

INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS DE PAREDE NA EFICIÊNCIA DE ENCAPSULAMENTO E ESTABILIDADE DE COMPOSTOS BIOATIVOS EM SPRAY DRYING: UMA REVISÃO CRÍTICA

INFLUENCE OF WALL MATERIALS ON ENCAPSULATION EFFICIENCY AND STABILITY OF BIOACTIVE COMPOUNDS IN SPRAY DRYING: A CRITICAL REVIEW

INFLUENCIA DE LOS MATERIALES DE PARED EN LA EFICIENCIA DE ENCAPSULACIÓN Y LA ESTABILIDAD DE COMPUESTOS BIOATIVOS MEDIANTE SPRAY DRYING: UNA REVISIÓN CRÍTICA

Amanda Rafaela Ferreira Souza¹

Elida Lúcio Pereira²

Heloisa Farias Gonzaga³

José Henrique Batista Lima⁴

Luiz Fernando de Oliveira Coelho⁵

Michael Douglas Sousa Leite⁶

Sauly Martinho Gomes de Sousa⁷

Osvaldo Soares da Silva⁸

RESUMO: O presente estudo teve como objetivo analisar a influência dos materiais de parede na eficiência de encapsulamento e na estabilidade de compostos bioativos obtidos por spray drying, destacando os principais materiais utilizados e suas aplicações industriais. Metodologicamente, trata-se de uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, realizada nas bases de dados SciELO, Portal de Periódicos CAPES e Scopus, considerando publicações entre 2021 e 2026. Foram utilizados os descritores “spray drying” AND “wall materials” AND encapsulation, aplicando critérios de inclusão e exclusão relacionados ao tema proposto. Os resultados demonstraram que materiais como goma arábica, maltodextrina, quitosana, pectina, alginato, zeína e proteínas do soro do leite apresentam elevada eficiência na proteção de compostos bioativos frente à oxidação, calor, luz e umidade, contribuindo para maior estabilidade, retenção e liberação controlada. Observou-se ainda que combinações entre diferentes materiais encapsulantes proporcionam melhores resultados quando comparadas ao uso isolado. Conclui-se que os materiais de parede exercem papel fundamental na eficiência do encapsulamento por spray drying, sendo essenciais para o desenvolvimento de produtos alimentícios, farmacêuticos e nutracêuticos com maior estabilidade, funcionalidade e vida útil.

Palavras-chave: Spray drying. Encapsulamento. Compostos bioativos.

¹ Doutoranda em Engenharia de Processos (PPGEP/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

² Doutoranda em Engenharia de Processos (PPGEP/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

³ Doutoranda em Engenharia de Processos (PPGEP/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

⁴ Doutoranda em Engenharia de Processos (PPGEP/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

⁵ Doutoranda em Engenharia de Processos (PPGEP/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

⁶ Doutoranda em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais (PPGEGRN/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

⁷ Mestre em Gestão e Sistemas Agroindustriais (PPGSA/UFCG). Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

⁸ Doutor em Engenharia Química (UNICAMP). Professor da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

ABSTRACT: The present study aimed to analyze the influence of wall materials on encapsulation efficiency and the stability of bioactive compounds obtained by spray drying, highlighting the main materials used and their industrial applications. Methodologically, this is an integrative literature review with a qualitative and descriptive approach, conducted using the SciELO, CAPES Journal Portal, and Scopus databases, considering publications from 2021 to 2026. The descriptors "spray drying" AND "wall materials" AND encapsulation were used, applying inclusion and exclusion criteria related to the proposed topic. The results showed that materials such as gum arabic, maltodextrin, chitosan, pectin, alginate, zein, and whey proteins exhibit high efficiency in protecting bioactive compounds against oxidation, heat, light, and moisture, thereby contributing to greater stability, retention, and controlled release. Furthermore, combinations of different encapsulating materials provided better performance than the use of individual materials alone. It is concluded that wall materials play a fundamental role in the efficiency of spray drying encapsulation and are essential for the development of food, pharmaceutical, and nutraceutical products with improved stability, functionality, and shelf life.

Keywords: Spray drying. Encapsulation. Bioactive compounds.

RESUMEN: El presente estudio tuvo como objetivo analizar la influencia de los materiales de pared en la eficiencia de encapsulación y la estabilidad de compuestos bioactivos obtenidos mediante spray drying, destacando los principales materiales utilizados y sus aplicaciones industriales. Metodológicamente, se trata de una revisión integradora de la literatura, con enfoque cualitativo y carácter descriptivo, realizada en las bases de datos SciELO, Portal de Periódicos CAPES y Scopus, considerando publicaciones entre 2021 y 2026. Se utilizaron los descriptores "spray drying" AND "wall materials" AND encapsulation, aplicando criterios de inclusión y exclusión relacionados con el tema propuesto. Los resultados demostraron que materiales como goma arábiga, maltodextrina, quitosano, pectina, alginato, zeína y proteínas del suero de la leche presentan una elevada eficiencia en la protección de compuestos bioactivos frente a la oxidación, el calor, la luz y la humedad, contribuyendo a una mayor estabilidad, retención y liberación controlada. Asimismo, se observó que las combinaciones de diferentes materiales encapsulantes proporcionan mejores resultados en comparación con el uso aislado de cada material. Se concluye que los materiales de pared desempeñan un papel fundamental en la eficiencia del encapsulamiento mediante spray drying, siendo esenciales para el desarrollo de productos alimentarios, farmacéuticos y nutracéuticos con mayor estabilidad, funcionalidad y vida útil.

