

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Engenharia de Alimentos

**MICROENCAPSULAÇÃO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES  
INDUSTRIAIS**

Jonatas Ferreira Santana dos Santos



Jonatas Ferreira Santana dos Santos

**MICROENCAPSULAÇÃO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES  
INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Janaína Teles de Faria

Montes Claros  
Instituto de Ciências Agrárias - UFMG

2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos 05 dias do mês de julho de 2023, às 08 h 30 min, o/a estudante Jonas Ferreira Santana dos Santos, matrícula 2017084268, defendeu o Trabalho intitulado "MICROENCAPSULAÇÃO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS" tendo obtido a média (97,00 noventa e sete pontos).

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** 97,00 (noventa e sete pontos)

**Orientador(a):** Janaína Teles de Faria

**Nota:** digitar a nota em numeral (escrever a nota por extenso)

**Coorientador(a), se houver:** nome completo do coorientador

**Nota:** 97,00 (noventa e sete pontos)

**Examinador(a):** Caroline Liboreiro Paiva

**Nota:** 97,00 (noventa e sete pontos)

**Examinador(a):** Érika Endo Alves

**Nota:** digitar a nota em numeral (escrever a nota por extenso)

**Examinador(a):** nome completo do examinador



Documento assinado eletronicamente por **Janaina Teles de Faria, Professora do Magistério Superior**, em 06/07/2023, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Caroline Liboreiro Paiva, Membro de comissão**, em 06/07/2023, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Erika Endo Alves, Professora do Magistério Superior**, em 07/07/2023, às 13:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2431710** e o código CRC **6CDA800F**.

---

**Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.**

Dedico primeiramente a Deus. À minha mãe, Círia, que me deu, além da vida, os princípios essenciais que me conduziram até aqui. Aos meus avós Antônio e Helena, meus alicerces morais ao longo de toda a vida, bem como toda a minha família. Aos meus amigos, por todos os momentos de apoio e aos momentos únicos de camaradagem. À minha eterna companheira Laiza, pelo incentivo incessante e por todas as palavras positivas.

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Janaína Faria, pelas palavras de otimismo, pelos ensinamentos e pela importante contribuição a este trabalho e toda a minha jornada acadêmica.

Aos demais professores ao longo da minha vida, pelas oportunidades de crescimento e aprendizado, pelo conhecimento transmitido, pela confiança e compreensão.

## RESUMO

A microencapsulação consiste no encapsulamento de compostos bioativos ou células nos estados sólido, líquido ou gasoso, transformando-os em cápsulas cujo tamanho pode ser classificado em nano, micro ou macro. Essa tecnologia surgiu no início do século XX e vem sendo utilizada nas indústrias alimentícia, farmacêutica, de agrotóxicos, têxtil, cosmética, entre outras; sendo aplicada no aprisionamento de ácidos, óleos, vitaminas, minerais, microrganismos, enzimas e princípios ativos, por exemplo. A encapsulação de compostos de interesse fornece inúmeras vantagens devido à grande variedade de métodos e materiais disponíveis para a técnica, conferindo aos produtos propriedades aprimoradas, como maior estabilidade, proteção contra fatores externos adversos, solubilidade e liberação controlada. Seu sucesso deve-se à escolha correta do material de encapsulamento, forma de liberação do núcleo e método de encapsulamento adotados. Os materiais de parede devem ter boa capacidade de formação de filme, não reagir com o núcleo, apresentar custo competitivo e para a indústria de alimentos, especificamente, devem ser comestíveis e biocompatíveis. Os métodos de encapsulamento devem ser preferencialmente de fácil execução, rápidos, de baixo custo e facilmente aplicados em escala industrial. Nesta revisão, alguns dos aspectos mais relevantes da microencapsulação, como características, classificações, materiais de revestimento, formas de liberação, métodos de encapsulamento e aplicações na tecnologia de alimentos e outras áreas serão brevemente apresentados e discutidos.

**Palavras-chave:** Encapsulação. Material de parede. Compostos bioativos. Microcápsulas. Liberação controlada.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Morfologia das microcápsulas .....  | 14 |
| Figura 2 – Diferentes morfologias das microcápsulas .....  | 15 |
| Figura 3 – Esquema ilustrativo do processo de microencapsulação por <i>spray drying</i> .....                    | 25 |
| Figura 4 – Produção de micropartículas lipídicas no estado sólido pela técnica de <i>spray chilling</i><br>..... | 27 |
| Figura 5 – Revestimento em leito fluidizado “ <i>top-spray</i> ” .....   | 29 |
| Figura 6 – Esquema de formação de filme por meio da técnica de leito fluidizado .....                            | 30 |
| Figura 7 – Esquemática de um revestidor de leito fluidizado .....  | 31 |
| Figura 8 – Estrutura molecular da $\beta$ -ciclodextrina .....   | 33 |
| Figura 9 – Esquema do processo de coacervação aplicado na encapsulação de princípios ativos<br>.....             | 36 |
| Figura 10 – Separação de fases em coacervação complexa.....  | 37 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Exemplos de agentes encapsulantes utilizados no encapsulamento de produtos alimentícios .....   | 16 |
| Tabela 2 - Compostos alimentares encapsulados (material de núcleo), sua finalidade e alguns exemplos.....  | 18 |
| Tabela 3 – Alguns dos principais métodos de microencapsulação utilizados, estado físico do material de núcleo e seus respectivos tamanhos de partículas obtidos..... | 21 |
| Tabela 4 – Resumo dos principais métodos de encapsulação: etapas do processo, vantagens, limitações e tipos de partículas produzidas .....                           | 22 |
| Tabela 5 – Exemplos de aplicação de encapsulação na indústria e tecnologia de alimentos .....  | 44 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |  |
|---------|--|
| CAGR    | - <i>Compound Annual Growth Rate</i>         |
| CD      | - Ciclodextrinas                             |
| DHA     | - Ácido Graxo Docosaheptaenóico (Ômega 3)    |
| DNA     | - Ácido Desoxirribonucleico                  |
| EPA     | - Ácido Eicosapentaenoico (Ômega 3)          |
| FDA     | - <i>Food and Drug Administration</i>        |
| GRAS    | - <i>Generally Recognized As Safe</i>        |
| ICA     | - Instituto de Ciências Agrárias             |
| P (3HB) | - Poli (3-hidroxibutirato)                   |
| P (3HV) | - Poli (3-hidroxivalerato)                   |
| PCL     | - Poli ( $\epsilon$ -caprolactona)           |
| PDLA    | - Poli (D, L-ácido láctico)                  |
| pH      | - Potencial hidrogeniônico                   |
| RNA -   | - Ácido Ribonucleico                         |
| SCIELO  | - <i>Scientific Eletronic Library Online</i> |
| TCM     | - Triglicerídeos de Cadeia Média             |
| UFMG    | - Universidade Federal de Minas Gerais       |

## SUMÁRIO

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2</b>   | <b>METODOLOGIA.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>3.1</b> | <b>MICROENCAPSULAÇÃO: CONCEITOS E PRINCIPAIS DEFINIÇÕES</b>    | <b>11</b> |
| 3.1.1      | <i>Micropartículas .....</i>                                   | <i>13</i> |
| 3.1.2      | <i>Agente encapsulante .....</i>                               | <i>15</i> |
| 3.1.3      | <i>Agente encapsulado e seus mecanismos de liberação.....</i>  | <i>17</i> |
| <b>3.2</b> | <b>PRINCIPAIS TÉCNICAS DE ENCAPSULAÇÃO UTILIZADAS.....</b>     | <b>20</b> |
| 3.2.1      | <i>Métodos Físicos.....</i>                                    | <i>24</i> |
| 3.2.2      | <i>Métodos Químicos .....</i>                                  | <i>32</i> |
| 3.2.3      | <i>Métodos Físico-Químicos.....</i>                            | <i>35</i> |
| <b>3.3</b> | <b>MATERIAIS UTILIZADOS NA MICROENCAPSULAÇÃO.....</b>          | <b>38</b> |
| <b>3.4</b> | <b>APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS E OUTRAS ÁREAS.....</b> | <b>41</b> |
| 3.4.1      | <i>Indústria e tecnologia de alimentos.....</i>                | <i>42</i> |
| 3.4.2      | <i>Outras áreas .....</i>                                      | <i>47</i> |
| <b>4</b>   | <b>PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>                              | <b>51</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                               | <b>52</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>54</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A microencapsulação é um processo de revestimento no qual compostos bioativos ou células nos estados sólido, líquido ou gasoso são transformados em cápsulas de tamanho nano, micro e macrométrico. Em outras palavras, é o processo pelo qual compostos de interesse são envoltos por um revestimento ou embutidos em uma matriz, resultando em partículas cuja dimensão pode variar de nanômetros a vários milímetros, com muitas propriedades úteis para diversos segmentos industriais (ALU'DATT *et al.*, 2022; ESTEVINHO *et al.*, 2013; PATEIRO *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2014; TIMILSENA; HAQUE; ADHIKARI, 2020).

Do encapsulado formado advém diversas nomenclaturas para definir as suas várias partes, as quais incluem agente encapsulante e agente encapsulado. O composto a ser encapsulado é denominado de material de núcleo, fase interna, agente ativo, preenchimento ou agente encapsulado. O material que envolve o agente ativo é comumente chamado de casca, material de parede ou revestimento, fase externa ou membrana. Esse, por sua vez, normalmente é insolúvel e não reativo com o núcleo, podendo ser constituído de carboidratos, gomas, proteínas, polissacarídeos, lipídios, ceras e polímeros sintéticos. Para revestir o material do núcleo, a matriz ou invólucro geralmente é aplicada na forma líquida (solução, suspensão ou emulsão); e deve conferir excelente formação de filme e propriedades de barreira contra oxigênio, água, pressão, calor e/ou luz, a fim de proteger o material do núcleo (ARENAS-JAL; SUÑÉ-NEGRE; GARCÍA-MONTOYA, 2020; SOBEL, 2014; SUAVE *et al.*, 2006).

Várias técnicas de encapsulação têm sido utilizadas para encapsular uma ampla gama de produtos como vitaminas, minerais, corantes, antioxidantes, óleos essenciais, enzimas, probióticos e medicamentos, para posterior aplicação nos mais diversos segmentos industriais, como agroquímico, farmacêutico, têxtil, de cosméticos e alimentício (ANJOS *et al.*, 2018; BAJAC *et al.*, 2022; BALCI-TORUN; OZDEMIR, 2021; FERREIRA; NICOLETTI; DRAGOSAVAC, 2023; MARTINS *et al.*, 2022; NAMI *et al.*, 2023; NANDY *et al.*, 2020; OGILVIE-BATTERSBY *et al.*, 2022; SCHNEIDER *et al.*, 2023). Geralmente, os objetivos são evitar reações químicas, promover a liberação controlada de substâncias, proteger os materiais do núcleo contra condições adversas e preservar suas propriedades biológicas, funcionais e físico-químicas, e mascarar sabor e odor indesejáveis (BAKRY *et al.*, 2015; CARVALHO; ESTEVINHO; SANTOS, 2016; JAFARI, 2017; SILVA *et al.*, 2014).

No entanto, apesar de ser uma tecnologia muito versátil e promissora que vem sendo amplamente estudada, a microencapsulação apresenta desafios, como a escolha das condições mais apropriadas para a produção de microcápsulas altamente eficazes e estáveis, pois muitas

variáveis impactam a qualidade das micropartículas, incluindo as técnicas de preparação, propriedades do material do núcleo e do material da parede (JAFARI, 2017).

Sendo assim, é apresentada neste trabalho uma revisão bibliográfica sobre a técnica de microencapsulação, trazendo uma abordagem geral e sucinta das suas definições básicas, principais materiais e métodos utilizados bem como algumas de suas aplicações na indústria de alimentos e em outras áreas.

## **2 METODOLOGIA**

De maneira a realizar este estudo, foram realizadas pesquisas em livros, artigos e trabalhos científicos publicados nas áreas de alimentos, farmacêutica, cosméticos, têxtil e agroquímica, utilizando-se do banco de dados das plataformas Google Acadêmico, *Science Direct* e *Scientific Eletronic Library Online (Scielo)*.

Para a busca dos referenciais teóricos, não houve restrição de línguas, sendo utilizados trabalhos e buscas principalmente em inglês e português. As palavras-chave pesquisadas foram: *microencapsulação/microencapsulation*, *micropartículas/microparticles*, *inclusão molecular/molecular inclusion*, *spray drying encapsulation*, *coacervação/coacervation method*, *methods encapsulation*, *spray chilling applications*, *spray drying applications*, *coacervation applications*, *leito fluidizado/fluidized bed*, *alginato/alginate*, *quitosana/chitosan*, *maltodextrina/maltodextrin*, *microencapsulation of flavor/enzymes/probiotics/phenolics/vitamins/natural colorants/essential oils* e *microencapsulation in food industry*, sendo cada palavra-chave utilizada de forma isolada e também associada com outras palavras-chave para buscas mais específicas.

Como forma de inclusão nesta revisão bibliográfica, estabeleceu-se o uso de estudos encontrados em sua totalidade nos bancos de dados, priorizando-se trabalhos publicados entre os anos de 2017 e 2023. Foram excluídas as publicações em que não foi possível o acesso e a leitura em sua totalidade ou que apresentassem informações pouco relevantes para o interesse deste estudo ou que não se enquadravam em sua proposta.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 MICROENCAPSULAÇÃO: CONCEITOS E PRINCIPAIS DEFINIÇÕES**

O conceito de encapsulamento teve origem no modelo celular, no qual a informação genética contida no núcleo é protegida do meio externo por uma membrana semipermeável que

controla o transporte de diversos agentes (JAFARI, 2017). De forma análoga, a microencapsulação consiste em uma técnica que visa aprisionar gotículas líquidas, partículas sólidas ou compostos gasosos em um agente encapsulante. Esses compostos podem ser completamente envolvidos por um material de revestimento ou embutidos em uma matriz homogênea ou heterogênea, formando pequenas cápsulas com diversas propriedades úteis (ALU'DATT *et al.*, 2022; GHOSH, 2006).

Esse processo começou no final da década de 1930 como uma alternativa limpa/sustentável ao papel carbono e à fita carbono. Na década de 1950, foram finalmente desenvolvidas reproduções de papel e fitas contendo corantes em pequenas cápsulas que eram liberados pelo impacto das teclas das máquinas de escrever, ou pela pressão de uma caneta ou lápis, estimulando assim o desenvolvimento de diversos materiais microencapsulados, incluindo alimentos, cosméticos, medicamentos, entre outros produtos (ALU'DATT *et al.*, 2022; JAFARI, 2017; VENKATESAN; MANAVALAN; VALLIAPPAN, 2009).

Com o passar do tempo, a definição da tecnologia de encapsulamento foi sendo modificada de acordo com as novas descobertas e aplicações às quais se destinavam. Nos anos 70, o método era considerado uma técnica de empacotamento em que polímeros eram utilizados para revestir conteúdos, visando uma liberação controlada e pré-determinada. Em 1993, a definição mudou para "embalagens extremamente pequenas" compostas de materiais de revestimento e núcleo, diferenciando-se das embalagens tradicionais por sua capacidade de melhor desempenho e uso. Em 2005, o encapsulamento foi considerado uma nova forma de obtenção de produtos com propriedades únicas. Anos mais tarde, em 2017, é utilizada para a conservação e manutenção de diversas macromoléculas, como compostos bioativos, microrganismos, enzimas, corantes, entre outros, protegendo-os contra as condições de processamento mais severas (MICROENCAPSULAÇÃO, 2017).

Na microencapsulação, o material a ser encapsulado é conhecido como núcleo, substância ativa ou encapsulada, enquanto o polímero que o envolve é chamado de material de parede, matriz, revestimento ou casca. O material de parede, geralmente constituído de gomas, proteínas, lipídios ou polímeros sintéticos, é insolúvel e não reativo com o núcleo. Para permitir o envelopamento do núcleo, os materiais de revestimento são normalmente aplicados na forma de líquido (como solução, suspensão ou material fundido), devendo constituir uma barreira eficaz contra oxigênio, água, pressão, calor e/ou luz para proteger o núcleo e possuir boas propriedades de formação de filme (ARENAS-JAL; SUÑÉ-NEGRE; GARCÍA-MONTOYA, 2020).

