRD, C. J.; CALDONA, E. B.; VORONOV, A. Rheological study of biobased structured emulsions for pharmaceutical and cosmetic applications. **Polymer**, v. 339, p. 129107, 2025.

SHIRVANYAN, A. H. Evaluation of Ethanol and Biomass Production Rate by Different *Saccharomyces cerevisiae* Strains Depending on External pH and Temperature. **Proceedings of the Yerevan State University, Chemistry and Biology**, v. 57, n. 2, p. 141-153, 2023.

SILVA FILHO, E. D. D. **Obtenção e avaliação da qualidade da polpa da manga CV. Haden em pó, pelo método de secagem em camada de espuma**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SILVA, K. S.; POLACHINI, T. C.; LUNA-FLORES, M.; LUNA-SOLANO, G.; RESENDE, O.;

TELIS-ROMERO, J. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 9, p. e13784, 2021.

SANTOS, A. R.; SILVA, M. F.; OLIVEIRA, L. S.; COSTA, J. A. V. Drying of *Saccharomyces cerevisiae* biomass by spray drying for powder and tablet production. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 23, p. e2019134, 2020.

SMAISIM, G. F.; MOHAMMED, K. J.; HADRAWI, S. K.; KOTEN, H.; KIANFAR, E. Properties and Application of Nanostructure in Liquid Crystals: Review. **BioNanoScience**, v. 13, p. 819-839, 2023.

SOUSA, P.; TAVARES-VALENTE, D.; PEREIRA, C. F.; PINTO-RIBEIRO, I.; AZEVEDO-SILVA, J.; MADUREIRA, R.; RAMOS, Ó. L.; PINTADO, M.; FERNANDES, J.; AMORIM, M. Circular economyeast: *Saccharomyces cerevisiae* as a sustainable source of glucans and its safety for skincare application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 265, p. 130933, 2024.

SRISUK, N.; TUDPOR, K.; JIRASATID, S. Quality evaluation of herbal tea (*Curcuma longa* Linn. and *Pandanus amaryllifolius* Roxb.) and development of predictive models for its shelf life. **LWT-Food Science and Technology**, v. 225, p. 117895, 2025.

SUHAG, R.; KELLIL, A.; RAZEM, M. Factors Influencing Food Powder Flowability. **Powders**, v. 3, n. 1, p. 65-76, 2024.

SUN, J.; LIU, S.; LIAO, G.; WANG, S.; LU, Y.; WU, C.; HE, Y.; SUN, N.; LI, W. Influencing Factors and Predictive Models of Oil–Water Emulsions: A Comprehensive Review and Future Outlook. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1552, n. 1, p. 94–116, 2025.

SURESH, S. *Saccharomyces cerevisiae* in Molecular Biology and Biotechnology. **Jawaharlal Nehru Centre for Advanced Scientific Research**, p. 1-5, 2025.

TAGNAMAS, Z.; IDLIMAM, A.; LAMHARRAR, A. Hygroscopic analysis of pre-dried madder roots (*Rubia tinctorum* L.) using a solar dryer: Implications for safe storage conditions. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 139848, 2024.

TAN, A.; HONG, L.; DU, J.; BOYD, B. J. Self-Assembled Nanostructured Lipid Systems: Is There a Link between Structure and Cytotoxicity? **Advanced Science (Weinheim)**, v. 6, n. 3, p. 1801223, 2018.

TSUCHIMOTO, I.; KAJIKAWA, Y. Recycling of plastic waste: a systematic review using bibliometric analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 24, p. 16340, 2022.

TEERANACHAIDEEKUL, V.; SOONTARANON, S.; SUKHASEM, S.; CHANTASART, D.; WONGRAKPANICH, A. Influence of the emulsifier on nanostructure and clinical application of liquid crystalline emulsions. **Scientific Reports**, v. 13, p. 4185, 2023.

TERREL, A.; MORAL, S. del; MARTÍNEZ-BUENO, A.; CONCELLÓN, A. Dynamically reconfigurable complex liquid crystal emulsions. **Liquid Crystals**, v. 51, n. 13-14, p. 2321-2338, 2024.