Palabras clave: Spray drying. Encapsulación. Compuestos bioactivos.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescente interesse por alimentos funcionais tem impulsionado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias capazes de preservar compostos bioativos presentes em diferentes matrizes alimentares. Esses compostos, como vitaminas, antioxidantes, lipídeos, carotenoides, compostos fenólicos e probióticos, desempenham papel fundamental na promoção da saúde e na prevenção de doenças, agregando valor nutricional e funcional aos

alimentos. Entretanto, muitos desses componentes apresentam elevada sensibilidade a fatores como temperatura, oxigênio, luz, umidade e variações de pH, podendo sofrer degradação durante as etapas de processamento, armazenamento e distribuição dos produtos alimentícios, comprometendo sua estabilidade, atividade biológica e eficiência funcional (Costa et al., 2021).

A tecnologia de alimentos constitui uma área em constante expansão, buscando desenvolver métodos inovadores capazes de produzir alimentos e ingredientes diferenciados que, além de atender às necessidades nutricionais, contribuam para a promoção do bem-estar e da saúde. Nesse cenário, a microencapsulação tem se destacado devido à sua ampla aplicabilidade em diferentes setores industriais, como os segmentos farmacêutico, cosmético, agrícola e alimentício. Na indústria de alimentos, essa tecnologia possibilita o desenvolvimento de produtos com maior estabilidade, proteção de compostos sensíveis e maior viabilidade econômica, despertando elevado interesse científico e mercadológico (Pereira et al., 2018).

O encapsulamento consiste em uma técnica na qual partículas, substâncias ou compostos ativos, denominados materiais do núcleo, são envolvidos por uma camada protetora conhecida como material de parede. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada com a finalidade de proteger, estabilizar e reduzir a degradação de compostos sensíveis frente às condições ambientais e aos processos industriais. Na indústria alimentícia, por exemplo, o encapsulamento é empregado para conservar enzimas, aromas, corantes, óleos essenciais e sabores, contribuindo para o aumento da estabilidade dos produtos, melhoria das características sensoriais e promoção da liberação controlada de compostos bioativos. No setor farmacêutico, essa técnica auxilia na administração e absorção de fármacos, enquanto na indústria cosmética é utilizada no desenvolvimento de hidratantes, protetores solares, fragrâncias e produtos antienvelhecimento contendo substâncias ativas sensíveis, como antioxidantes e filtros UV (Díaz-Montes, 2023).

Entre as diferentes técnicas de encapsulamento disponíveis, o spray drying, também conhecido como secagem por atomização, destaca-se como uma das metodologias mais utilizadas na indústria alimentícia devido à sua elevada eficiência, rapidez operacional, baixo custo e possibilidade de aplicação em larga escala. Essa técnica consiste na transformação de emulsões ou soluções líquidas em partículas secas por meio da pulverização do material em uma corrente de ar aquecido, permitindo a obtenção de pós com elevada estabilidade e facilidade de armazenamento. Além disso, o spray drying apresenta vantagens como a redução da atividade

de água, aumento da vida útil dos produtos e maior proteção de compostos bioativos frente aos processos oxidativos e térmicos (Lago et al., 2024).

Apesar das inúmeras vantagens associadas ao spray drying, a eficiência do encapsulamento e a estabilidade dos compostos bioativos encapsulados dependem diretamente das características dos materiais de parede utilizados durante o processo. Esses materiais desempenham papel fundamental na formação da matriz encapsulante, influenciando propriedades como retenção do composto ativo, solubilidade, higroscopicidade, estabilidade oxidativa, proteção térmica, tamanho das partículas e liberação controlada dos compostos bioativos. Diferentes materiais vêm sendo empregados na encapsulação por spray drying, incluindo maltodextrina, goma arábica, proteínas, amidos modificados, alginato e gelatina, cada um apresentando propriedades físico-químicas específicas que interferem diretamente na qualidade e estabilidade do produto final (Hernandez et al., 2022).

Entretanto, embora diversos estudos tenham investigado o uso de diferentes materiais de parede no encapsulamento de compostos bioativos, ainda existem divergências na literatura acerca da eficiência desses materiais em diferentes condições de processamento e tipos de compostos encapsulados. Além disso, a escolha do material encapsulante ideal permanece como um dos principais desafios para a indústria e para a pesquisa científica, uma vez que fatores como composição química, interação entre núcleo e parede, condições operacionais e características do composto bioativo podem influenciar significativamente os resultados obtidos.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão crítica acerca da influência dos materiais de parede na eficiência de encapsulamento e estabilidade de compostos bioativos obtidos por spray drying, destacando os principais materiais utilizados, suas propriedades, vantagens, limitações e aplicações na indústria alimentícia.

2 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter descritivo, com o objetivo de reunir, analisar e sintetizar produções científicas relacionadas à influência dos materiais de parede na eficiência de encapsulamento e na estabilidade de compostos bioativos obtidos por spray drying.