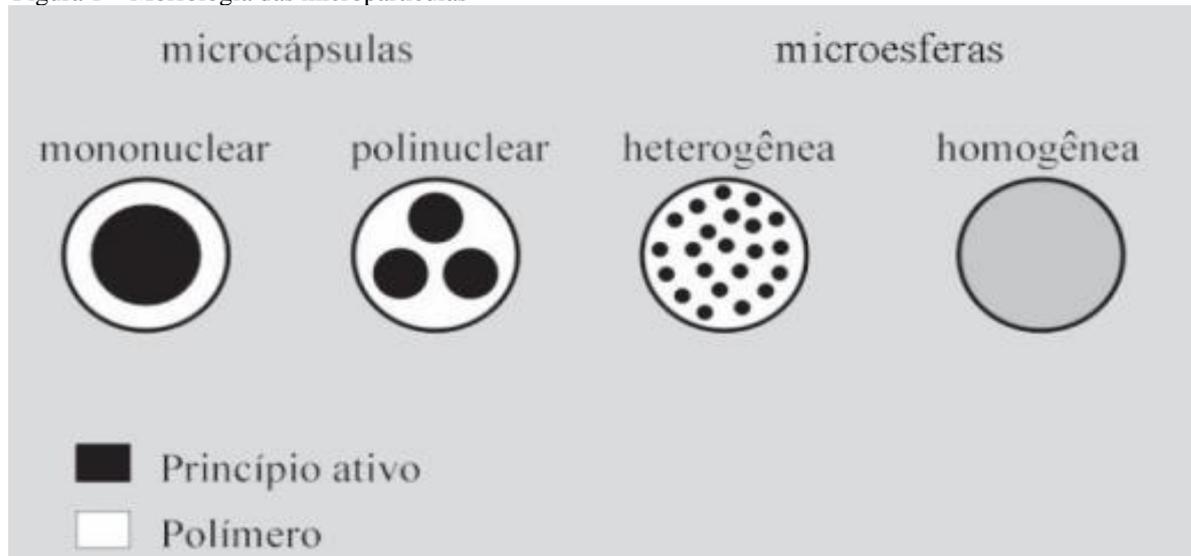
Para a obtenção de um produto microencapsulado, deve-se atentar inicialmente a fatores como a finalidade do produto e a escolha apropriada do agente encapsulante e do método de preparação das microcápsulas. Outros fatores como forma de liberação do material ativo e as condições biológicas que o mesmo deve suportar antes de ser liberado, tamanho e densidade das partículas, bem como custos do processo também são importantes para o desenvolvimento de um produto microencapsulado (SOBRINHO; FARIAS, 2013).

Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos para encapsular compostos bioativos, muitas delas baseadas em atomização, extrusão, emulsificação, formação de micelas e lipossomas, entre outros. Sua escolha é baseada em diversos fatores que envolvem o material do núcleo, material de parede, custo e o tipo de cápsula final desejada (MEHTA *et al.*, 2022). A técnica a ser utilizada, normalmente, deve ser simples, reprodutível, rápida, eficaz e de fácil implementação em escala industrial (CARVALHO; ESTEVINHO; SANTOS, 2016). A atomização (*spray drying*) aparece como a técnica mais utilizada na indústria, já bem estabelecida e consolidada, e com bom custo-benefício quando utilizada em escala industrial (BAKRY *et al.*, 2015; MEHTA *et al.*, 2022). Outras técnicas, como leito fluidizado (ACHMAD KOSASIH *et al.*, 2023), também são bastante utilizadas. Neste contexto, cabe salientar que não existe uma técnica universal que possa encapsular todos os materiais. Devido à variedade de técnicas existentes, diferentes morfologias de micropartículas podem ser obtidas a partir de variáveis referentes aos métodos e materiais utilizados, os quais serão discutidos neste trabalho.

### 3.1.1 Micropartículas

Com a aplicação da técnica de microencapsulação são obtidas micropartículas, que podem ser classificadas com base em sua estrutura interna e morfologia como microcápsulas e microesferas (SILVA *et al.*, 2003), conforme apresentado na Figura 1. Além disso, as micropartículas - que apesar de usualmente assim serem denominadas - podem ser classificadas em função do seu tamanho em nanocápsula ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ), microcápsula ( $0,2$  a  $5000 \mu\text{m}$ ) e macrocápsula ( $> 5000 \mu\text{m}$ ) (JAFARI, 2017; SILVA *et al.*, 2014), enquanto seu formato pode ser esférico, com um invólucro contínuo envolvendo o núcleo, ou apresentar forma assimétrica e variável, como exemplificado na Figura 2.

Figura 1 – Morfologia das micropartículas



Fonte: Silva *et al.* (2003).

Como ilustrado na Figura 1, as microcápsulas mononucleares apresentam estrutura rudimentar, com apenas um núcleo contendo o princípio ativo (composto encapsulado) recoberto por um invólucro (membrana da cápsula), comumente de natureza polimérica e de tamanho variável, enquanto nas microcápsulas polinucleares, tal como indica o seu nome, apresentam vários núcleos em seu interior (SUAVE *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2003). Geralmente, as microcápsulas são obtidas por métodos como coacervação complexa, polimerização *in situ*, evaporação de solventes e lipossomas (FIGUEIREDO *et al.*, 2022).

Em contrapartida, as microesferas são sistemas matriciais nos quais o núcleo é disperso ou solubilizado no interior da matriz. Podem ser heterogêneas, quando o núcleo se encontra disperso na matriz, ou homogênea, quando dissolvido (AZEREDO, 2005). Embora estejam divididas em duas subclassificações, essa divisão não é consensual, uma vez que alguns autores as classificam somente como microcápsulas, sendo aquelas que apresentam estrutura similar à microesfera denominadas microcápsulas tipo matriz (*e.g.*, GHOSH, 2006).

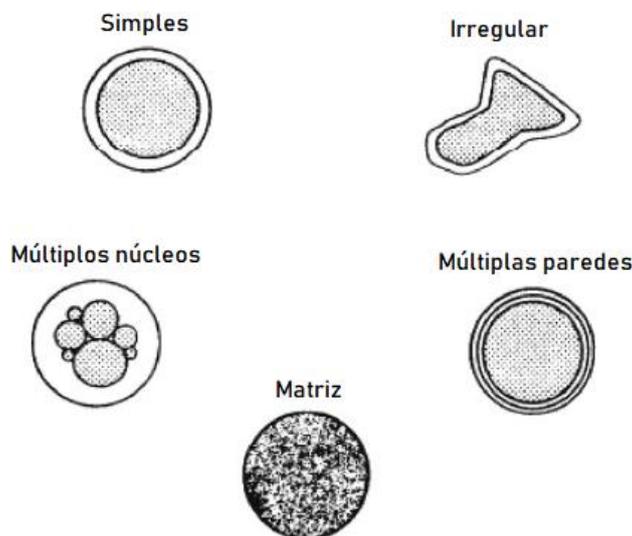
Enquanto nas microesferas uma pequena parte do material encapsulado permanece exposta na superfície, nas microcápsulas isso não ocorre, sendo essa a diferença mais significativa entre elas. Entretanto, o termo encapsulação é utilizado para as duas classificações, tanto microcápsulas quanto microesferas (AZEREDO, 2005).

De acordo com Figueiredo *et al.* (2022), apesar das microcápsulas proporcionarem melhor encapsulamento, as microesferas garantem proteção adequada para algumas aplicações e podem ser obtidas por uma técnica de baixo custo que implique menos operações unitárias,

como secagem e resfriamento por pulverização, liofilização, leite fluidizado (revestimento por pulverização), entre outras. A obtenção de uma micropartícula também é possível por meio da união de uma microcápsula e uma microesfera, ou seja, uma mistura (ARENAS-JAL; SUÑÉ-NEGRE; GARCÍA-MONTOYA, 2020).

Além dessa classificação mais simples, o núcleo pode ser composto por um ou vários tipos de substâncias, e a membrana da cápsula pode ter uma ou múltiplas camadas (Figura 2). O tamanho e a forma das microcápsulas estão diretamente ligados ao método utilizado para encapsulação e ao material a ser encapsulado, enquanto a liberação do seu conteúdo é realizada por meio de técnicas apropriadas para cada aplicação (SOBRINHO; FARIAS, 2013).

Figura 2 – Diferentes morfologias das microcápsulas



Fonte: adaptado de Gharsallaoui *et al.* (2007).

De forma a padronizar as expressões utilizadas neste trabalho, adotar-se-á os termos partícula, micropartícula e nanopartícula, abrangendo as diferentes morfologias de encapsulamento, visto que, embora não haja padronização na literatura, muitos autores definem-nas dessa maneira.

### 3.1.2 Agente encapsulante

Os agentes encapsulantes são substâncias que criam uma camada protetora entorno do núcleo, isolando-o e evitando sua exposição inadequada ao meio externo. Mas, por meio de

estímulos específicos, essa camada se desfaz, liberando o agente encapsulado nos momentos e locais desejados (SUAVE *et al.*, 2006).

Existe uma ampla variedade de agentes encapsulantes disponíveis, como soluções simples, coloides de associação, emulsões, matrizes de biopolímeros, entre outros, podendo esses ser advindos de origem natural, sintética ou híbrida (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021; YE; GEORGES; SELOMULYA, 2018). Quando se trata de encapsulação, proteção e liberação controlada de compostos funcionais, cada agente encapsulante tem suas próprias vantagens e desvantagens específicas (ESTEVINHO *et al.*, 2013).

Os agentes encapsulantes também são denominados como membrana, material de parede, casca ou material de revestimento. Sua seleção é de grande importância para a eficácia do encapsulamento e estabilidade da micropartícula, sendo escolhidos levando-se em consideração diversos fatores como propriedades físico-químicas do material a ser encapsulado (porosidade, solubilidade, massa molecular, carga elétrica, viscosidade), aplicação do encapsulado (fármaco, cosmético, agrotóxico, aditivo alimentar), além do método de encapsulamento escolhido (GHARSALLAOUI *et al.*, 2007; SPERANZA *et al.*, 2017).

Segundo Suave *et al.* (2006), os materiais mais utilizados como agente encapsulantes são carboidratos, gomas, lipídios, proteínas, quitosana, poliésteres naturais e polímeros sintéticos. Um resumo dos agentes encapsulantes frequentemente utilizados no setor de alimentos é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplos de agentes encapsulantes utilizados no encapsulamento de produtos alimentícios

| <b>Categoria</b>            | <b>Principais materiais</b>   |
|-----------------------------|---|
| <b>Carboidratos</b>         | Amido, maltodextrina, quitosana, dextrina, ciclodextrina, amido modificado  |
| <b>Celulose</b>             | Carboximetilcelulose, metilcelulose   |
| <b>Gomas</b>                | Goma arábica, goma guar, ágar, carragena, alginato de sódio   |
| <b>Lipídios</b>             | Cera, parafina, cera de abelha, diacilglicerol, óleos, gorduras   |
| <b>Proteínas</b>            | Glúten, gelatina, albumina, caseína, peptídeos  |
| <b>Poliésteres naturais</b> | Poli (hidroxialcanoatos), tais como poli (3-hidroxiбутирато) P (3HB), poli (3-hidroxiуаlerato) P (3HV) e seus copolímeros |
| <b>Polímeros sintéticos</b> | Poli (D, L-ácido láctico) (PDLA), poliacrilatos, poli ( $\epsilon$ -caprolactona) (PCL)                                   |

Fonte: adaptado de Pereira *et al.* (2018) e Suave *et al.* (2006).

De fato, a estabilidade das microcápsulas e a eficiência do processo de encapsulamento dependem do agente encapsulante utilizado, uma vez que esse atua como barreira e deve armazenar o núcleo e protegê-lo de condições ambientais (oxigênio, água, luz), mascarar gostos, cores ou odores, facilitar o manuseio de substâncias tóxicas de maneira mais segura e possibilitar o desenvolvimento de formas de dosagem com liberação modificada, sendo essa última bastante explorada na área farmacêutica (JAFARI, 2017; PEREIRA *et al.*, 2018; SOBRINHO; FARIAS, 2013).

As características desejáveis em um agente encapsulante, de acordo com Jafari (2017), são: não reagir com o núcleo, possibilitar uma liberação controlada sob condições pré-determinadas, capacidade de formação de filme, boa flexibilidade e estabilidade, não ser higroscópico, ter baixa viscosidade, baixo custo efetivo e ser capaz de ser dissolvido em meio aquoso ou solvente para ser fundido.

Em razão das particularidades intrínsecas de cada material e a grande quantidade de características desejáveis, um agente encapsulante não apresentará todas as propriedades descritas anteriormente. Desse modo, geralmente utiliza-se a combinação de dois ou mais materiais de parede em busca de melhores resultados de rendimento e eficiência de encapsulação (PEREIRA *et al.*, 2018). Uma abordagem mais detalhada sobre os agentes encapsulantes mais comumente utilizados será apresentada posteriormente.

### *3.1.3 Agente encapsulado e seus mecanismos de liberação*

O agente encapsulado, também chamado de núcleo, é o composto ativo de interesse que passa pelo encapsulamento para potencializar suas propriedades. As substâncias ativas diferem-se em suas características, como massa molecular, solubilidade, polaridade, entre outras, o que resulta na aplicação de diversas técnicas de encapsulamento para atender aos requisitos físico-químicos e moleculares necessários (RAY; RAYCHAUDHURI; CHAKRABORTY, 2016). Os materiais a serem encapsulados podem variar desde um alimento ou conjunto deles até determinada categoria de compostos (como ingredientes, aditivos ou certas substâncias) (AZEREDO, 2005; JAFARI, 2017; PATEIRO *et al.*, 2021).

Alguns exemplos de compostos alimentares normalmente encapsulados, bem como a finalidade de seu encapsulamento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Compostos alimentares encapsulados (material de núcleo), sua finalidade e alguns exemplos

| <b>Compostos alimentares/nutracêuticos</b> | <b>Finalidade do encapsulamento</b>  | <b>Exemplos</b>   |
|--|--|---|
| Compostos fenólicos e antioxidantes        | Proteção, estabilização, melhoria da atividade antioxidante e de outras atividades funcionais, incorporação de propriedades positivas adicionais, liberação no alvo/sítio específico | Curcumina, oleorupeína, ácido fólico, resveratrol, antocianinas, timol                  |
| Óleo de peixe e ácidos graxos essenciais   | Estabilização, liberação controlada, melhor solubilidade, menor volatilidade, uso de doses mais baixas, melhor qualidade sensorial do produto final                                  | DHA (ácido docosahexaenoico), ácido linolênico  |
| Vitaminas                                  | Proteção à oxidação, redução de aromas indesejáveis, redução de interações de nutrientes com outros ingredientes   | Lipossolúveis e hidrossolúveis  |
| Agentes antimicrobianos                    | Liberação controlada   | Nisina  |
| Corantes alimentares naturais              | Estabilização  | Antocianinas, carotenoides  |
| Aromas e óleos essenciais                  | Mascarar sabores, redução da volatilidade, liberação controlada  | Terpenos, óleo de limão   |
| Enzimas                                    | Liberação controlada   | Protease, glicose oxidase   |
| Outros                                     | Estabilização, liberação controlada, melhor homogeneidade, sabor, textura etc.   | Minerais, ácidos, álcalis, tampões, adoçantes, agentes de fermentação, micronutrientes. |

Fonte: adaptado de Jafari (2017) e Pateiro *et al.* (2021).

A liberação controlada é uma das principais características da microencapsulação, pois, por meio dela, o agente encapsulado é liberado no local e momento desejados. Isso permite ampliar significativamente a gama de aplicações do composto a ser encapsulado, tornando assim a técnica extremamente importante, mesmo quando o objetivo do processo é a proteção do composto e seu isolamento de condições que normalmente o degradariam (AZEREDO, 2005; SILVA *et al.*, 2014; SOBRINHO; FARIAS, 2013). Dentre os principais elementos que

influenciam a taxa de liberação estão as interações entre o material da parede e o núcleo, a volatilidade do núcleo, dimensão das partículas, proporção entre material de casca e núcleo e a viscosidade do material encapsulante (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021).

Variados mecanismos podem levar à liberação, sendo os mais habituais na indústria alimentícia a difusão, degradação, pressão ativada e pressão osmótica e dissolução por aquecimento ou solvente. As cápsulas podem responder a estímulos adequados, como mudanças de pH, temperatura, pressão, umidade, etc., que levam à degradação ou ruptura da matriz protetora, permitindo a liberação do princípio ativo (AZEREDO, 2005; DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999). E embora sejam estudados separadamente, é comum que mais de um mecanismo ocorra simultaneamente (AZEREDO, 2005).

No mecanismo de difusão, tem-se a movimentação do princípio ativo pela matriz, deslocando-se de uma área de maior concentração para outra de menor concentração (PEREIRA *et al.*, 2018; SOBRINHO; FARIAS, 2013). De acordo com Azeredo (2005), nas cápsulas, a parede atua como uma barreira semipermeável e quando está intacta, a liberação do núcleo é regida principalmente pela difusão. A taxa de difusão é influenciada por fatores químicos como as propriedades do material encapsulado e do agente encapsulante, além de propriedades físicas da parede, como a estrutura da matriz e o tamanho dos poros. O autor cita, ainda, a grande importância do estado físico do agente encapsulante, pois cascas no estado vítreo normalmente oferecem menor permeabilidade do que no estado gomoso (AZEREDO, 2005).