THUY, N. M.; HAO, H. V.; MINH, V. Q.; TAI, N. V.; DUONG, L. T. T.; GIAU, T. N. Foam-mat drying of lucuma powder: Mathematical and artificial modeling of drying kinetics, physicochemical

- and microstructural properties. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 19, p. 101656, 2025.
- TIAN, Y.; ZHOU, J.; HE, C.; HE, L.; LI, X.; SUI, H. The Formation, Stabilization and Separation of Oil–Water Emulsions: A Review. **Processes**, v. 10, p. 738, 2022.
- TOMÉ, D. Yeast Extracts: Nutritional and Flavoring Food Ingredients. **ACS Food Science & Technology**, v. 1, n. 3, p. 487-494, 2021.
- TULLIO, V. Yeast Genomics and Its Applications in Biotechnological Processes: What Is Our Present and Near Future? **Journal of Fungi**, v. 8, n. 7, p. 752, 2022.
- UTAMA, G. L.; OKTAVIANI, L.; BALIA, R. L.; RIALITA, T. Potential Application of Yeast Cell Wall Biopolymers as Probiotic Encapsulants. **Polymers**, v. 15, n. 16, p. 3481, 2023.
- VICTRAL, D. M. **Aplicação de Levedura Residual como Fonte de Mediadores Redox na Descoloração Redutiva de um Azo Corante Modelo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- VIEIRA, T.; BECEGATO, V. A.; PAULINO, A. T. Equilibrium isotherms, kinetics, and thermodynamics of the adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid to chitosan-based hydrogels. **Water Air and Soil Pollution**, v. 232, p. 60, 2021.
- VITEK, M.; MATJAZŽ, M. G. Clinical application of hempseed or flaxseed oil-based lyotropic liquid crystals: Evaluation of their impact on skin barrier function. **Acta Pharmaceutica**, v. 74, n. 2, p. 301-313, 2024.
- VORLÄNDER, D.; SCHWARZ, M.; SCHMIDT, P.; SCHMIDT, M. Effect of process parameters, protectants and carrier materials on the fluidized bed drying of *Saccharomyces cerevisiae*. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 3, p. 884, 2023.
- XING, W.; LIU, W.; LI, H.; ZENG, X.; FAN, X.; XING, S.; GONG, H. Development of predictive models for shelf-life of sweet cherry under different storage temperatures. **LWT-Food Science and Technology**, v. 217, p. 117442, 2025.
- YADAV, S.; MISHRA, S. Moisture sorption isotherms and storage study of spray-dried probiotic finger millet milk powder. **Journal of Stored Products Research**, v. 102, p. 102128, 2023.
- YAMADA, E. A.; ALVIM, I. D.; SANTUCCI, M. C. C.; SGARBIERI, V. C. Composição centesimal e valor protéico de levedura residual da fermentação etanólica e de seus derivados. **Revista de Nutrição**, v. 16, n. 4, p. 423-432, 2003.
- YAO, Y.; XU, B. Skin Health Promoting Effects of Natural Polysaccharides and Their Potential Application in the Cosmetic Industry. **Polysaccharides**, v. 3, p. 818-830, 2022.
- YENIDOĞAN, S.; AYDEMİR, C.; DOĞAN, C. E. Packaging–food interaction and chemical migration. **Cellulose Chemistry and Technology**, v. 57, n. 9-10, p. 1029-1040, 2023.
- YIN, C.; WANG, J.; QIAN, J.; XIONG, K.; ZHANG, M. Quality changes of rainbow trout stored under different packaging conditions and mathematical modeling for predicting the shelf life. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 32, p. 100824, 2022.

YINGCHEN, F.; YU, M.; LI, D.; ZHAO, G.; ZHANG, M.; WANG, Z.; LIU, Y.; ZHOU, D. Effects of non-enzymatic browning and lipid oxidation on color of ready-to-eat abalone during accelerated storage and its control. **Foods**, v. 12, p. 1514, 2023.

ZAFAR, U.; VIVACQUA, V.; CALVERT, G.; GHADIRI, M.; CLEAVER, J. A. S. A review of bulk powder caking. **Powder Technology**, v. 313, p. 389–401, 2017.

ZANG, J.; QING, M.; CHI, Y.; CHI, Y. Extending the shelf-life of whole egg powder with different packaging: Based on the multivariate accelerated shelf-life test model. **Food Chemistry**, v. 460, p. 140602, 2024.

ZHANG, W.; LUO, Z.; WANG, A.; GU, X.; LV, Z. Kinetic models applied to quality change and shelf life prediction of kiwifruits. **LWT-Food Science and Technology**, v. 138, p. 110610, 2021.

ZHAO, D.; ZHOU, Y.; SUN, L.; TIAN, J.; XIANG, Q.; LI, K. The Stability, Rheological Properties and Interfacial Properties of Oil-in-Water (O/W) Emulsions Prepared from Dielectric Barrier Discharge (DBD) Cold Plasma-Treated Chickpea Protein Isolate and Myofibrillar Protein Complexes. **Foods**, v. 12, n. 19, p. 3629, 2023.