A busca dos estudos foi realizada nas bases de dados SciELO, Portal de Periódicos CAPES e Scopus, considerando publicações disponíveis no período de 2021 a 2026. Para a

estratégia de busca, foram utilizados os descritores em inglês: “spray drying” AND “wall materials” AND encapsulation, combinados pelo operador booleano AND, a fim de localizar estudos que abordassem simultaneamente a técnica de secagem por atomização, os materiais de parede e o processo de encapsulamento.

Foram adotados como critérios de inclusão: artigos científicos publicados entre 2021 e 2026, disponíveis nos idiomas português e inglês, que abordassem a temática do encapsulamento por spray drying, com ênfase nos materiais de parede, eficiência de encapsulamento e estabilidade de compostos bioativos. Foram excluídos estudos duplicados, trabalhos incompletos, resumos simples, capítulos de livros, teses, dissertações, editoriais e publicações que não apresentassem relação direta com o objetivo da pesquisa.

Após a busca inicial, os estudos foram selecionados por meio da leitura dos títulos e resumos, seguida da leitura integral dos artigos considerados elegíveis. A análise dos dados foi realizada de forma descritiva e interpretativa, buscando identificar os principais materiais de parede utilizados, suas propriedades, vantagens, limitações e efeitos sobre a eficiência de encapsulamento e a estabilidade dos compostos bioativos. Dessa forma, a revisão permitiu organizar criticamente as evidências disponíveis na literatura recente sobre o tema.

3 REVESTIMENTO POR PULVERIZAÇÃO (SPRAY DRYING) E SUA APLICAÇÃO NO ENCAPSULAMENTO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

Na indústria alimentícia, a encapsulação tem sido amplamente utilizada como estratégia para proteger compostos bioativos sensíveis, como vitaminas, probióticos e ácidos graxos ômega-3, minimizando processos de degradação durante o processamento e armazenamento dos alimentos. Essa tecnologia contribui para o aumento da vida útil dos produtos e para a preservação das características nutricionais e sensoriais dos alimentos. Além disso, no caso específico dos probióticos, o encapsulamento proporciona maior proteção frente às condições adversas do trato gastrointestinal, favorecendo a manutenção da viabilidade celular e da funcionalidade desses microrganismos (Rezagholizade-Shirvan et al., 2024).

Além da ampla aplicação na indústria alimentícia, as tecnologias de encapsulamento também vêm sendo utilizadas de forma crescente na indústria farmacêutica, especialmente devido à capacidade de promover a proteção e a liberação controlada de princípios ativos. Nesse setor, o encapsulamento contribui para aumentar a estabilidade dos compostos medicamentosos frente a fatores externos, reduzindo perdas durante o armazenamento e a administração dos

fármacos. Adicionalmente, os sistemas encapsulantes favorecem a biodisponibilidade e a absorção intestinal dos medicamentos, possibilitando a liberação gradual das substâncias ativas e aumentando a eficácia terapêutica, ao mesmo tempo em que reduzem possíveis efeitos adversos associados às doses convencionais (Rezagholizade-Shirvan et al., 2024).

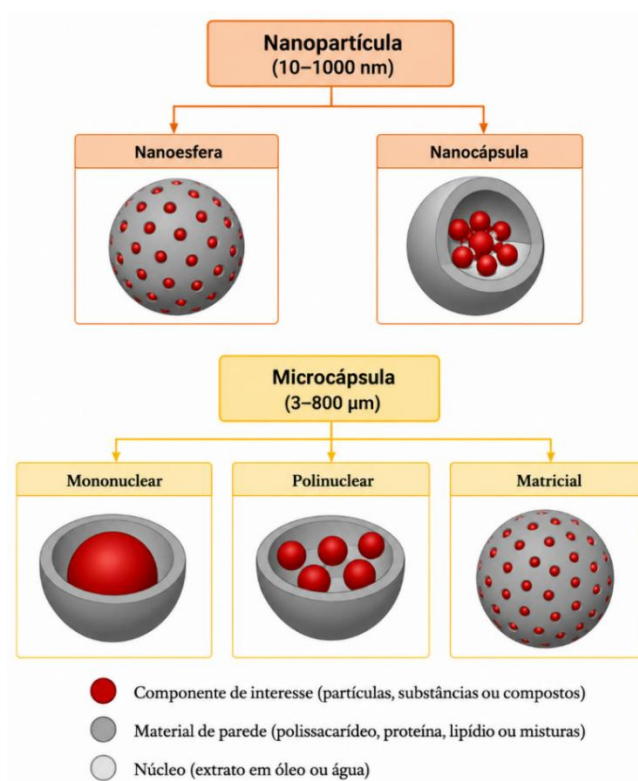
Dentre as diferentes tecnologias utilizadas para encapsulamento de compostos bioativos, o spray drying destaca-se como uma das metodologias mais empregadas em escala industrial. Segundo Lago et al. (2024), essa técnica apresenta ampla versatilidade para o encapsulamento de compostos bioativos utilizando materiais de parede à base de carboidratos, proteínas e derivados celulósicos. Os autores ressaltam que o spray drying possibilita a obtenção de micropartículas com elevada estabilidade físico-química, promovendo maior proteção dos compostos sensíveis frente à oxidação, umidade, luz e variações de temperatura. Além disso, o processo apresenta elevada aplicabilidade industrial devido à rapidez operacional, ao baixo custo e à possibilidade de produção contínua em larga escala.