Na liberação por degradação, enzimas como as proteases e lipases podem degradar proteínas ou lipídios, respectivamente (AZEREDO, 2005; GARTI; MCCLEMENTS, 2012), logo, a utilização de enzimas na degradação de materiais de parede proteicos e lipídicos é bastante útil, porque esses materiais são frequentemente utilizados na microencapsulação devido às suas propriedades de estabilidade e proteção do núcleo encapsulado (PATEIRO *et al.*, 2021). Sendo assim, enzimas podem ser selecionadas de acordo com as características específicas dos materiais de parede utilizados, como por exemplo, enzimas proteolíticas para degradar materiais de parede proteicos e, do mesmo modo, enzimas lipolíticas para degradar materiais de parede lipídicos.

Já na liberação promovida por solvente, o material da parede, ao entrar em contato com o solvente, pode dissolver-se completamente, resultando em uma liberação rápida do núcleo, ou pode se expandir, propiciando a liberação (AZEREDO, 2005; POTHAKAMURY; BARBOSA-CÁNOVAS, 1995). Tal estímulo é o mais utilizado na indústria de alimentos como meio de liberação controlada (SOBRINHO; FARIAS, 2013), e a ativação por meio da água é a

mais utilizada, tendo em vista que a maior parte dos agentes encapsulantes são hidrossolúveis (AZEREDO, 2005).

Alterações no pH podem alterar a solubilidade do material de casca no meio, promovendo liberação do núcleo (AZEREDO, 2005; CONSTANTINO; GARCIA-ROJAS, 2023; TSIRIGOTIS-MANIECKA *et al.*, 2021). Mudanças de temperatura podem impactar a integridade física da parede e influenciar na taxa de liberação do núcleo. Esse processo de liberação controlada por temperatura divide-se em dois conceitos: liberação sensível à temperatura, que ocorre quando o material encapsulante colapsa ou se expande ao atingir uma temperatura crítica, e liberação ativada por fusão, que é promovida pela fusão do material de casca, como lipídios modificados ou ceras, devido ao aumento da temperatura acima do ponto de fusão desses (AZEREDO, 2005; GARTI; MCCLEMENTS, 2012; POTHAKAMURY; BARBOSA-CÁNOVAS, 1995).

Por fim, a aplicação de uma força sobre as paredes da partícula, como ocorre durante a mastigação, pode desencadear a liberação do agente encapsulado, configurando um processo de liberação ativada por pressão. Um caso desse mecanismo é observado na liberação de sabores em gomas de mascar (AZEREDO, 2005; GARTI; MCCLEMENTS, 2012).

### **3.2 PRINCIPAIS TÉCNICAS DE ENCAPSULAÇÃO UTILIZADAS**

Diversas técnicas podem ser utilizadas (Tabela 3) para microencapsular compostos de interesse, tais como: *spray drying*, *spray cooling*, leiteo fluidizado, liofilização, polimerização interfacial, inclusão molecular, coacervação, emulsificação, entre outras. A sua escolha depende de vários fatores, como tamanho da partícula desejado e da aplicação que lhe será dada, características físico-químicas do núcleo e do agente encapsulante, mecanismo de liberação, além da escala e custo de produção (ARENAS-JAL; SUÑÉ-NEGRE; GARCÍA-MONTOYA, 2020; AZEREDO, 2005).

De modo geral, os métodos utilizados para encapsular podem ser classificados em três grupos: métodos físicos, químicos e físico-químicos. Os métodos físicos para formação de micropartículas dependem de mudanças físicas, como a secagem, gelificação ou congelamento do material da casca. Já os métodos químicos são aqueles que envolvem reações químicas para formação do revestimento de agente encapsulante sobre o núcleo. Os físico-químicos, por sua vez, combinam os processos químicos e físicos para formar as microcápsulas (ARENAS-JAL; SUÑÉ-NEGRE; GARCÍA-MONTOYA, 2020). Algumas das técnicas mais relevantes serão discutidas neste trabalho.

Na Tabela 3 são apresentados alguns exemplos de métodos de encapsulação e os respectivos estados físicos do material de núcleo e tamanho das partículas obtidas, enquanto na Tabela 4 é apresentado um resumo dos métodos que serão abordados com mais detalhes na sequência.

Tabela 3 – Alguns dos principais métodos de microencapsulação utilizados, estado físico do material de núcleo e tamanho das respectivas partículas obtidas

| <b>Métodos de encapsulação</b>        | <b>Estado físico do material de núcleo</b> | <b>Tamanho aproximado da partícula (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|---------------------------------------|--|---|
| <b>Métodos físicos</b>                |  |   |
| Extrusão estacionária                 | Líquido/Sólido/Gás                         | 1.000-6.000   |
| Bocal submerso                        | Líquido/Sólido/Gás                         | 700-6.000   |
| Extrusão centrífuga                   | Líquido/Sólido/Gás                         | 125-3.000   |
| Bocal vibrante                        | Líquido/Sólido/Gás                         | 500-2.000   |
| <i>Spray drying</i>                   | Líquido/Sólido                             | 5-150   |
| Disco rotativo                        | Líquido/Sólido                             | 5-1.000   |
| <i>Pan coating</i>                    | Sólido                                     | > 500   |
| Suspensão por ar                      | Sólido                                     | 50-10.000   |
| <i>Spray chilling e Spray cooling</i> | Líquido/Sólido                             | 2-200   |
| Leito fluidizado                      | Sólido                                     | > 100   |
| Co-cristalização                      | Sólido/Líquido                             | -   |
| Liofilização                          | Líquido                                    | -   |
| <b>Métodos químicos</b>               |  |   |
| Polimerização interfacial             | Líquido/Sólido                             | 1-500   |
| Polimerização <i>in situ</i>          | Líquido/Sólido                             | 1-500   |
| Inclusão Molecular                    | Líquido                                    | 5-50  |
| <b>Métodos físico-químicos</b>        |  |   |
| Coacervação simples                   | Líquido/Sólido                             | 20-500  |
| Coacervação complexa                  | Líquido/Sólido                             | 1-500   |
| Lipossomas                            | Líquido/Sólido                             | 0,02-3  |
| Evaporação do solvente                | Líquido/Sólido                             | 1-5000  |

Fonte: adaptado de Favaro-Trindade; Pinho; Rocha, (2008).

Tabela 4 – Resumo dos principais métodos de encapsulação: etapas do processo, vantagens, limitações e tipos de partículas produzidas

| <b>Técnica</b>               | <b>Etapas do processo</b>  | <b>Vantagens</b>  | <b>Limitações</b>   | <b>Tipo de partícula obtida</b> | <b>Referências</b>   |
|------------------------------|--|---|---|---------------------------------|--|
| <b><i>Spray drying</i></b>   | (i) Preparo da dispersão ou emulsão contendo o material ativo, (ii) homogeneização da dispersão, (iii) atomização da dispersão e (iv) desidratação das partículas atomizadas | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Simplicidade;</li> <li>2. Baixo custo;</li> <li>3. Fácil disponibilidade de equipamentos;</li> <li>4. Alta eficiência;</li> <li>5. Aplicável a diversos tipos de produtos;</li> <li>6. Secagem rápida;</li> <li>7. Facilmente aplicável em escala industrial</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uso de altas temperaturas pode restringir a aplicação a alguns materiais termossensíveis, como microrganismos;</li> <li>2. Energia em termos de calor é desperdiçada no processo</li> </ol> | Matriz ou Polinuclear           | BAKRY <i>et al.</i> , 2015;<br>GHARSALLAOUI <i>et al.</i> , 2007;<br>JAFARI <i>et al.</i> , 2023;<br>JAMEKHORSHID;<br>SADRAMELI;<br>FARID, 2014;<br>RAY;<br>RAYCHAUDHURI;<br>CHAKRABORTY, 2016 |
| <b><i>Spray chilling</i></b> | (i) Preparo da emulsão A/O contendo a substância a encapsular; (ii) atomização da emulsão no <i>spray chiller</i> ; (iii) resfriamento                                       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menor tempo e consumo de energia quando comparado a outras técnicas;</li> <li>2. Não utiliza solventes;</li> <li>3. Tecnologia menos dispendiosa;</li> <li>4. Não requer altas temperaturas</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Material a ser encapsulado deve suportar a temperatura de fusão da matriz lipídica;</li> <li>2. Misturas viscosas podem entupir o atomizador</li> </ol>                                     | Microesferas                    | FAVARO-TRINDADE <i>et al.</i> , 2021;<br>FIGUEIREDO <i>et al.</i> , 2022;GOUIN, 2004   |

| <b>Técnica</b>              | <b>Etapas do processo</b>  | <b>Vantagens</b>  | <b>Limitações</b>  | <b>Tipo de partícula obtida</b>         | <b>Referências</b>   |
|-----------------------------|--|---|--|---|--|
| <b>Coacervação complexa</b> | (i) Preparo da dispersão ou emulsão, (ii) encapsulamento do núcleo, (iii) estabilização da partícula encapsulada | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Controle eficiente do tamanho das partículas;</li> <li>2. Alto rendimento</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aglomeração de partículas;</li> <li>2. Em alguns casos a estabilização das microcápsulas requer agentes de reticulação, valores extremos de pH ou elevadas temperaturas</li> </ol> | Microcápsulas com revestimento uniforme | TIMILSENA <i>et al.</i> , 2019; GOUIN, 2004; SILVA <i>et al.</i> , 2003  |
| <b>Leito fluidizado</b>     | (i) Fluidização do agente ativo, (ii) revestimento por pulverização, (iii) desidratação das partículas           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ótima transferência de calor e massa;</li> <li>2. Distribuição uniforme de temperatura;</li> <li>3. Capaz de revestir partículas com praticamente qualquer tipo de material encapsulante;</li> <li>4. Possibilidades versáteis de liberação controlada</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Custo relativamente alto;</li> <li>2. Padrões de fluxo não uniformes podem resultar em revestimento irregular</li> </ol>   | Microcápsulas                           | AZEREDO, 2005; SIMÕES <i>et al.</i> , 2017; DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999; GOUIN, 2004; MADENE <i>et al.</i> , 2006; ALU'DATT <i>et al.</i> , 2022 |
| <b>Inclusão molecular</b>   | (i) Mistura do carreador e material ativo em água; (ii) incubação e secagem se necessário                        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Propriedades exclusivas de liberação e na estabilidade química/térmica</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Compostos maiores que a cavidade do carreador não podem ser acomodados, ficando sem encapsulamento</li> </ol>  | Microesferas                            | GOUIN, 2004, POSHADRI; KUNA, 2010; JAFARI, 2017  |

### 3.2.1 Métodos Físicos

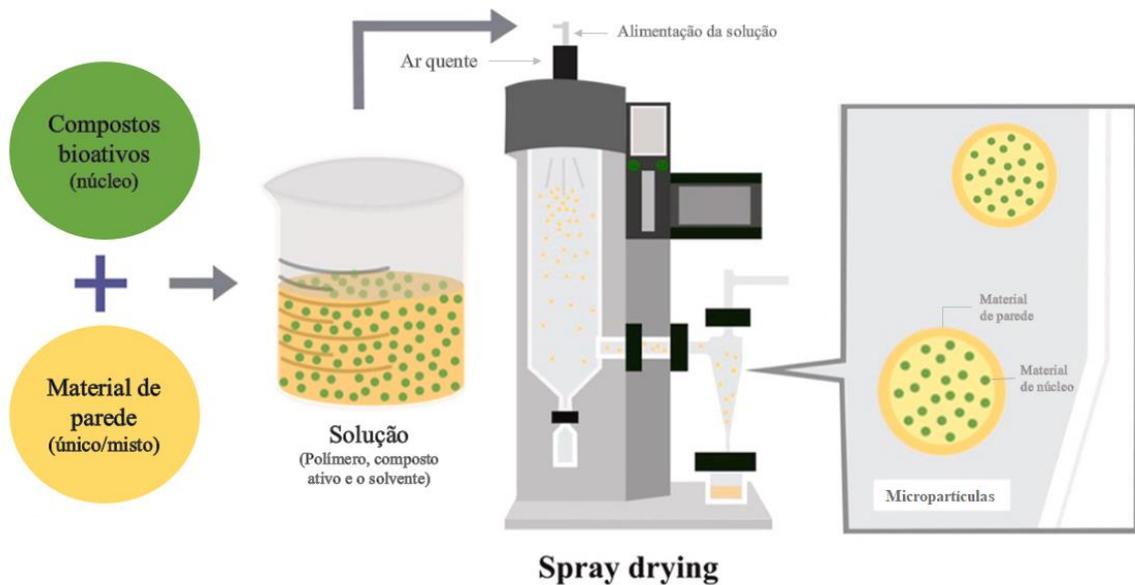
#### ***Spray Drying***

Método mais comumente utilizado para encapsular ingredientes alimentícios, a secagem por atomização ou *spray drying* é um processo de desidratação mecânica utilizado na indústria de alimentos desde a década de 1950 (SIMÕES *et al.*, 2017), pois possibilita a obtenção do material encapsulado de forma relativamente simples, rápida, eficaz e com baixo custo operacional quando utilizado em escala industrial, tornando-o uma opção vantajosa em relação a outros métodos (BAKRY *et al.*, 2015; GHARSALLAOUI *et al.*, 2007). Outras vantagens são a alta disponibilidade de equipamentos (ACHMAD KOSASIH *et al.*, 2023), produção contínua (NAHUM; DOMB, 2021) e facilidade de mudança nas condições de operação (BALTRUSCH *et al.*, 2022).

Segundo Gharsallaoui *et al.*, (2007), é geralmente utilizada na indústria de alimentos para reduzir o teor e atividade de água, garantindo mais segurança microbiológica, menores custos de armazenamento e transporte, redução dos riscos de degradação química/biológica e obtenção de propriedades de interesse, como a solubilidade instantânea.

A microencapsulação por *spray drying* requer 4 etapas: (i) preparo da dispersão ou emulsão contendo o material ativo, (ii) homogeneização da dispersão, (iii) atomização da dispersão e (iv) desidratação das partículas atomizadas (BAKRY *et al.*, 2015). Nesse método, o composto ativo (ou seja, o material de núcleo) é homogeneizado ou misturado em uma solução com o material de parede para formar uma dispersão (solução, suspensão ou emulsão). Essa, por sua vez, é bombeada e atomizada em uma câmara de secagem com taxa de fluxo pré-definida, sendo o solvente evaporado rapidamente ao passar por uma corrente de ar quente e seco, transformando as partículas no estado líquido em gotículas solidificadas, promovendo, assim, a microencapsulação (JAFARI *et al.*, 2023; SPERANZA *et al.*, 2017). Após a evaporação do solvente, por meio de um ciclone, as partículas sólidas secas são separadas e recolhidas na forma de pó. Na Figura 3 é apresentado, de maneira esquemática, o processo de secagem pela técnica de *spray drying*.

Figura 3 – Esquema ilustrativo do processo de microencapsulação por *spray drying*



Fonte: adaptado de Jafari *et al.* (2023).

Apesar da secagem envolver o uso de temperaturas elevadas entre 150 e 220 °C, o núcleo do material encapsulado não atinge essa temperatura devido à rapidez do processo, geralmente não ultrapassando 100 °C (ESTEVINHO *et al.*, 2013). No entanto, o uso de altas temperaturas pode ser destacado com um ponto negativo dessa técnica, pois alguns produtos termossensíveis (como óleos essenciais, vitaminas e microrganismos) podem ter seu uso restringido devido à alta temperatura de secagem provocar volatilização e/ou destruição/degradação do produto termossensível (GHARSALLAOUI *et al.*, 2007; MADENE *et al.*, 2006; MARTINS *et al.*, 2022; NAHUM; DOMB, 2021). De acordo com Timilsena, Haque e Adhikari (2020), boa parte das cepas probióticas não sobrevive bem ao processo de secagem por pulverização, sendo necessário o uso de termoprotetores para superar a inativação da célula durante a secagem e estabilizá-las durante o armazenamento. Outros pontos negativos dessa técnica são partículas aglomeradas e não revestidas, sendo essa última muito decorrente do uso de grandes quantidades de material de núcleo (GHOSH, 2006; JAMEKHORSHID; SADRAMELI; FARID, 2014); bem como a impossibilidade de utilizar todo o calor que passa pela câmara de secagem (GHARSALLAOUI *et al.*, 2007).