Corroborando essa perspectiva, Melo et al. (2022) afirmam que a secagem por aspersão destaca-se pela praticidade operacional e viabilidade econômica, uma vez que requer poucas etapas para obtenção do produto seco e dispensa o uso de solventes orgânicos. Segundo os autores, essa técnica vem sendo amplamente aplicada tanto na indústria alimentícia quanto

6

farmacêutica com o objetivo de proteger compostos bioativos e controlar sua liberação. Nesse contexto, materiais de parede como goma arábica e maltodextrina são frequentemente empregados no processo de spray drying devido à elevada solubilidade e baixa viscosidade, características que facilitam o processamento e favorecem maior eficiência de encapsulamento. De modo geral, os processos de encapsulamento podem ser realizados por diferentes metodologias, incluindo técnicas que utilizam calor, como evaporação de solvente, secagem por pulverização (spray drying) e extrusão por fusão, bem como técnicas conduzidas em baixas temperaturas, como resfriamento por pulverização e liofilização. Entretanto, entre essas metodologias, a secagem por pulverização destaca-se como a técnica mais utilizada em escala industrial devido à sua eficiência, praticidade e viabilidade econômica. Dependendo da técnica empregada, podem ser produzidas nanopartículas, incluindo nanocápsulas e nanoesferas com dimensões variando entre 10 e 1000 nm, além de microcápsulas mononucleares, multinucleares ou matriciais com tamanhos entre 3 e 800 μm , conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Representação dos principais tipos de nanopartículas e microcápsulas utilizadas em processos de encapsulamento de compostos bioativos.



Fonte: Adaptado de Díaz-Montes, 2023.

As nanopartículas, com dimensões entre 10 e 1000 nm, subdividem-se em nanoesferas, nas quais o composto ativo encontra-se disperso uniformemente na matriz polimérica, e nanocápsulas, caracterizadas pela presença de um núcleo central revestido por uma camada protetora. Já as microcápsulas, com tamanhos variando entre 3 e 800 μm , podem ser classificadas em mononucleares, polinucleares e matriciais, dependendo da disposição do composto encapsulado no interior da estrutura. Além disso, a importância do material de parede, composto por polissacarídeos, proteínas, lipídios ou misturas, responsável por proteger os compostos bioativos contra fatores ambientais e favorecer sua estabilidade e liberação controlada em diferentes aplicações industriais (Díaz-Montes, 2023).

Nesse contexto, a nanoencapsulação tem se destacado como uma estratégia promissora para aumentar a proteção e a estabilidade de compostos bioativos sensíveis. De acordo com Tahir et al. (2021), os compostos bioativos são incorporados em estruturas microscópicas revestidas por membranas poliméricas específicas, permitindo maior preservação de suas propriedades funcionais. Nesse processo, as nanocápsulas apresentam os compostos ativos

confinados em uma cavidade central envolvida por uma parede polimérica, enquanto as nanoesferas correspondem a sistemas matriciais nos quais os compostos bioativos ficam distribuídos uniformemente em toda a estrutura.

Dessa forma, a nanoencapsulação contribui para o revestimento e a liberação controlada de substâncias bioativas, favorecendo a preservação das propriedades funcionais, o aumento da estabilidade e a melhoria da biodisponibilidade dos compostos encapsulados. Além disso, essa tecnologia apresenta elevado potencial para aplicações na indústria alimentícia, especialmente no desenvolvimento de produtos funcionais capazes de promover a liberação eficiente de compostos benéficos à saúde, bem como melhorar características sensoriais, como aroma e sabor (Tahir et al., 2021).

Entre as diferentes técnicas empregadas para obtenção dessas estruturas encapsuladas, o spray drying destaca-se como uma das metodologias mais utilizadas devido à sua eficiência e aplicabilidade industrial. Segundo Díaz-Montes (2023), o processo de encapsulamento por spray drying inicia-se com a preparação da emulsão, etapa na qual o material do núcleo, contendo os compostos bioativos, é misturado ao material de parede até a formação de uma solução homogênea. Posteriormente, essa mistura é submetida à atomização, processo em que o líquido é pulverizado em pequenas gotículas dentro da câmara de secagem. Em seguida, as gotículas entram em contato com o ar quente, promovendo rápida evaporação da água e formação das micropartículas encapsuladas. Por fim, o pó seco é coletado por sistemas de separação, originando um produto com maior estabilidade, proteção e vida útil dos compostos bioativos encapsulados.

Além da praticidade operacional, o spray drying apresenta a vantagem de ocorrer de maneira contínua e em etapa única, permitindo rápida remoção da água e obtenção de partículas secas com elevada estabilidade. Entretanto, fatores operacionais como temperatura do ar de entrada, vazão do ar, concentração da alimentação e pressão de atomização influenciam diretamente a eficiência da secagem e as propriedades físico-químicas e funcionais das micropartículas produzidas, tornando a otimização desses parâmetros essencial para melhorar a qualidade e estabilidade dos compostos encapsulados (Lago et al., 2024).

Corroborando essa perspectiva, Pérez-Pérez et al. (2024) afirmam que o encapsulamento por spray drying desempenha papel fundamental na proteção de compostos bioativos sensíveis, reduzindo processos de degradação causados por fatores ambientais, como oxidação, luz, calor e umidade. Os autores destacam que essa técnica contribui para o aumento da estabilidade

físico-química e da vida útil dos compostos encapsulados, preservando suas propriedades funcionais e biológicas durante o armazenamento. Além disso, o spray drying favorece a liberação controlada dos compostos bioativos, ampliando sua eficiência e potencial de aplicação em produtos alimentícios, farmacêuticos e nutracêuticos.

Nesse sentido, a estabilidade dos compostos bioativos constitui um fator fundamental para garantir a manutenção de suas propriedades funcionais e eficácia biológica ao longo do armazenamento e da aplicação industrial. Técnicas de encapsulamento, como secagem por aspersão, liofilização e coacervação, atuam formando barreiras protetoras contra agentes externos, como luz, calor e oxidação, reduzindo processos de degradação. Assim, compostos encapsulados tendem a apresentar maior estabilidade quando comparados às formas não encapsuladas, preservando características antioxidantes e aumentando a vida útil dos produtos. Portanto, o encapsulamento contribui significativamente para a proteção de substâncias sensíveis, favorecendo sua conservação e funcionalidade em diferentes aplicações alimentícias e farmacêuticas (Rezagholizade-Shirvan et al., 2024).

4 PRINCIPAIS MATERIAIS DE PAREDE UTILIZADOS NO ENCAPSULAMENTO POR SPRAY DRYING E SUA INFLUÊNCIA NA EFICIÊNCIA DE ENCAPSULAMENTO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

9

Os materiais de parede correspondem à estrutura protetora responsável por envolver e preservar o material do núcleo durante o processo de encapsulamento e nas etapas posteriores de armazenamento e manuseio. Esses materiais precisam apresentar resistência suficiente para suportar esforços mecânicos e diferentes condições ambientais, como variações de temperatura, umidade e atividade de água, evitando a degradação dos compostos encapsulados. Nesse contexto, nos processos de secagem por aspersão, a escolha do material encapsulante exerce influência direta sobre a estabilidade, proteção e vida útil dos compostos bioativos, além de impactar fatores como rendimento do processo e eficiência de encapsulamento (Díaz-Montes, 2023).

Diante da importância desses materiais no desempenho do encapsulamento, diferentes compostos vêm sendo amplamente utilizados em processos de spray drying devido à capacidade de proteger substâncias bioativas e aumentar sua estabilidade físico-química.

Segundo Díaz-Montes (2023), entre os principais materiais empregados destacam-se a quitosana, proteína do soro do leite, goma arábica, alginato, maltodextrina, dextrana, amido,

pectina e carragenina, cada um apresentando propriedades específicas que influenciam diretamente a eficiência de encapsulamento, a retenção dos compostos ativos, a estabilidade oxidativa e a liberação controlada.

Entre os materiais mais investigados na literatura recente, a goma arábica tem apresentado resultados promissores em diferentes aplicações de microencapsulamento. Zahara et al. (2024) demonstraram que esse material apresentou desempenho eficiente no processo de microencapsulamento por spray drying de compostos bioativos extraídos de *Cosmos caudatus* Kunth. Os autores verificaram que fatores como concentração do encapsulante e velocidade de agitação influenciaram diretamente a eficiência do processo e a liberação controlada dos compostos encapsulados. As melhores condições foram obtidas com concentração de 4% (p/v) de goma arábica e velocidade de agitação de 800 rpm, resultando em uma porcentagem de liberação de 71,87%, indicando elevada capacidade de disponibilização gradual dos compostos bioativos. Além disso, as microcápsulas apresentaram formato esférico, diâmetro médio de 152 μm e preservação significativa da atividade biológica, evidenciada pelo potencial inibitório da enzima alfa-amilase (IC_{50} de $55,09 \pm 0,57 \mu\text{g/mL}$). O estudo também revelou que os compostos encapsulados apresentaram maior estabilidade em condições simuladas do trato gastrointestinal, reforçando a importância dos materiais de parede na proteção, estabilidade e eficiência de liberação dos compostos bioativos encapsulados.

10

As gomas correspondem a polissacarídeos hidrossolúveis amplamente utilizados em diferentes setores industriais devido à sua elevada capacidade de formar dispersões viscosas mesmo em baixas concentrações. Esses compostos podem ser obtidos a partir de diferentes fontes naturais, incluindo algas, microrganismos e plantas superiores, destacando-se materiais como agar, alginato, goma xantana, goma gelana, pectina e goma arábica. Suas propriedades gelificantes estão relacionadas à elevada afinidade com a água, permitindo rápida hidratação e expansão estrutural, o que favorece importantes propriedades reológicas (Díaz-Montes, 2023).

Resultados semelhantes também foram observados por Melo et al. (2022), ao investigarem o uso da goma arábica e da maltodextrina no encapsulamento do óleo essencial de capim-limão por spray drying. Os autores verificaram que a utilização exclusiva da goma arábica proporcionou a maior eficiência de microencapsulação, atingindo 88,11%, além de preservar as propriedades antioxidantes e antimicrobianas do óleo essencial. O estudo evidenciou ainda atividade bactericida contra microrganismos Gram-positivos e Gram-

negativos, indicando que as micropartículas produzidas possuem potencial para aplicação como aditivo funcional e natural nas indústrias alimentícia e farmacêutica.