Geralmente, as micropartículas obtidas por meio desta técnica são do tipo matriz ou polinuclear, não uniformes (geometria irregular), que podem ser facilmente escalonadas (*scaled-up*), e por meio do desenvolvimento de atomizador adequado, é possível formar

microcápsulas homogêneas e com tamanho desejado (JAMEKHORSHID; SADRAMELI; FARID, 2014).

Baltrusch *et al.* (2022) microencapsularam extratos de chá verde pela técnica de *spray drying*, usando amido verde, alginato e carragenina. Os autores concluíram que tal técnica se mostrou bem sucedida, resultando em altos rendimentos, altas eficiências de carregamento para todos os carreadores estudados (alginato, carragenina e amido) e excelentes eficiências de microencapsulação no caso de carragenina e alginato.

A técnica também foi utilizada com sucesso por Kim *et al.* (2019) para microencapsular sabor de caramelo em uma bebida láctea contendo café, utilizando maltodextrina e triglicerídeos de cadeia média (TCM) como agentes encapsulantes. A microencapsulação do sabor e sua posterior adição em forma de microcápsulas nas bebidas de café foram eficazes para estender a retenção do sabor e melhorar a qualidade da bebida durante o período de armazenamento.

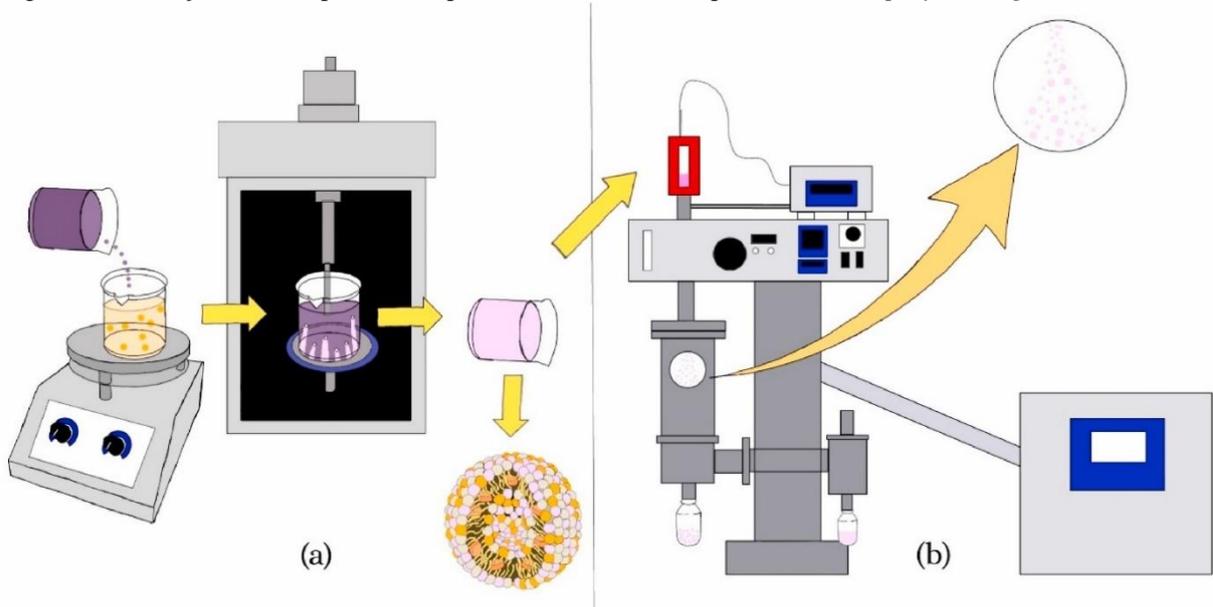
### ***Spray cooling ou Spray chilling***

A técnica de microencapsulação *spray chilling*, também denominada como *spray congealing* e *spray cooling*, é muito similar ao *spray drying*. Enquanto a secagem por pulverização resume-se na conversão de um fluido em partícula seca por meio da evaporação rápida do solvente, o resfriamento por pulverização baseia-se na solidificação de um fluido em uma câmara de resfriamento (RATHORE *et al.*, 2013). Em outras palavras, diferem-se principalmente no que diz respeito ao fluxo de energia envolvido, pois no *spray drying* o calor é transferido para as partículas, fazendo o solvente evaporar, ao passo que no *spray chilling* a energia é retirada da partícula, o que faz com que ela se solidifique (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021). Além disso, foi desenvolvida para contornar o problema de danos celulares causados pela exposição de células microbianas a altas temperaturas durante o processo de secagem por pulverização (RATHORE *et al.*, 2013).

O microencapsulamento por *spray chilling* resulta de três etapas: (i) preparo da emulsão água em óleo contendo a substância a encapsular; (ii) atomização da emulsão no *spray chiller* e (iii) resfriamento (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021). Na primeira etapa do processo, o objetivo é encapsular o composto ativo em uma matriz lipídica, que pode ser um lipídio fundido ou uma emulsão água-em-óleo (Figura 4a). Na segunda etapa, a mistura é pulverizada em forma de pequenas gotículas, geralmente por meio de um bico atomizador aquecido, para manter a temperatura adequada e evitar a recristalização dos compostos lipídicos (Figura 4b). Quando

essas gotículas entram em contato com um ambiente resfriado, seja pela injeção de ar frio ou nitrogênio líquido, com temperatura abaixo do ponto de fusão do lipídio, ocorre uma transferência de calor entre o lipídio e o ar frio, levando à solidificação da matriz e resultando na formação de partículas sólidas. Após o processo de resfriamento, as partículas sólidas são coletadas em um recipiente localizado abaixo da câmara de resfriamento, enquanto as partículas com tamanho muito pequeno são transportadas pelo ar até um ciclone, onde são separadas e coletadas em outro recipiente (FIGUEIREDO *et al.*, 2022).

Figura 4 – Produção de micropartículas lipídicas no estado sólido pela técnica de *spray chilling*



Fonte: Figueiredo *et al.* (2022).

A morfologia das partículas comumente produzidas por essa técnica é de microesfera (tipo matriz) com forma esférica, com o agente encapsulado disperso homogeneamente por toda a matriz da cápsula (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021; OXLEY, 2012). Por basear-se em gorduras (que são fáceis de atomizar, possuem temperatura de fusão moderada e são estáveis quando nas condições do processo), o *spray chilling* tem como materiais de parede compostos de natureza hidrofóbica como ceras, ácido graxos, óleos, triglicerídeos puros e até mesmo mistura desses materiais, pois um mesmo material pode não atender todos os requisitos necessários. Os materiais mais utilizados são as gorduras totalmente hidrogenadas de origem vegetal (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021; FIGUEIREDO *et al.*, 2022; NAHUM; DOMB, 2021), com ponto de fusão variando entre 36 a 75 °C (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021).

Quando comparada a outras metodologias, o resfriamento por pulverização consome menor tempo e energia (FIGUEIREDO *et al.*, 2022). Além disso, não utiliza solventes (o que é

ambientalmente adequado) (FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021; FIGUEIREDO *et al.*, 2022), é simples, possui alta eficiência de encapsulação para matrizes lipídicas (FIGUEIREDO *et al.*, 2022), não requer o uso de altas temperaturas (MATOS-JR *et al.*, 2017; FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2021), e, de acordo com Gouin (2004), é a técnica menos dispendiosa.

Em contrapartida, é necessário que o material a ser encapsulado seja capaz de suportar a temperatura necessária para a fusão da matriz lipídica. Além disso, quando se utiliza misturas altamente viscosas, pode ocorrer entupimento do atomizador, o que pode ser considerado uma desvantagem do processo (FIGUEIREDO *et al.*, 2022).

Bertoni *et al.* (2018) obtiveram micropartículas lipídicas sólidas produzidas por *spray chilling* como uma alternativa para encapsulação e liberação local de  $\beta$ -galactosidase (lactase) no intestino delgado. Os resultados indicaram que o uso do *spray chilling* não causou perda ou degradação da enzima e que as micropartículas apresentaram boa capacidade de proteção contra o fluido gástrico simulado. Os autores enfatizam ainda que a técnica é uma alternativa interessante como veículo para a entrega da enzima ativa ao intestino delgado e que as vantagens estão principalmente na simplicidade, viabilidade e fácil escalabilidade do método de preparação, bem como nas propriedades do sistema obtido.

Matos-Jr *et al.* (2017) produziram micropartículas sólidas lipídicas de ácido ascórbico utilizando gordura interestificada por meio do *spray chilling* e compararam o efeito das formas de alimentação (emulsão e dispersão). Foram avaliadas propriedades e estabilidade da partícula durante 60 dias de armazenamento em condições de temperatura de 37 °C, 24 °C e 7 °C. Verificou-se melhores resultados de proteção das micropartículas produzidas por meio de dispersão nas três temperaturas, e ao ser comparado a trabalhos na literatura que utilizaram outras técnicas, o resultado foi satisfatório, concluindo, assim, que o encapsulamento do ácido ascórbico por resfriamento por pulverização melhora sua estabilidade.

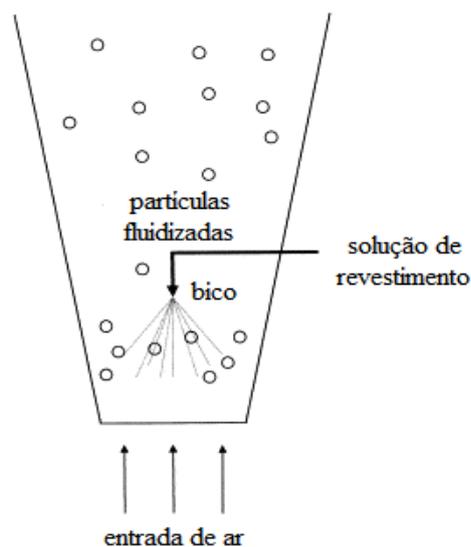
Paucar *et al.* (2016) demonstraram resultados promissores na aplicação de micropartículas sólidas lipídicas de vitamina  $D_3$  por *spray chilling*. Foram produzidas micropartículas carregadas com 0,1% de vitamina, utilizando gordura vegetal como carreador. Algumas formulações foram adicionadas de 1% de cera de abelha e 1% de lecitina de soja, e as propriedades e estabilidade foram avaliadas durante 65 dias de armazenamento a 10 °C e 25 °C. As formulações com adição de 1% de cera de abelha apresentaram melhor estabilidade vitamínica, retendo 86,3% da vitamina após 65 dias de armazenamento a 25 °C, em comparação com a vitamina livre (não imobilizada) mantida sob as mesmas condições (60,8%).

## Leito Fluidizado

O revestimento de leito fluidizado é uma técnica em que compostos de interesse são suspensos no ar e um agente encapsulante é pulverizado para formar estruturas de encapsulamento, assim como mostrado na Figura 5 (SIMÕES *et al.*, 2017; OXLEY, 2014; DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999). O termo “fluidização” provem da similaridade que possui com um líquido em ebulição (AZEREDO, 2005), e, comumente, é utilizado para revestimento secundário de produtos já encapsulados, para melhorar sua estabilidade (ALU’DATT *et al.*, 2022).

Nesse processo, de maneira geral, as partículas do núcleo são suspensas enquanto o material da parede é atomizado e depositado sobre elas na câmara. As partículas são lançadas em uma coluna descendente de ar, quando atingem o topo da coluna ascendente, retornando ao leito fluidizado, onde se dá seu revestimento, secagem e endurecimento. Esse ciclo de revestimento (no qual as partículas passam sucessivas vezes de maneira aleatória) garante uma parede mais uniforme, visto que a turbulência da corrente de ar no leito fluidizado mantém as partículas suspensas, permitindo sua rotação e o total recobrimento. Devido a isso, nessa técnica são obtidas micropartículas do tipo microcápsulas, em contraste a técnicas como *spray drying* e *spray cooling*, que produzem microesferas (AZEREDO, 2005; DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999).

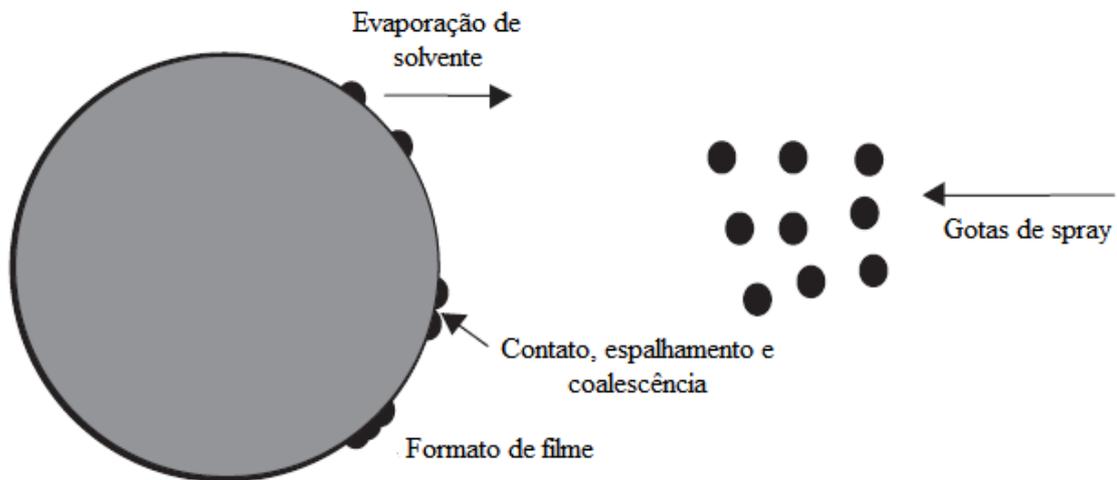
Figura 5 - Revestimento em leito fluidizado “*top-spray*”



Fonte: adaptado de Dewettinck e Heyghebaert (1999).

O revestimento completo da superfície não é alcançado em uma única passagem pela zona de revestimento, necessitando de várias passagens para garantir a cobertura total. Durante o processo, ocorrem quase simultaneamente a formação de gotículas, o contato, o espalhamento, a coalescência e a evaporação (DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999). Um esquema da formação do filme sobre a partícula é mostrado na Figura 6.

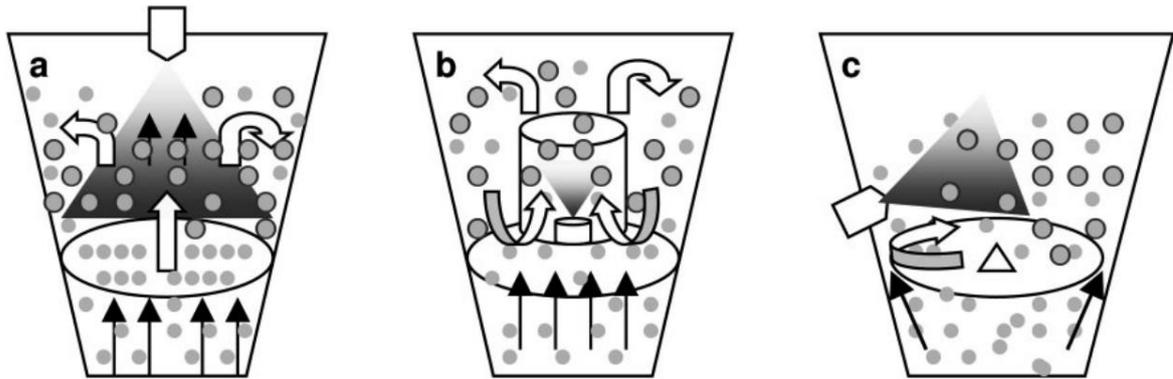
Figura 6 – Esquema de formação de filme por meio da técnica de leito fluidizado



Fonte: adaptado de Madene *et al.* (2006).

Diferentes tipos de revestimento por leitos fluidizados são descritos (DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999; GHOSH, 2006), a saber: *spray superior*, *spray inferior* e *spray tangencial* (Figura 7). Basicamente, a pulverização superior é o método convencional e se dá por pulverizar o material de revestimento na parte superior da câmara (ou seja, o material de revestimento é pulverizado para baixo, sobre o leito fluidizado). Desta forma, as partículas vão se deslocando em direção à área de revestimento, e em seguida, retornam novamente ao fundo do leito e continuam a ciclar durante o processo, tornando-se encapsuladas (DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999; GHOSH, 2006).

Figura 7 – Esquemática de um revestidor de leito fluidizado



Legenda: a) pulverização superior, b) pulverização de fundo e c) pulverização tangencial.

Fonte: Ghosh (2006).

Na pulverização de fundo (Figura 7b) ou “revestimento de Wurster”, em reconhecimento ao seu desenvolvedor, utiliza-se uma câmara de revestimento com um bocal cilíndrico e uma placa de fundo perfurada. No bico cilíndrico, o material de revestimento é pulverizado. Conforme as partículas se elevam através da placa de fundo perfurada e atravessam a área do bocal, ocorre a encapsulação das mesmas pelo material de revestimento. O material de revestimento adere à superfície das partículas à medida que o solvente evapora. Esse processo é repetido até que as características desejadas sejam alcançadas. Nessa técnica, há o maior controle das variáveis do processo e partículas menos defeituosas são produzidas (DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999; GHOSH, 2006).