Associada frequentemente à goma arábica em processos de encapsulamento, a maltodextrina destaca-se por suas propriedades tecnológicas favoráveis. Esse composto consiste em um carboidrato obtido a partir da hidrólise do amido, caracterizando-se pela elevada solubilidade em água, sabor neutro e baixa viscosidade, fatores que favorecem sua ampla utilização como material encapsulante de baixo custo e boa eficiência tecnológica (Ligarda-Samanez et al., 2023).

Nesse sentido, Safiah Saah et al. (2024) observaram que a combinação entre maltodextrina e goma arábica apresentou os melhores resultados no encapsulamento de *Boesenbergia rotunda*, promovendo maior eficiência de encapsulamento e preservação dos compostos bioativos. Os autores verificaram que as formulações MDGA-7 e MDGA-5 apresentaram maior retenção de compostos fenólicos, maior teor de pinostrobin e aumento da atividade antioxidante quando comparadas aos encapsulados produzidos com os materiais isolados. Além disso, os encapsulados demonstraram baixa citotoxicidade e potencial osteogênico em células pré-osteoblásticas, evidenciando que a associação entre maltodextrina e goma arábica favorece maior estabilidade e funcionalidade dos compostos bioativos para aplicações alimentícias e farmacêuticas.

11

Além dos materiais tradicionalmente utilizados, estudos recentes também vêm investigando alternativas sustentáveis para aplicação como materiais de parede. Thao et al. (2022) destacaram o potencial das hemiceluloses da madeira, como galactoglucomananos de abeto (GGM) e glucuronoxilanos de bétula (GX), como materiais de parede sustentáveis para encapsulamento de compostos bioativos. Os autores observaram eficiência de encapsulamento variando entre 88% e 96% para GGM e entre 63% e 98% para GX, valores superiores aos obtidos com goma arábica, cuja eficiência variou entre 49% e 92%. Além disso, os encapsulantes derivados da madeira apresentaram maior estabilidade física e maior proteção contra oxidação do óleo de linhaça encapsulado, atribuídas à presença de resíduos fenólicos e à capacidade de formar emulsões mais estáveis com gotículas menores. O estudo evidenciou ainda que esses materiais possuem propriedades físico-químicas promissoras para aplicações alimentícias e industriais envolvendo compostos bioativos sensíveis.

De maneira semelhante, Plati, Papi e Paraskevopoulou (2021) observaram que a utilização de proteína isolada do soro do leite associada à maltodextrina como materiais de

parede no nano spray drying apresentou elevada eficiência de encapsulamento (>98%) e recuperação de pó superior a 77% para o óleo essencial de orégano. Os autores destacaram que a encapsulação favoreceu a retenção dos compostos bioativos, maior estabilidade estrutural das partículas e intensificação da atividade antibacteriana frente a *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, evidenciando o potencial da técnica para aplicações alimentícias e conservação de compostos sensíveis.

A utilização combinada de diferentes materiais encapsulantes também tem demonstrado resultados superiores quando comparada ao uso isolado dos compostos. Nascimento et al. (2023) verificaram que a combinação entre isolado de proteína do soro do leite, pectina de alto teor de metoxila e goma arábica apresentou os melhores resultados na preservação de compostos fenólicos e na retenção da atividade antioxidante de compostos bioativos encapsulados por spray drying. Os autores observaram que a associação desses materiais de parede promoveu maior estabilidade dos compostos durante 120 dias de armazenamento, demonstrando desempenho superior quando comparada ao uso isolado dos encapsulantes. Dessa forma, os resultados evidenciaram que combinações sinérgicas de materiais de parede podem aumentar significativamente a eficiência de encapsulamento e a proteção dos compostos bioativos frente aos processos de degradação.

12

Corroborando essa perspectiva, Nájera-Martínez et al. (2023) observaram que a utilização de pectina e alginato como materiais de parede no encapsulamento do ácido gálico por spray drying apresentou resultados promissores quanto à eficiência de encapsulamento e estabilidade do composto bioativo. Os autores verificaram taxas de eficiência variando entre 79% e 90%, com melhores resultados obtidos utilizando 3% de pectina e 0,75% de alginato de sódio. Além disso, as microcápsulas apresentaram formato esférico, elevada estabilidade em pH 7 e capacidade de liberação controlada do ácido gálico, demonstrando o potencial desses biopolímeros como materiais encapsulantes para aplicações alimentícias, farmacêuticas e cosméticas.

Entre os materiais proteicos utilizados no encapsulamento, a zeína também tem recebido destaque devido às suas propriedades funcionais e elevada capacidade de formação de filmes protetores. Ziting Gao et al. (2025) destacaram a zeína como um material de parede promissor para microencapsulação devido às suas propriedades hidrofóbicas, capacidade antioxidante e elevada formação de filmes protetores. A zeína, comumente conhecida como “glúten de milho”, está amplamente presente no endosperma do milho e representa 45–50% de toda a proteína do

milho. Os autores observaram que a zeína apresenta vantagens importantes no encapsulamento de compostos bioativos, incluindo maior estabilidade, liberação controlada e proteção contra degradação oxidativa. Além disso, o estudo evidenciou que as microcápsulas à base de zeína possuem ampla aplicabilidade em setores como alimentos, produtos farmacêuticos, têxteis e agricultura, contribuindo para melhorias nas propriedades antioxidantes, antimicrobianas e funcionais dos produtos encapsulados.

Cruz-Bravo et al. (2023) destacaram o uso do N-lok como material de parede no encapsulamento de compostos fenólicos extraídos da casca de feijão, apresentando elevada eficiência de microencapsulação (96,29%). Os autores observaram que a encapsulação contribuiu significativamente para a estabilidade dos compostos bioativos ao longo do armazenamento, especialmente sob diferentes condições de temperatura e atividade de água. Além disso, as micropartículas produzidas apresentaram tamanho médio de aproximadamente 20 μm , evidenciando o potencial do N-lok como encapsulante eficiente para aplicações alimentícias e farmacêuticas envolvendo compostos fenólicos sensíveis.

Outras combinações de materiais de parede também têm demonstrado resultados satisfatórios na preservação de compostos bioativos sensíveis. Nesse contexto, os achados de Rahmadi et al. (2022) demonstraram que a maltodextrina associada à quitosana apresentou eficiência satisfatória como material de parede no encapsulamento do vinagre de jaca Mandai por spray drying, contribuindo para a preservação dos compostos fitoquímicos bioativos. Os autores verificaram que a formulação contendo maltodextrina com 15 °Brix de sólidos solúveis totais e 1% de quitosana apresentou os melhores resultados, com teor de umidade de 7,54%, além de elevados níveis de flavonoides (9,13 mg equivalente de catequina kg^{-1}), compostos fenólicos (69,61 mg equivalente de ácido gálico kg^{-1}) e taninos (25,04 mg equivalente de ácido tânico kg^{-1}). O estudo evidenciou que a manutenção adequada dos sólidos solúveis totais favoreceu maior estabilidade e atividade fitoquímica do produto encapsulado, reforçando o potencial da maltodextrina e da quitosana como materiais de parede para proteção de compostos bioativos sensíveis.

Da mesma forma, Bittencourt et al. (2022) observaram que a combinação de carragenina com proteína do farelo de arroz e albumina sérica bovina apresentou elevada eficiência no encapsulamento de eugenol por spray drying, favorecendo maior estabilidade e proteção do composto bioativo. Os autores verificaram retenção de eugenol de 89,7% e 86,5% nas formulações contendo carragenina associada à proteína do farelo de arroz ou à albumina bovina,

respectivamente. Além disso, a interação entre proteína do farelo de arroz, albumina bovina e carragenina resultou em eficiência de encapsulamento de 80,5%. O estudo também confirmou, por meio de análises microscópicas e espectroscópicas, a incorporação eficiente do eugenol nas microcápsulas, evidenciando o potencial desses materiais de parede para aplicações alimentícias envolvendo compostos antioxidantes e antimicrobianos sensíveis.

Além disso, a eficiência do encapsulamento por spray drying também foi observada em extratos vegetais ricos em compostos fenólicos. Hernandez et al. (2022) verificaram que o encapsulamento do extrato aquoso de *Mimosa tenuiflora*, rico em compostos fenólicos e taninos condensados, foi eficiente na preservação das atividades antioxidante, antifúngica e antiaflatoxina durante o armazenamento. Os autores observaram que o uso de materiais de parede polissacarídicos apresentou melhor capacidade de conservação das propriedades biológicas do extrato quando comparado ao armazenamento por congelamento. Ademais, o estudo demonstrou que a microencapsulação favoreceu maior estabilidade dos compostos bioativos ao longo do tempo, reforçando o potencial da técnica para aplicações alimentícias e farmacêuticas envolvendo compostos sensíveis à degradação ambiental.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

14

A partir da análise dos estudos foi possível verificar que os materiais de parede exercem papel fundamental no desempenho do encapsulamento, influenciando diretamente fatores como eficiência de retenção dos compostos bioativos, proteção contra degradação oxidativa e térmica, estabilidade durante o armazenamento, solubilidade, higroscopicidade e liberação controlada dos compostos encapsulados.

Os resultados evidenciaram que materiais como goma arábica, maltodextrina, quitosana, alginato, pectina, proteínas do soro do leite, zeína, carragenina e derivados polissacarídicos apresentam características específicas capazes de favorecer a proteção e preservação de compostos sensíveis em diferentes condições de processamento e armazenamento. Além disso, observou-se que a associação entre diferentes materiais encapsulantes frequentemente proporciona resultados superiores ao uso isolado, promovendo maior estabilidade físico-química, maior eficiência de encapsulamento e melhor preservação das propriedades funcionais dos compostos bioativos.

A revisão também demonstrou que o spray drying permanece como uma das técnicas mais eficientes e amplamente utilizadas para encapsulamento de compostos bioativos, devido à

sua praticidade operacional, baixo custo, elevada aplicabilidade industrial e capacidade de produção contínua em larga escala. Adicionalmente, verificou-se que a técnica contribui significativamente para a redução da degradação causada por fatores ambientais, aumentando a vida útil e a estabilidade dos compostos encapsulados, além de favorecer a liberação controlada em aplicações alimentícias, farmacêuticas e nutraceuticas.