Na pulverização tangencial (Figura 7c), um disco rotativo de mesmo diâmetro da câmara é utilizado na parte inferior. No decorrer do processo, o disco é elevado para criar um espaço entre a borda da câmara e o disco em si. O bico tangencial é posicionado acima do disco rotativo, através do qual o material de revestimento é liberado. Enquanto o disco giratório fornece uma força centrífuga fazendo com que o produto se mova em direção à parede da câmara, a força da injeção de ar faz com que as partículas se desloquem pela lacuna em direção à zona de pulverização, onde são encapsuladas. Em razão dessa curta distância percorrida, há um maior rendimento das partículas encapsuladas (DEWETTINCK; HUYGHEBAERT, 1999; GHOSH, 2006). Segundo Gouin (2004), o revestimento fluidizado tangencial é um avanço em relação às técnicas *top-spray* e revestimento de Wurster, pois esses últimos se baseiam na força da gravidade experimentada pelas partículas por um fluxo de ar ascendente, mas em partículas muito pequenas, forças como a interação eletrostática desempenham um papel importante no movimento das partículas na câmara, evitando uma fluidização satisfatória. A combinação das

três forças aplicadas na fluidização tangencial (disco rotativo perfurado, força tangencial do bico atomizador e injeção de ar) minimizaria este problema.

Embora cada uma dessas três abordagens ofereça suas vantagens e desvantagens, *top-spray* e *spray tangencial* são geralmente usados para granulação, enquanto o revestimento de Wurster é utilizado para revestir (ALU'DATT *et al.*, 2022). Ainda nesse contexto, o revestimento superior também é descrito por Dewettinck e Huyghebaert (1999) como o método mais viável para aplicação industrial, tanto em termos técnicos quanto econômicos, sendo a escolha preferida de encapsulamento em várias indústrias alimentícias devido ao seu menor custo de produção e à necessidade de uma configuração menos sofisticada. De acordo com Gouin (2004), o leite fluidizado é uma das poucas tecnologias avançadas capazes de revestir partículas com praticamente qualquer tipo de material encapsulante (polissacarídeos, gorduras, proteínas, emulsificantes etc.), o que permite maior versatilidade nas possibilidades de liberação controlada do que qualquer outra técnica. Além disso, projeção de distribuição de tamanho de partículas e baixa porosidade (MADENE *et al.*, 2006); economia eficaz de energia e tempo por não necessitar de altas temperaturas; e possibilidade de automatização, uma vez que os parâmetros operacionais tenham sido otimizados são algumas das vantagens desse método. No que tange a limitações, pode-se citar o custo relativamente alto e os padrões de fluxo não uniformes, que podem resultar em revestimento irregular (ALU'DATT *et al.*, 2022).

Coronel-Aguilera e San Martín-González (2015) utilizaram hidroxipropilmetilcelulose em forma de solução de revestimento para microencapsular  $\beta$ -caroteno em leite fluidizado. Os pós revestidos apresentaram estabilidade de cor quando aplicados ao iogurte por até 4 semanas de armazenamento, quando foram observados baixos valores de diferença total de cor em meios ácidos.

Schell e Beermann (2014) microencapsularam em leite fluidizado (*top-spray*) *Lactobacillus reuteri* com soro de leite doce e goma-laca, com objetivo de melhorar a resistência ácida e a sobrevivência gastrointestinal *in vitro*. A taxa de sobrevivência bacteriana após o processo de secagem e durante o período de armazenamento foi satisfatória, enquanto o revestimento de goma-laca ofereceu resistência a condições ácidas durante o trânsito gastrointestinal.

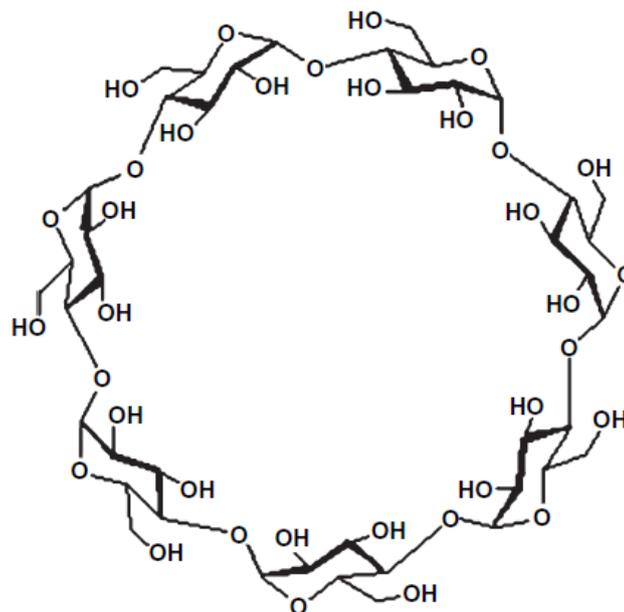
### 3.2.2 Métodos Químicos

#### **Inclusão molecular**

A inclusão molecular também é outra técnica de encapsulamento. Ao contrário das demais técnicas, essa ocorre a nível molecular. Nela, ciclodextrinas (CD) são produzidas a partir do amido por meio da ação da enzima ciclodextrina glucosiltransferase, que cliva o amido e une suas extremidades para formar uma molécula circular com ligações  $\alpha$  (1-4). Os complexos de inclusão são formados quando uma molécula menor se encaixa dentro da rede de outra molécula, criando uma interação entre elas, chamadas de complexos de inclusão, conferindo solubilização, liberação de forma lenta, proteção ou blindagem das moléculas hóspedes (DENG *et al.*, 2022; MADENE *et al.*, 2006).

Na Figura 8 é apresentada a estrutura molecular da  $\beta$ -ciclodextrina ( $\beta$ -CD).

Figura 8 – Estrutura molecular da  $\beta$ -ciclodextrina



Fonte: Madene *et al.* (2006).

Como pode ser visto na Figura 8, a  $\beta$ -ciclodextrina possui um interior hidrofóbico e uma superfície externa hidrofílica. Essa estrutura permite que a  $\beta$ -CD atue como uma "molécula hospedeira", permitindo a formação de complexos de inclusão com várias "moléculas hóspedes" de menor polaridade e dimensões menores do que as cavidades da  $\beta$ -CD (CID-SAMAMED *et al.*, 2022). A região hidrofóbica da  $\beta$ -ciclodextrina possibilita a formação de complexos de inclusão com uma ampla gama de moléculas orgânicas e geralmente por meio de ligações fracas, como Van der Waals e dipolo-dipolo, além de ligações de hidrogênio, ao passo que a região hidrofílica possibilita a dissolução da  $\beta$ -CD em água (GONZÁLEZ; ALVAREZ IGARZABAL, 2015). Sabe-se que, dependendo do tamanho da cavidade da ciclodextrina, elas

podem encapsular moléculas hóspedes de variados tamanhos com diferentes estequiometrias (CID-SAMAMED *et al.*, 2022).

As ciclodextrinas são compostos de alto valor que podem ser aplicados em várias indústrias. As variedades de ciclodextrinas naturalmente incluem pelo menos seis unidades de glicose, sendo as ciclodextrinas mais comuns aquelas que apresentam seis ( $\alpha$ -CD), sete ( $\beta$ -CD) e oito unidades ( $\gamma$ -CD), as quais são geralmente reconhecidas como seguras (GRAS) pela *Food and Drug Administration* (FDA) e recomendadas como aditivo alimentar. Suas propriedades podem ser melhoradas, sendo assim, o número de derivados é muito grande, existindo mais de 11.000 derivados de  $\alpha$ -,  $\beta$ - e  $\gamma$ -CD, embora muitos nunca puderam ter aplicação prática devido ao seu alto custo ou por conta de longas e difíceis sínteses (CID-SAMAMED *et al.*, 2022).

De acordo com Matencio *et al.* (2020), ciclodextrinas podem aumentar a estabilidade em condições bióticas ou abióticas, eliminar sabores ou odores indesejáveis, controlar reações químicas e a liberação de moléculas, entre outros numerosos benefícios que essa molécula pode oferecer, o que justifica seu uso na farmácia, ciência e tecnologia de alimentos, química e ciências ambientais e o crescente número de artigos de pesquisa relacionados a esse composto.

Na indústria alimentícia, as CDs podem ser aplicadas para proteger e aumentar a solubilidade e estabilidade de ingredientes alimentícios (como antioxidantes, vitaminas, saponinas e carotenóides) (MATENCIO *et al.*, 2020), bem como modificação ou eliminação de odores amargos e repugnantes de alimentos e bebidas (LAOKULDILOK *et al.*, 2016). As ciclodextrinas também podem ser incorporadas em filmes compostos em embalagens ativas para reduzir componentes indesejados (como o colesterol e compostos voláteis concentrados no *headspace* das embalagens) durante o armazenamento (GONZÁLEZ; ALVAREZ; IGARZABAL, 2015; LÓPEZ-DE-DICASTILLO *et al.*, 2011; MATENCIO *et al.*, 2020). Além disso, permitem a liberação controlada de compostos de sabor e aroma em produtos alimentícios (XIAO *et al.*, 2019). Também atuam como um “sequestrador de colesterol”, ao remover o colesterol de produtos alimentícios para desenvolver produtos com baixo colesterol, como patê de ovo e fígado de pato (ALONSO; CALVO; FONTECHA, 2019), leite (LEE; AHN; KWAK, 1999), para a fabricação de manteiga (JUNG *et al.*, 2005) e até mesmo efeito acelerado de maturação de queijo *Cheddar*, após redução do teor de colesterol obtida no tratamento com  $\beta$ -ciclodextrinas (SEON; AHN; KWAK, 2009).

De acordo com Guin (2004), sua principal vantagem reside nas propriedades exclusivas de liberação e na estabilidade química/térmica conferida a compostos de sabor quando encapsulados com ciclodextrinas. Como desvantagem, cita que compostos de sabor que sejam consideravelmente maiores do que a cavidade da cápsula não podem ser acomodados e,

portanto, ficam sem encapsulamento. Isso pode resultar em segregação durante o processo de encapsulamento, quando alguns componentes são preferencialmente encapsulados em detrimento de outros. Esse problema não é restrito apenas ao encapsulamento por inclusão molecular, mas também pode ocorrer em outros métodos, como a coacervação.

### 3.2.3 Métodos Físico-Químicos

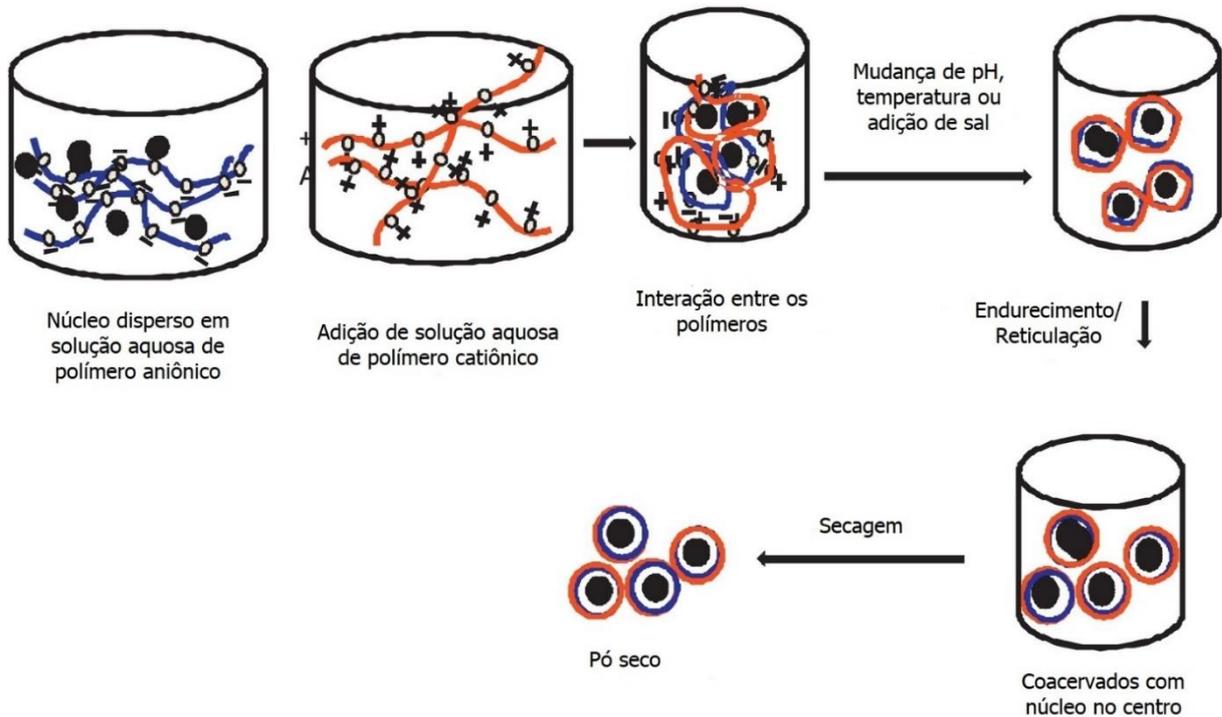
#### **Coacervação**

Coacervação é o termo utilizado para designar a técnica de separação de fases induzida por meio de alteração de fatores ambientais, como força iônica, pH e temperatura. Nesse método, a fase contendo maior quantidade de coloide é chamada de fase coacervada, enquanto a fase que contém menor quantidade é denominada como fase de equilíbrio (TIMILSENA *et al.*, 2019). Há dois tipos de coacervação: a coacervação simples e a coacervação complexa. A formação das microcápsulas é realizada de forma semelhante em ambos os processos, com exceção do método de separação de fases utilizado. Na coacervação simples, que envolve somente um polímero, um agente de dessolvatação (também chamado de agente de coacervação ou agente indutor) é adicionado para promover a separação das fases, enquanto na coacervação complexa ocorre a complexação entre dois ou mais polímeros com cargas elétricas opostas (GHOSH, 2006; MADENE *et al.*, 2006; TIMILSENA *et al.*, 2019).

Foi abordada inicialmente de forma sistemática por Bungenberg e Kruyt, no início do século XX, sendo o primeiro processo a ser adequado para a produção de microcápsulas em escala industrial. Os autores chamaram a separação de fases de “coacervação”, termo originado do latim *acervus* que significa “pilha”, precedido do termo *co* que indica o fenômeno de associação entre dois reagentes (GHOSH, 2006; TIMILSENA *et al.*, 2019).

As etapas do processo de coacervação complexa são: (i) preparo da dispersão ou emulsão, (ii) encapsulamento do núcleo, (iii) estabilização da partícula encapsulada. Inicialmente o material do núcleo é disperso em uma solução aquosa polimérica (por exemplo, um polímero catiônico). Em seguida, é adicionada a solução do segundo polímero (aniônico, solúvel em água) à dispersão preparada inicialmente. O revestimento do material de parede sobre o núcleo ocorre quando os dois polímeros formam um complexo, como mostrado na Figura 9.

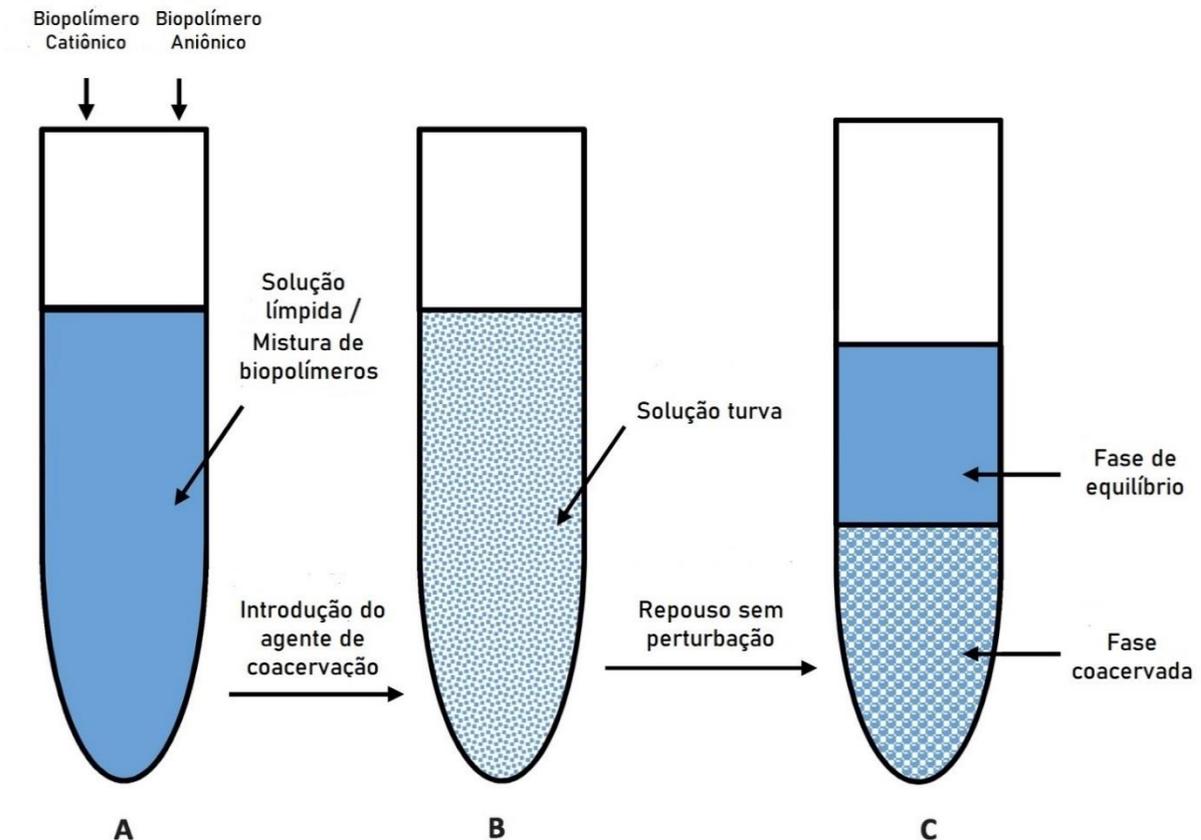
Figura 9 – Esquema do processo de coacervação aplicado na encapsulação de princípios ativos



Fonte: adaptado de Timilsena *et al.* (2019).

De acordo com Ferreira, Nicoletti e Dragosavac (2023), a técnica de coacervação complexa resulta especialmente da interação eletrostática entre os polímeros de cargas opostas (um poliânion e um policátion), levando à formação de complexos que tendem a precipitar devido à repulsão do solvente. Timilsena *et al.* (2019) afirmam que o processo é iniciado por alterações de pH, diminuição da temperatura ou adição de um sal (como um agente de coacervação). Em seguida, nota-se a turbidez na solução reagente, dada após a formação de partículas coacervadas muito pequenas. Posteriormente, dando prosseguimento ao processo, as micropartículas coalescem levando à formação de partículas maiores, que devido à maior densidade, tendem a precipitar e sedimentar no fundo do recipiente (Figura 10).

Figura 10 – Etapas da coacervação complexa



Legenda: A: sistema límpido de biopolímeros, B: turvação do sistema, C: separação da fase de equilíbrio e da fase coacervada.

Fonte: adaptado de Timilsena *et al.* (2019).

A coacervação complexa é utilizada para formar microcápsulas contendo óleos essenciais, cristais líquidos, aromatizantes, corantes e tintas como material de núcleo (GHOSH, 2006), e geralmente produz microcápsulas mononucleadas ou multinucleadas com revestimento uniforme (TIMILSENA *et al.*, 2019). Algumas das suas vantagens são proporcionar alto rendimento no encapsulamento de fármacos hidrossolúveis (SILVA *et al.*, 2003), bem como o controle eficiente do tamanho das partículas (CARVALHO; ESTEVINHO; SANTOS, 2016). No entanto, exige controle rigoroso das condições experimentais.

Entre as desvantagens comuns dessa técnica, pode-se citar a aglomeração excessiva de micropartículas, além de altos custos associados à reciclagem de não-solventes e à eliminação de solventes residuais quando a manipulação ocorre em meios não-aquosos. Em determinados casos, a estabilização das micropartículas requer o uso de agentes de reticulação, valores extremos de pH ou elevadas temperaturas, limitando o encapsulamento de substâncias termossensíveis como polipeptídeos e proteínas (SILVA *et al.*, 2003). De acordo com Gouin

(2004), as principais limitações à sua aplicação na indústria alimentícia estão no seu alto custo e processo demasiadamente complexo.

Constantino e Garcia-Rojas (2023) microencapsularam  $\beta$ -caroteno por coacervação complexa de amido modificado de amaranto e lactoferrina para aplicação em balas de goma. Os autores obtiveram formação de coacervados com alta afinidade entre a lactoferrina e o amido modificado de amaranto em condições de pH entre 3,5 e 5,5. Cerca de 98% do  $\beta$ -caroteno foi microencapsulado nos coacervados formados pela proteína e o carboidrato, em pH 5. Foram obtidas microcápsulas esféricas com boa estabilidade fotolítica e térmica. A adição de microcápsulas contendo  $\beta$ -caroteno em balas de goma reduziu sua dureza e permitiu 22% de bioacessibilidade, indicando que o corante microencapsulado em coacervados amido modificado de amaranto/lactoferrina pode ser usado para fortificação de balas de goma.

Oliveira *et al.* (2022) microencapsularam extrato de folha de oliveira (*Olea europaea L*) em gelatina e goma tragacanto como materiais de parede por meio da coacervação complexa, visando sua aplicação em hambúrgueres de carne ovina com o objetivo de reduzir a degradação oxidativa desse produto. Foi demonstrado que as partículas de gelatina e gelatina/tragacanto contendo o extrato tiveram maior capacidade de reduzir as reações oxidativas quando comparadas às partículas de extrato obtidas apenas com tragacanto, uma vez que as primeiras proporcionaram os maiores percentuais de liberação de compostos fenólicos nos dois primeiros meses de armazenamento. Além disso, considerando a atividade antioxidante observada ao final do período de armazenamento, essas partículas poderiam substituir o aditivo artificial eritorbato de sódio, demonstrando potencial para aplicação em produtos à base de carne ovina visando reduzir a oxidação lipídica, além, também, da possibilidade de utilização de antioxidantes naturais em substituição aos artificiais desses produtos.

### **3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA MICROENCAPSULAÇÃO**

Como relatado, a microencapsulação de produtos/compostos de interesse é comumente realizada utilizando biopolímeros provenientes de diversas fontes. Carboidratos (como amido e maltodextrina), gomas (goma arábica, goma acácia, alginato e outras), proteínas (proteína do leite e do soro do leite, gelatina etc.) e polissacarídeos (como quitosana) são largamente referidos na literatura (ALU'DATT *et al.*, 2022; ESTEVINHO *et al.*, 2013; GHARSALLAOUI *et al.*, 2007; MADENE *et al.*, 2006; SUAVE *et al.*, 2006; TIMILSENA; HAQUE; ADHIKARI, 2020). Os carboidratos são os materiais mais utilizados como agentes encapsulantes devido a sua alta solubilidade em água, capacidade de se ligar a compostos flavorizantes e aromatizantes,

diversidade e baixo custo (AZEREDO, 2005; MADENE *et al.*, 2006). No entanto, tendem a apresentar fracas propriedades interfaciais, devendo ser quimicamente modificados para aperfeiçoá-los. Em contrapartida, as proteínas possuem natureza anfifílica, o que confere propriedades para encapsular materiais de núcleo hidrofóbicos (GHARSALLAOUI *et al.*, 2007).

Alguns dos materiais mais utilizados em processos de encapsulação serão descritos a seguir.

### *Alginatos*

Os alginatos são polissacarídeos aniônicos naturais, não ramificados, purificados por tratamento com soluções alcalinas, na maioria das vezes hidróxido de sódio, e convertidos em alginato de sódio. São extraídos das paredes celulares de várias espécies de algas marrons (como *Laminaria hyperborea*, *Macrocystis pyrifera* e *Ascophyllum nodosum*) para uso comercial na indústria (SABERI RISEH *et al.*, 2022), embora também possa ser obtido por meio de síntese bacteriana, a partir de *Azotobacter vinelandii* e várias espécies de *Pseudomonas* (AGÜERO *et al.*, 2017; GOMBOTZ; WEE, 1998).

No que diz respeito à microencapsulação, ácido algínico é extraído de algas marrons, alginato de sódio é produzido e purificado e em seguida, utilizado como material encapsulante (SABERI RISEH *et al.*, 2022). Como vantagens, destacam-se a biocompatibilidade, versatilidade química e baixa toxicidade, além da sua capacidade de formação de gel pela adição de cátions divalentes, como o  $Ca^{2+}$ , por exemplo (AGÜERO *et al.*, 2017; LEE; MOONEY, 2012). Saberi Riseh *et al.* (2022) descrevem três desvantagens do uso de alginato na microencapsulação: a falta de consistência em meios alcalinos; alta porosidade, que faz com que as microcápsulas sejam instáveis e permeáveis à água, reduzindo assim o tempo de liberação do núcleo; além de baixas qualidades mecânicas e rápida decomposição, tornando-o inadequado para encapsulamento a longo prazo. No entanto, para corrigi-las, é possível a adição de uma camada de alginato combinado com biopolímeros mais estáveis e biodegradáveis, como gelatina, quitosana e lignina.

### *Quitosana*

A quitosana é um polissacarídeo amplamente encontrado na natureza, sendo o segundo mais abundante depois da celulose. É encontrada principalmente na casca de camarões e

caranguejos, bem como na parede celular de algas e fungos. Frequentemente é utilizada como material de parede na microencapsulação. O que a torna única é o fato de possuir grupos amino livres, tornando-se o único polissacarídeo básico entre os polissacarídeos naturais (YANG *et al.*, 2020). Além disso, a quitosana possui propriedades como biodegradabilidade, biocompatibilidade e efeitos osmóticos. Por ser atóxica e biodegradável, é amplamente utilizada em diversas aplicações, incluindo conservação de frutas e vegetais frescos, aditivos alimentares, cosméticos, produtos médicos, entre outros (ESTEVINHO *et al.*, 2013). Uma das principais limitações da quitosana é a sua fácil dissolução em meio cujo pH é inferior ao pH do estômago, conforme mencionado por Martău, Mihai e Vodnar (2019). Embora essa característica seja vantajosa para a liberação de compostos químicos no estômago, ela se torna uma desvantagem na entrega de drogas proteicas ao intestino, uma vez que a dissolução da matriz no estômago pode resultar na desnaturação de compostos proteicos liberados ou de outros compostos de interesse. Sendo assim, para torná-la adequada para a administração de proteínas, são necessárias várias modificações químicas.

### Maltodextrina

A maltodextrina é um polímero sacarídeo não doce composto por unidades de D-glicose unidas por ligações  $\alpha$ 1-4. É encontrada na forma de pó branco ou solução concentrada obtida a partir da hidrólise parcial do amido de milho por meio de ácidos e/ou enzimas (SAMANTHA *et al.*, 2015), e apresenta baixa capacidade emulsificante, sendo essa, uma das suas principais desvantagens (GHARSALLAOUI *et al.*, 2007). Por isso, é comum utilizar misturas de maltodextrina com goma arábica, amido modificado ou proteínas, que possuem boa capacidade emulsificante e podem compensar essa deficiência (SAMANTHA *et al.*, 2015). Baixa higroscopicidade, baixo custo e alta solubilidade são características que fazem com que a maltodextrina seja aplicada na microencapsulação (PEREIRA *et al.*, 2018), principalmente no método de secagem por pulverização, pois sua baixa higroscopicidade evita a aglomeração de partículas, enquanto em determinados casos apresenta efeito antioxidante, retenção de compostos voláteis e baixa viscosidade (PEREIRA *et al.*, 2018; SAMANTHA *et al.*, 2015).

### Goma arábica

A goma arábica, também conhecida como goma acácia, é composta por uma estrutura altamente ramificada de D-galactose, L-arabinose, L-ramnose e ácido D-glucurônico. Cerca de

2% desse arranjo molecular é constituído por um componente proteico covalentemente ligado, desempenhando um papel crucial nas propriedades emulsificantes da goma (AZEREDO, 2005; PEREIRA *et al.*, 2018). Além disso, historicamente é considerada um material de revestimento de excelência devido à sua solubilidade, boas propriedades emulsificantes, baixa viscosidade, sabor suave e alta estabilidade oxidativa conferida aos óleos, e por essa razão, tem sido amplamente utilizada como um material de encapsulação (MICROENCAPSULAÇÃO, 2017). Trabalhos recentes mostram que a goma arábica também pode ter atividade antimicrobiana, como verificado por Karaaslan *et al.* (2021), que utilizaram a mistura de maltodextrina e goma arábica para atomização do óleo de semente de pimenta por meio da secagem por pulverização. Neste estudo, a maltodextrina não inibiu a atividade microbiana de bactérias patogênicas testadas, enquanto a goma arábica e a combinação goma arábica/maltodextrina aumentaram a atividade antimicrobiana do óleo de semente de pimenta, ao inibirem o crescimento dos microrganismos, além de conferir estabilidade.

No entanto, o material apresenta limitações como o alto custo (GHARSALLAOUI *et al.*, 2007) e problemas de disponibilidade, pois sua produção depende de regiões com instabilidades climáticas e conflitos políticos (PEREIRA *et al.*, 2018).

### **3.4 APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS E OUTRAS ÁREAS**

A microencapsulação vem sendo amplamente empregada em diferentes segmentos industriais, como o agrícola, alimentício, farmacêutico, biotecnológico e têxtil. No que tange a indústria de alimentos, os produtos encapsulados vão desde corantes, *flavours*, enzimas, probióticos, vitaminas a outros ingredientes alimentícios sensíveis, com o intuito de prolongar a estabilidade e vida útil, bem como manter aromas, sabores e cores dos alimentos (ALU'DATT *et al.*, 2022; RAY; RAYCHAUDHURI; CHAKRABORTY, 2016). Em todas as aplicações, potencializar o efeito esperado, minimizar a toxicidade e a degradação do ingrediente ativo são os principais objetivos (MICROENCAPSULAÇÃO, 2017).

De acordo com Ghosh (2006), algumas das vantagens da microencapsulação são: proteção de materiais instáveis e sensíveis em seus ambientes antes do uso; melhor processabilidade (aumento da solubilidade, dispersibilidade e fluidez); aumento da vida útil, por evitar reações indesejáveis como oxidação e degradação; liberação controlada; manuseio seguro e conveniente de materiais tóxicos; atenuação de odor e/ou sabor indesejáveis; distribuição controlada e direcionada de medicamentos; imobilização de enzimas e microrganismos, dentre outras. Tais vantagens e possibilidades justificam o crescente interesse

e desenvolvimento de técnicas sofisticadas para encapsulação ao longo dos anos, comprovados pelo crescimento no número de publicações dos anos 1950 em diante (GOUIN, 2004).

Numerosas aplicações da microencapsulação nas mais diversas áreas podem ser encontradas na literatura. Algumas dessas aplicações em diferentes segmentos industriais são citadas a seguir (BAKRY *et al.*, 2015; BEZERRA *et al.*, 2016; CARVALHO; ESTEVINHO; SANTOS, 2016; CERQUEIRA, 2014; LÊDO *et al.*, 2021; SILVA, 2019; SUAVE *et al.*, 2006):

### 3.4.1 Indústria e tecnologia de alimentos

Atualmente, a microencapsulação é muito utilizada na indústria alimentícia devido às vantagens conferidas, tais como aprimoramento da termoestabilidade, proteção de compostos bioativos, liberação controlada, manutenção de voláteis, mascaramento de odores, melhoria da textura e sabor, transformação de um líquido em sólido/pó para facilitar seu transporte, manipulação e inclusão em formulações (ALU'DATT *et al.*, 2022; FAVARO-TRINDADE; PINHO; ROCHA, 2008; GHOSH, 2006; JAFARI *et al.*, 2023; RAY; RAYCHAUDHURI; CHAKRABORTY, 2016). Substâncias como acidulantes, corantes, aromatizantes, vitaminas, enzimas, microrganismos, lipídios, entre outras, são encapsuladas e adicionadas aos alimentos.

Para favorecer a aplicação industrial, a pesquisa na área de encapsulação é contínua, dispondo de uma vasta gama de estudos sobre materiais de parede, métodos e compostos encapsulados. Por exemplo, Maulidna *et al.* (2020) realizaram a microencapsulação de óleo essencial à base de gengibre (*Zingiber cassumunar roxb*) com quitosana e fibra do resíduo do tronco da palmeira de dendê, com o objetivo de proteger o óleo essencial, prolongar sua vida útil e facilitar sua aplicação em diferentes produtos. A quitosana, um polímero natural, e as fibras do resíduo da palmeira foram utilizadas como materiais de encapsulamento, empregando o método de secagem por *spray drying*, que permitiu a formação de microcápsulas com tamanho e morfologia controlados. Os resultados demonstraram que a microencapsulação do óleo essencial de gengibre foi eficaz, resultando em microcápsulas estáveis com boa capacidade de retenção do óleo. Segundo os autores, essas microcápsulas podem ser aplicadas em diversas formulações, como produtos cosméticos, alimentos e suplementos, proporcionando benefícios terapêuticos do óleo essencial de gengibre.