Entretanto, os estudos analisados evidenciaram que a eficiência do encapsulamento não depende exclusivamente do material de parede utilizado, mas também das condições operacionais do processo, das interações entre núcleo e encapsulante e das características físico-químicas dos compostos bioativos. Dessa forma, a escolha do material encapsulante ideal ainda representa um importante desafio para a indústria e para a pesquisa científica, exigindo estudos adicionais voltados à otimização das formulações e dos parâmetros operacionais do spray drying.

Por fim, conclui-se que os materiais de parede possuem influência determinante na eficiência do encapsulamento e na estabilidade de compostos bioativos obtidos por spray drying, sendo essenciais para o desenvolvimento de produtos com maior qualidade, estabilidade e funcionalidade. Assim, o avanço das pesquisas envolvendo novos materiais encapsulantes, especialmente alternativas sustentáveis e combinações sinérgicas entre biopolímeros, poderá contribuir significativamente para o aprimoramento das tecnologias de encapsulamento e ampliação de suas aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

BITTENCOURT, P. R. S.; et al. Optimization of eugenol-loaded microcapsules obtained by spray drying using a simplex-centroid mixture design. **Química Nova**, v. 45, n. 2, p. 152–158, 2022.

COSTA, B. L. da.; et al. Eficiência da técnica de electrospraying na encapsulação de compostos lipídicos aplicados a alimentos: uma revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, e128101724420, 2021.

CRUZ-BRAVO, R. K. et al. Spray-dried microencapsulation of bean coat flour (*Phaseolus vulgaris* L.) bioactive compounds: optimization, functional activity, and storage. **CyTA - Journal of Food**, v. 21, n. 1, p. 493–501, 2023.

DÍAZ-MONTES, E. Wall materials for encapsulating bioactive compounds via spray-drying: a review. **Polymers**, v. 15, n. 12, p. 2659, 2023.

GAO, Z.; et al. Progress in the study of zein as wall materials for the encapsulation of bioactive compounds: construction, applications, and prospects. **Industrial Crops and Products**, v. 236, art. 122078, 2025.

HERNANDEZ, C.; et al. Preservation of *Mimosa tenuiflora* antiaflatoxigenic activity using microencapsulation by spray-drying. **Molecules**, v. 27, n. 2, p. 496, 2022.

LAGO, G. V. P. do; et al. Secagem, revestimento e encapsulamento de partículas por spray-dryer: desenvolvimento, desafios e inovações. **Revista Cereus**, v. 16, n. 1, p. 306-322, 2024.

LIGARDA-SAMANEZ, C. A. et al. Microencapsulation of propolis and honey using mixtures of maltodextrin/tara gum and modified native potato starch/tara gum. **Foods**, v. 12, n. 9, p. 1873, 2023.

MELO, A. M.; et al. Effect of microencapsulation on chemical composition and antimicrobial, antioxidant and cytotoxic properties of lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) essential oil. **Food Technology and Biotechnology**, v. 60, n. 3, p. 386-395, 2022.

NÁJERA-MARTÍNEZ, E. F. et al. Microencapsulation of gallic acid based on a polymeric and pH-sensitive matrix of pectin/alginate. **Polymers**, v. 15, n. 14, p. 3014, 2023.

NASCIMENTO, A. P. S.; et al. Enhancing antioxidant retention through varied wall material combinations in grape spray drying and storage. **Antioxidants**, v. 12, n. 9, p. 1745, 2023.

PEREIRA, K. C.; et al. Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, e2017083, 2018.

PÉREZ-PÉREZ, V.; et al. Exploring the impact of encapsulation on the stability and bioactivity of peptides extracted from botanical sources: trends and opportunities. **Frontiers in Chemistry**, v. 12, p. 1423500, 2024.

PLATI, F.; PAPI, R.; PARASKEVOPOULOU, A. Characterization of oregano essential oil (*Origanum vulgare* L. subsp. *hirtum*) particles produced by the novel nano spray drying technique. **Foods**, v. 10, n. 12, p. 2923, 2021.

RAHMADI, A.; et al. Proximate analysis of the high phytochemical activity of encapsulated *Mandai cempedak* (*Artocarpus champeden*) vinegar prepared with maltodextrin and chitosan as wall materials. **Food Research**, v. 11, p. 865, 2022.

REZAGHOLIZADE-SHIRVAN, A.; et al. Bioactive compound encapsulation: characteristics, applications in food systems, and implications for human health. **Food Chemistry X**, v. 24, p. 101953, 2024.

SAAH, S.; et al. Physicochemical and biological properties of encapsulated *Boesenbergia rotunda* extract with different wall materials in enhancing antioxidant, mineralogenic and osteogenic activities of MC3T3-E1 cells. **Saudi Pharmaceutical Journal**, v. 32, n. 4, p. 101998, 2024.

TAHIR, A. et al. Recent approaches for utilization of food components as nano-encapsulation: a review. **International Journal of Food Properties**, v. 24, n. 1, p. 1074–1096, 2021.

THAO, M. H.; Let al. Wood hemicelluloses as effective wall materials for spray-dried microcapsulation of polyunsaturated fatty acid-rich oils. **Food Research International**, v. 164, art. 112333, fev. 2023.

ZAHARA, I. A.; et al. Microencapsulation by spray drying of *Cosmos caudatus* Kunth. extracts using gum arabic: influencing factors and controlled release. **Indonesian Food Science and Technology Journal**, v. 8, n. 1, p. 27–35, 2024.