Valduga *et al.* (2008) utilizaram o método de microencapsulação de antocianinas do bagaço da uva "Isabel" (*Vitis labrusca*) por *spray drying*, com objetivo de obter um corante natural (antocianina) na forma de pó. Os resultados indicaram que o processo de extração, secagem por atomização e microencapsulamento foram eficazes na obtenção de antocianinas,

com concentração máxima de antocianinas totais de 300 mg/100 g de bagaço de uva (umidade 5%), nas condições de pH 1,0, tempo de extração de 3 horas, temperatura de 15 °C e volume de etanol de 250 mL. A melhor condição para o encapsulamento e a secagem foi obtida utilizando proporções iguais de maltodextrina e goma arábica (50:50), na qual o encapsulado apresentou 95 mg de antocianinas /100 g.

Sousa (2020) produziu linguiças de tilápia enriquecidas de EPA (ácido eicosapentaenoico) e DHA (ácido docosahexaenoico) da série ômega 3, por meio da técnica de gelificação iônica. O efeito da microencapsulação de EPA e DHA e do uso de urucum na qualidade do produto foi avaliado, cujos resultados indicam que a técnica de microencapsulação foi eficaz na proteção dos ácidos graxos contra processos oxidativos e que o pó de urucum pode ser uma alternativa a corantes sintéticos, além de atuar como antioxidante.

Na Tabela 5 são apresentados outros exemplos de aplicações da microencapsulação na indústria de alimentos.

Tabela 5 – Exemplos de aplicação de encapsulação na indústria e tecnologia de alimentos

| Artigos de microencapsulação | Agente ativo                        | Agente encapsulante  | Método utilizado         | Principais resultados e recomendações   | Referências                             |
|------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|---|---|
| <b>Óleos Essenciais</b>      | Óleo essencial de pimenta Sichuan   | Isolado proteico de soja, fibra dietética solúvel de semente da pimenta Sichuan        | Coacervação complexa     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ao ser encapsulado, o óleo essencial de pimenta Sichuan mostrou boa estabilidade térmica e de armazenamento, com propriedade de liberação lenta em alimento modelo, além de ter aumentado sua atividade antibacteriana, preservando sua atividade antioxidante;</li> <li>Autores entendem que o estudo forneceu informações valiosas para melhorar os defeitos de óleos essenciais em coacervação complexa e possibilita uma alternativa para utilização de resíduos vegetais</li> </ul>           | CHEN <i>et al.</i> , (2022)             |
|                              | Óleo essencial de baga de zimbro    | Goma arábica, maltodextrina, alginato de sódio e concentrado proteico de soro de leite | Secagem por pulverização | <ul style="list-style-type: none"> <li>Os melhores resultados foram obtidos quando o óleo essencial de baga de zimbro foi encapsulado usando goma arábica/maltodextrina;</li> <li>A liberação no sistema alimentar oleoso foi completa e prolongada, necessitando de 15 a 45 minutos para a liberação total do óleo, dependendo do material de parede;</li> <li>Goma arábica/maltodextrina resultou em liberação mais lenta</li> </ul>  | BAJAC <i>et al.</i> , (2022)            |
|                              | Óleo essencial de pimenta do reino  | $\beta$ -lactoglobulina e alginato de sódio  | Coacervação complexa     | <ul style="list-style-type: none"> <li>A microcápsula de óleo essencial de pimenta do reino apresentou resistência nas condições oral e gástrica e liberação no intestino, contribuindo para a absorção;</li> <li>O óleo essencial de pimenta do reino, após digestão, apresentou alta estabilidade e bioacessibilidade;</li> <li><math>\beta</math>-lactoglobulina e alginato de sódio mostraram potencial para uso como materiais de parede para encapsulação de óleo essencial de pimenta do reino por coacervação complexa</li> </ul> | BASTOS <i>et al.</i> , (2020)           |
| <b>Corantes naturais</b>     | Antocianinas de pétalas de açafraão | Goma arábica e maltodextrina   | Liofilização             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Nenhuma diminuição significativa no teor de antocianinas nos encapsulados em pó foi observada após o armazenamento;</li> <li>Diferentes composições de goma arábica e maltodextrina (materiais de parede) não apresentaram diferenças significativas na proteção de antocianinas</li> </ul>  | MAHDAVEE KHAZAEI <i>et al.</i> , (2014) |

| Artigos de microencapsulação | Agente ativo             | Agente encapsulante   | Método utilizado         | Principais resultados e recomendações   | Referências  |
|------------------------------|--------------------------|---|--------------------------|---|--|
| <b>Vitaminas</b>             | Curcumina                | Goma arábica, quitosana modificada, alginato de sódio                             | Secagem por pulverização | <ul style="list-style-type: none"> <li>• É possível microencapsular curcumina utilizando biopolímeros como alginato, goma arábica e quitosana modificada, visto que a maioria dos processos de encapsulação desse composto se dá por meios lipídicos;</li> <li>• Foi possível aumentar a eficiência de encapsulamento e o rendimento do produto utilizando soluções alcoólicas ao invés de emulsões, comparado a trabalhos anteriores</li> </ul>  | LUCAS <i>et al.</i> , (2020)                           |
|                              | Vitamina D <sub>3</sub>  | Maltodextrina e gelatina  | Liofilização             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcápsulas contendo vitamina D foram produzidas e incorporadas em iogurte batido visando melhoria de sua textura;</li> <li>• A incorporação das microcápsulas no iogurte aumentou a sobrevivência de <i>Lactobacillus acidophilus</i> durante 28 dias de armazenamento devido ao efeito prebiótico da maltodextrina;</li> <li>• Propriedades de textura e aceitabilidade do iogurte fortificado foram melhoradas;</li> <li>• Autores sugerem trabalhos futuros com a aplicação de outros micronutrientes nas condições ótimas obtidas para os mesmos materiais de parede</li> </ul> | NAMI <i>et al.</i> , (2023)                            |
|                              | Vitamina B <sub>12</sub> | Gordura vegetal com ponto de fusão em 48 °C e lecitina de soja                    | <i>Spray chilling</i>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica de <i>spray chilling</i> se mostrou promissora para encapsular vitamina B<sub>12</sub>, com alto rendimento e eficiência de encapsulamento, bem como alto rendimento do processo;</li> <li>• Partículas sólidas lipídicas com vitamina B<sub>12</sub> exibiram resultados positivos em relação à proteção no período de armazenamento</li> </ul>   | CHALELLA MAZZOCATO; THOMAZINI; FAVARO-TRINDADE, (2019) |
| <b>Aromas</b>                | Aroma de morango         | Maltodextrina, goma arábica, amidos modificados, β-ciclodextrinas e fibra solúvel | <i>Spray drying</i>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• A combinação mais eficiente de material de parede e temperatura de entrada no <i>spray dryer</i> foram avaliados, sendo 16,12% de amido modificado, 9,76% de goma arábica, 4,12% de fibra solúvel, 1% de β-ciclodextrina e secagem a 190 °C por pulverização as condições ótimas;</li> <li>• Solubilidade do pó com aroma de morango foi superior a 90%, enquanto o rendimento do produto foi maior do que 50%;</li> <li>• Os componentes do aroma foram melhor preservados sob temperaturas mais altas na secagem por pulverização</li> </ul>   | BALCI-TORUN; OZDEMIR, (2021)                           |

| Artigos de microencapsulação | Agente ativo   | Agente encapsulante   | Método utilizado   | Principais resultados e recomendações  | Referências                  |
|------------------------------|--|---|--|--|------------------------------|
| <b>Enzimas</b>               | Enzimas papaína e bromelina  | Alginato de sódio e quitosana   | <i>Spray drying</i>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• As enzimas papaína e bromelaína avaliadas no trabalho exibiram significativo potencial antimicrobiano contra cepas de <i>Alicyclobacillus</i>;</li> <li>• A microencapsulação de papaína com quitosana é uma alternativa para aplicação como bioconservantes em produtos ácidos que são submetidos à pasteurização, como o suco de laranja;</li> <li>• São necessários mais estudos sobre a estabilidade e alterações sensoriais após a aplicação deste composto em produtos alimentícios</li> </ul>  | ANJOS <i>et al.</i> , (2018) |
| <b>Fenólicos</b>             | Blendas de extratos fenólicos de jabuticaba, açai juçara e mirtilo                                       | Maltodextrina, goma arábica e concentrado proteico do soro de leite   | <i>Spray drying</i>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• As microcápsulas apresentaram alta concentração de antocianinas e compostos fenólicos, além de propriedades físicas e tecnológicas satisfatórias;</li> <li>• Materiais de parede individuais promoveram maior eficiência de encapsulamento, em contraste com as misturas dos materiais;</li> <li>• A mistura M2 (somente concentrado proteico de soro de leite) foi classificada como produto acabado e poderia ser comercializada como concentrado proteico de alto valor agregado, enquanto as demais misturas foram consideradas corantes naturais, com potencial de aplicação na indústria de alimentos e cosméticos</li> </ul> | ROCHA <i>et al.</i> , (2019) |
| <b>Microrganismos</b>        | <i>Saccharomyces boulardii</i> ,<br><i>Lactobacillus acidophilus</i> e<br><i>Bifidobacterium bifidum</i> | Goma arábica e $\beta$ -ciclodextrina para o <i>spray drying</i> e óleo de palma hidrogenado para o <i>spray chilling</i> | <i>Spray dryer</i> e <i>Spray chilling</i> em camadas simples e duplas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• A microencapsulação em camada dupla melhorou a resistência térmica e gástrica de <i>L. acidophilus</i>;</li> <li>• As microcápsulas obtidas por <i>spray chilling</i> foram resistentes em condições gástricas simuladas;</li> <li>• As microcápsulas obtidas por <i>spray drying</i> apresentaram maior tolerância no sistema intestinal e ao calor;</li> <li>• Em ensaio de tolerância ao calor realizado (50 a 80 °C por 30 minutos), microrganismos probióticos microencapsulados sobreviveram mesmo a 80 °C, enquanto os microrganismos probióticos livres foram detectados apenas a 50 °C após 30 minutos</li> </ul>          | ARSLAN-TONTUL; ERBAS, (2017) |

Fonte: do autor (2023).

### 3.4.2 Outras áreas

#### **Indústria Farmacêutica**

No setor farmacêutico, a microencapsulação trouxe relevante contribuição, tendo seus estudos iniciais datados da década de 1950. Com o intuito de permitir a liberação controlada de fármacos, tornou possível que estes compostos somente fossem liberados nos órgãos/sítios específicos nos quais necessitavam agir ou serem absorvidos. Para essa aplicação, a substância encapsulada é liberada gradativamente por meio de estímulos como mudança de pH, ruptura física e dissolução. Atenuar odores e/ou sabores desagradáveis também é uma aplicação recorrente da microencapsulação na indústria farmacêutica, assim como na alimentícia (SUAVE *et al.*, 2006).

Um estudo sobre o efeito do ftalato de acetato de celulose e polietilenoglicol sobre as propriedades físicas e a liberação da teofilina a partir de microcápsulas pelo método de dispersão foi conduzido por Hussain *et al.* (2016). Os pesquisadores analisaram diferentes formulações de microcápsulas contendo diferentes proporções dos materiais de revestimento e avaliaram suas propriedades físicas, como tamanho de partícula, morfologia e capacidade de liberação da teofilina. Os resultados do estudo mostraram que a adição de ftalato de acetato de celulose e polietilenoglicol influenciou significativamente as propriedades físicas das microcápsulas e a liberação da teofilina. As formulações com diferentes proporções desses materiais de revestimento apresentaram variações no tamanho de partícula, forma e liberação do fármaco. Os pesquisadores observaram que as combinações com maiores proporções de razão entre ftalato de acetato de celulose e polietilenoglicol (3:0; 3:0.1; 3:0.2; e 3:0.3 g, respectivamente) resultaram em microcápsulas com propriedades desejáveis (partículas menores e rendimento da encapsulação), além da liberação controlada da teofilina.

Schneider *et al.* (2023) conduziram um estudo sobre o desenvolvimento de micropartículas e comprimidos microparticulados contendo piperina, um composto bioativo encontrado na pimenta preta. Os pesquisadores exploraram diferentes técnicas de preparação, incluindo a encapsulação por *spray drying* para o desenvolvimento de micropartículas em comprimidos microparticulados. Os resultados do estudo demonstraram que as formulações de micropartículas e comprimidos microparticulados contendo piperina foram bem-sucedidas. As micropartículas apresentaram um tamanho adequado e uma boa uniformidade de distribuição da piperina, enquanto os comprimidos microparticulados mantiveram a integridade das micropartículas durante o processo de compressão. Além disso, os testes de dissolução

revelaram que as formulações desenvolvidas apresentaram liberação controlada da piperina, o que é desejável para otimizar sua absorção e aproveitamento pelo organismo.

### ***Indústria de Cosméticos***

A microencapsulação é uma importante ferramenta para a indústria de cosméticos. Ela pode ser empregada para proteger fragrâncias e outros agentes ativos contra a oxidação decorrente de fatores como calor, luz e umidade, bem como o contato com outras substâncias ao longo de um período prolongado de armazenamento. Além disso, ela evita a evaporação de compostos voláteis e permite o controle da taxa de liberação desses agentes encapsulados (MARTINS *et al.*, 2014; SILVA, 2019).

Taofiq *et al.* (2019) exploraram os benefícios dos ácidos fenólicos, ácido cinâmico e ergosterol como ingredientes cosméticos, e o uso da microencapsulação por atomização/coagulação como estratégia para garantir a estabilidade e a bioatividade sustentada desses compostos. O objetivo principal do estudo foi estabilizar esses compostos por meio da microencapsulação, garantindo sua integridade e prolongando sua liberação ao longo do tempo. Os resultados obtidos foram bastante promissores, demonstrando que a microencapsulação foi eficaz na estabilização dos ácidos fenólicos, ácido cinâmico e ergosterol, as quais mantiveram a bioatividade por um período prolongado, garantindo a eficácia cosmética. O estudo também investigou a aplicação desses ingredientes microencapsulados em produtos cosméticos, como cremes e loções. Os resultados indicaram que a incorporação das microcápsulas em formulações cosméticas foi bem-sucedida, permitindo a liberação controlada dos compostos ativos na pele e fornecendo os benefícios desejados, como ação antioxidante e propriedades de rejuvenescimento da pele.

Um estudo sobre a microencapsulação do ácido cafeico e sua liberação, utilizando o método de emulsão dupla água em óleo em água, foi realizado por Paulo e Santos (2019) com o intuito de avaliar os parâmetros de formulação envolvidos no processo de microencapsulação. O ácido cafeico, um composto bioativo com propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, foi escolhido devido aos seus benefícios potenciais na indústria de alimentos e cosméticos. Os resultados obtidos no estudo indicaram que a microencapsulação do ácido cafeico foi bem-sucedida, resultando em partículas microencapsuladas com alta eficiência de encapsulação e rendimento do produto.

Nandy *et al.* (2020) realizaram um estudo sobre a microencapsulação do palmitato de retinila pela técnica de *melt-dispersion* (atomização de uma matriz fundida) para aplicação

cosmética. O objetivo geral desse estudo foi microencapsular o éster de retinol e ácido palmítico por meio da dispersão por fusão, investigar o efeito das variáveis do processo, como o tipo de cera, a porcentagem teórica de carga, a porcentagem de surfactante e a velocidade de agitação; e caracterizar as microcápsulas obtidas em termos de tamanho e morfologia, capacidade de carga, eficiência de encapsulação e atividade antioxidante. Nesse estudo, o palmitato de retinila foi encapsulado com sucesso, com eficiência de encapsulação variando entre 60% e 80%, e o tamanho das partículas, de 30 nm a 500 nm. A análise estatística revelou que a capacidade de carga teórica e a porcentagem de surfactante desempenharam um papel significativo no controle da carga e do tamanho das cápsulas obtidas.

### ***Agroquímica***

Na indústria agroquímica, a microencapsulação é usada em muitos produtos para reduzir a aplicação generalizada de agrotóxicos e melhorar a eficiência dos tratamentos (SUAVE *et al.*, 2006). Bajpai e Giri (2002) citam que a depender das condições de aplicação (método utilizado e condições climáticas), até 90% dos agrotóxicos aplicados não atingem o alvo desejado. A microencapsulação é uma forma de reduzir custos, diminuir a contaminação ambiental e evitar efeitos indesejáveis em outras culturas que possam ser atingidas por deriva, por exemplo (SUAVE *et al.*, 2006). Além disso, é uma técnica que tem sido sugerida na produção de bioinseticidas, que embora sejam menos agressivos ao meio ambiente e ao ser humano, ainda são normalmente mais caros, têm menor tempo de armazenamento, ação mais lenta e geralmente possuem menor eficácia quando comparados aos agroquímicos (LÊDO *et al.*, 2021).

Terada *et al.* (2016) desenvolveram uma abordagem de microencapsulação, ao qual dispensa o uso de solvente. Para esse fim, utilizaram um homogeneizador de alta velocidade e realizaram a polimerização de poliuretano com poliol e isocianato, enquanto clotianidina (inseticida neonicotinóide solúvel em água) e clotianidina com argila foram utilizadas como materiais de núcleo. Nesse método, foi possível ajustar o tamanho das partículas e o desempenho de liberação sustentada das microesferas de clotianidina (substância inseticida de uso agrícola) por meio da proporção de componentes e revestimento. Os resultados experimentais de liberação foram consistentes com o modelo de Baker-Lonsdale, o qual é derivado da liberação de fármacos em dispersões monolíticas esféricas. Essa escolha de modelo foi suportada pela análise das microesferas antes e após o teste de liberação. Os autores ainda destacam a abordagem sustentável e econômica dessa técnica de microencapsulação, que

dispensa o uso de solventes. Além disso, há a possibilidade de ajustar o tamanho das partículas e o desempenho de liberação sustentada de acordo com os fatores do processo, o que também são vantagens relevantes desse método.

Um estudo sobre a microencapsulação por coacervação complexa entre gelatina/goma arábica e liberação controlada de geraniol foi conduzido por Ogilvie-Battersby *et al.* (2022). Os pesquisadores concentraram-se em otimizar o processo de encapsulação de geraniol, substância repelente de insetos, e investigar sua cinética de liberação. Verificou-se que as microcápsulas de gelatina/goma arábica encapsularam e liberaram efetivamente o geraniol, tornando-as adequadas para possíveis aplicações em formulações de repelentes de insetos. Essa pesquisa contribui para o desenvolvimento de abordagens inovadoras para a liberação de substâncias repelentes de insetos, oferecendo benefícios potenciais em termos de eficácia aprimorada e proteção prolongada.

### ***Indústria Têxtil***

A microencapsulação também encontra aplicações na indústria têxtil. Por exemplo, é possível aprimorar as características dos tecidos por meio da inclusão de elementos que proporcionam uma experiência tátil mais agradável, como suavidade e maciez, bem como pela incorporação de funcionalidades adicionais. Essas funcionalidades podem englobar a liberação de fragrâncias, ação antimicrobiana ou antiácaros, proteção contra raios ultravioleta, repelência a insetos e capacidade de regulação térmica (CERQUEIRA, 2014; PENG *et al.*, 2023), enquanto algodão, seda, fibra sintética e lã são alguns dos exemplos de materiais que podem ter microcápsulas aplicadas a eles (PENG *et al.*, 2023).

Özsevinç e Alkan (2022) utilizaram a técnica de polimerização interfacial para produzir microcápsulas de poliuretano à base de etileno glicol para aplicações têxteis. Essas microcápsulas carregam óleo essencial de lavanda medicinal e têm a capacidade de liberá-lo de forma controlada. O poliuretano proporcionou estabilidade e resistência mecânica, enquanto a liberação gradual do óleo de lavanda foi facilitada pelo material de revestimento. Além disso, as microcápsulas responderam aos estímulos mecânicos, permitindo a liberação do óleo quando o tecido foi pressionado ou friccionado. Os resultados mostram que as microcápsulas obtidas são eficazes na liberação controlada e na resposta mecânica, abrindo possibilidades para o desenvolvimento de têxteis funcionais com propriedades terapêuticas.

No estudo realizado por Yingngam *et al.* (2019) foi explorada a otimização do processo de microencapsulação do óleo de citronela utilizando a técnica de *spray drying*. O objetivo

principal era reduzir a volatilidade e a irritação do óleo quando incorporado em tecidos cosméticos. Técnica de superfície de resposta foi empregada para avaliar e otimizar as variáveis do processo, incluindo a concentração do polímero, concentração do surfactante e temperatura de secagem. Os resultados obtidos revelaram que a otimização das condições de microencapsulação conduziu à obtenção de microcápsulas de óleo de citronela com menor volatilidade e irritação. Essas microcápsulas apresentam um grande potencial para serem utilizadas na fabricação de tecidos cosméticos, proporcionando benefícios terapêuticos, como ação repelente de insetos, ao mesmo tempo em que reduzem a irritação cutânea.

Ghayempour e Mortazavi (2015) realizaram uma investigação abrangente sobre a aplicação de nanocápsulas poliméricas contendo óleos essenciais em tecidos de algodão, utilizando o inovador método de cura por micro-ondas. O objetivo principal do estudo foi desenvolver têxteis com propriedades antimicrobianas e fragrância duradoura, aproveitando a adesão eficiente das nanocápsulas às fibras do algodão e a liberação controlada dos óleos essenciais ao longo do tempo. No estudo, foram empregados nanocápsulas poliméricas contendo óleos essenciais específicos, os quais possuem propriedades antimicrobianas conhecidas. Os resultados obtidos revelaram que o método de cura por micro-ondas foi altamente eficaz na obtenção de tecidos com propriedades antimicrobianas e fragrância duradoura. As nanocápsulas aderiram de maneira estável às fibras de algodão, permitindo uma liberação controlada dos óleos essenciais ao longo do tempo, o que contribuiu para a preservação das propriedades antimicrobianas e da fragrância nos tecidos.

Hasan *et al.* (2021) conduziram um estudo sobre a funcionalização de lã por meio de nanopartículas de prata, com o objetivo principal de explorar as propriedades colorantes, antibacterianas e capacidade de tratamento de águas residuais conferidas pelo encapsulado. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que tal funcionalização conferiu propriedades de coloração duradoura, resistência antibacteriana eficaz e capacidade de tratamento de águas residuais. Tais propriedades podem ser atribuídas à interação das nanopartículas de prata com as fibras de lã, o que resultou em uma superfície modificada com propriedades desejáveis.

#### **4 PERSPECTIVAS FUTURAS**

A microencapsulação é uma tecnologia promissora que permite diversas oportunidades e aplicações em vários segmentos industriais. O mercado global de microencapsulação foi estimado em US\$ 11,9 bilhões em 2022 e há previsão de aumento a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 10,3% de 2023 a 2030, impulsionado pela demanda por produtos

de liberação controlada, proteção de ingredientes ativos, melhoria da estabilidade e aprimoramento das propriedades funcionais (Grand View Research, 2023).

Vários fatores têm impulsionado o crescimento do mercado, como a conscientização dos consumidores sobre a qualidade e segurança dos produtos, avanços tecnológicos na área de microencapsulação, maior demanda por ingredientes funcionais e a crescente aplicação da tecnologia em diversas indústrias. Produtos como drogas ativas (por exemplo, insulina, proteínas, peptídeos e vacinas), substâncias naturais, produtos de higiene e cuidados pessoais, têxteis, cosméticos e alimentos funcionais são alguns dos impulsionadores da demanda por microencapsulação (BALTRUSCH *et al.*, 2022; CONSTANTINO; GARCIA-ROJAS, 2023; FIGUEIREDO *et al.*, 2022; Grand View Research, 2023; NAHUM; DOMB, 2021; NAMI *et al.*, 2023).

Um exemplo visível desse crescimento é a utilização de microencapsulação na indústria cosmética. Em março de 2022, a Reed Pacific, uma empresa proeminente no mercado global de microencapsulação, lançou a microcápsula “Potenza Argan Oil” para uso cosmético, demonstrando a estabilidade do produto em receitas à base de água (mesmo em altas concentrações) sem causar instabilidade na formulação. O encapsulamento também protege os ácidos graxos da oxidação, limitando a exposição à luz e ao ar, o que aumenta significativamente a eficácia e a vida útil do óleo de argan (REED PACIFIC, 2022).

No entanto, desafios como a seleção adequada de materiais de parede, desenvolvimento de métodos de encapsulação eficientes, escalabilidade da produção e regulamentações governamentais podem influenciar o crescimento e a adoção da tecnologia de microencapsulação. Em suma, espera-se um crescimento contínuo e diversificado da microencapsulação, impulsionado pela colaboração da indústria, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, demanda por produtos funcionais e aplicação em diversos setores industriais.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho de revisão, a microencapsulação e seus desdobramentos nos principais segmentos industriais, em especial o alimentício, foram abordados de maneira ampla, demonstrando se tratar de uma tecnologia bem difundida nas indústrias de alimentos, farmacêutica, cosmética, têxtil e agrícola, podendo ser utilizada para a liberação controlada, estabilização e proteção de compostos de interesse. Ao longo das décadas, seu campo de aplicação tem crescido exponencialmente com o desenvolvimento de novas técnicas e materiais de revestimento. Diversos estudos na área têm explorado diferentes métodos, materiais e

compostos de interesse. Além disso, a escolha do método e material de revestimento depende das características desejadas, sendo bastante comum a combinação de diferentes abordagens para obtenção de microcápsulas.

No segmento alimentício, a microencapsulação é uma excelente opção para proteger compostos facilmente degradáveis e/ou instáveis, aumentando sua estabilidade e vida útil. Na área farmacêutica, ela oferece benefícios como liberação controlada e direcionada, além do mascaramento de odor e sabor. Na indústria cosmética, a microencapsulação é utilizada para estabilização e liberação controlada de fragrâncias e compostos voláteis. No setor têxtil, seu papel está relacionado ao controle de temperatura e liberação de substâncias ativas em tecidos, enquanto na agroquímica, é empregada para reduzir a toxicidade, permitir liberação controlada e aumentar a eficácia de produtos.

Diante dessa gama de possibilidades e aplicações, acredita-se que as conquistas alcançadas com a microencapsulação continuarão, assim como os estudos nessa área, principalmente no que diz respeito à otimização dos métodos e materiais de revestimento já existentes, além da descoberta e aprimoramento de novas técnicas.

## REFERÊNCIAS

- ACHMAD KOSASIH, E. *et al.* Microencapsulation of maltodextrin and gelatin using spray drying with double-condenser compression refrigeration systems, **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 45, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102931>. Acesso em: 11 abr. 2023.
- AGÜERO, L. *et al.* Alginate microparticles as oral colon drug delivery device: A review, **Carbohydrate Polymers**, v. 168, p. 32-43, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.033>. Acesso em: 28 maio. 2023.
- ALONSO, L.; CALVO, M. V.; FONTECHA, J. The Influence of  $\beta$ -Cyclodextrin on the Reduction of Cholesterol Content in Egg and Duck Liver Pâté. **Foods**, v. 8, n. 7, p. 241, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods8070241>. Acesso em: 30 maio. 2023.
- ALU'DATT, M. H. *et al.* Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients, **Food Bioscience**, v. 50, part A, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101971>. Acesso em: 21 maio. 2023.
- ANJOS, M. M. *et al.* Preservation of the antibacterial activity of enzymes against Alicyclobacillus spp. through microencapsulation, **LWT**, v. 88, p. 18-25, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.039>. Acesso em: 29 maio. 2023.
- ARENAS-JAL, M.; SUÑÉ-NEGRE, J. M.; GARCÍA-MONTOYA, E. An overview of microencapsulation in the food industry: Opportunities, challenges, and innovations. **European Food Research and Technology**, v. 246, p. 1371-1382, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03496-x>. Acesso em: 24 abr. 2023.
- ARSLAN-TONTUL, S.; ERBAS, M. Single and double layered microencapsulation of probiotics by spray drying and spray chilling, **LWT - Food Science and Technology**, v. 81, p. 160-169, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.060>. Acesso em: 28 maio. 2023.
- AZEREDO, H. M. C. Encapsulação: aplicação à tecnologia de alimentos. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 16, n. 1, p. 89-97, 2005. Disponível em: [https://web.archive.org/web/20140316141102id\\_/http://serv-bib.fcfar.unesp.br:80/seer/index.php/alimentos/article/viewFile/106/119](https://web.archive.org/web/20140316141102id_/http://serv-bib.fcfar.unesp.br:80/seer/index.php/alimentos/article/viewFile/106/119). Acesso em: 29 mar. 2023.
- BALTRUSCH, K. L. Spray drying microencapsulation of tea extracts using green starch, alginate or carrageenan as carrier materials, **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 203, p. 417-429, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.129>. Acesso em: 11 maio. 2023.
- BAJAC, J. *et al.* Microencapsulation of juniper berry essential oil (*Juniperus communis L.*) by spray drying: microcapsule characterization and release kinetics of the oil, **Food Hydrocolloids**, v. 125, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107430>. Acesso em: 31 maio. 2023.

BAJPAI, A. K.; GIRI, A. Swelling Dynamics of a Macromolecular Hydrophilic Network and Evaluation of Its Potential for Controlled Release of Agrochemicals. **Reactive and Functional Polymers**, v. 53, p. 125-141, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(02\)00168-2](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(02)00168-2). Acesso em: 08 maio. 2023.

BAKRY, A. M. *et al.* Microencapsulation of Oils: A Comprehensive Review of Benefits, Techniques, and Applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, 2015, p. 143-182. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/284028374\\_Microencapsulation\\_of\\_Oils\\_A\\_Comprehensive\\_Review\\_of\\_Benefits\\_Techniques\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/284028374_Microencapsulation_of_Oils_A_Comprehensive_Review_of_Benefits_Techniques_and_Applications). Acesso em: 09 abr. 2023.

BALCI-TORUN, F.; OZDEMIR, F. Encapsulation of strawberry flavour and physicochemical characterization of the encapsulated powders, **Powder Technology**, v. 380, p. 602-612, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.060>. Acesso em: 30 maio. 2023.

BASTOS, L. P. H. Complex coacervates of  $\beta$ -lactoglobulin/sodium alginate for the microencapsulation of black pepper (*Piper nigrum L.*) essential oil: Simulated gastrointestinal conditions and modeling release kinetics, **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 160, p.861-870, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.265>. Acesso em: 30 maio. 2023.

BERTONI, S. *et al.* Spray congealed lipid microparticles for the local delivery of  $\beta$ -galactosidase to the small intestine, **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, v. 132, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2018.08.014>. Acesso em: 11 maio. 2023.

BEZERRA, F. M. *et al.* Controlled release of microencapsulated citronella essential oil on cotton and polyester matrices. **Cellulose**, v. 23, p. 1459–1470, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0882-5>. Acesso em: 28 maio. 2023.

CARVALHO, I. T.; ESTEVINHO, B. N.; SANTOS, L. Application of microencapsulated essential oils in cosmetic and personal healthcare products – a review. **Int J Cosmet Sci**, v. 38, p. 109-119, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ics.12232>. Acesso em: 09 maio. 2023.

CERQUEIRA, J. R. R. **PREPARAÇÃO DE MICROCÁPSULAS PARA A FUNCIONALIZAÇÃO DE MATERIAIS TÊXTEIS**. 2014. 53 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/40207>. Acesso em: 23 abr. 2023.

CHALELLA MAZZOCATO, M.; THOMAZINI, M.; FAVARO-TRINDADE, C. S. Improving stability of vitamin B12 (Cyanocobalamin) using microencapsulation by spray chilling technique, **Food Research International**, v. 126, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108663>. Acesso em: 30 maio. 2023.

CHEN, K. *et al.* Microencapsulation of Sichuan pepper essential oil in soybean protein isolate-Sichuan pepper seed soluble dietary fiber complex coacervates, **Food Hydrocolloids**, v. 125, 2022, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107421>. Acesso em: 30 maio. 2023.

CID-SAMAMED, A. *et al.* Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications, **Food Chemistry**, v. 384, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132467>. Acesso em: 30 maio. 2023.

CONSTANTINO, A. B. T.; GARCIA-ROJAS, E. E. Microencapsulation of beta-carotene by complex coacervation using amaranth carboxymethyl starch and lactoferrin for application in gummy candies, **Food Hydrocolloids**, v. 139, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108488>. Acesso em: 30 maio. 2023.

CORONEL-AGUILERA, C. P.; MARTÍN-GONZÁLEZ, F. S. Encapsulation of spray dried  $\beta$ -carotene emulsion by fluidized bed coating technology, **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, Part 1, p. 187-193, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.036>. Acesso em: 20 maio. 2023.

DENG, C. *et al.* Formation and stabilization mechanism of  $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex with C10 aroma molecules, **Food Hydrocolloids**, v. 123, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107013>. Acesso em: 14 maio. 2023.

DEWETTINCK, K., HUYGHEBAERT, A. Fluidized bed coating in food technology, **Trends in Food Science & Technology**, v. 10, ed. 4-5, p. 163-168, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00041-2). Acesso em: 14 maio. 2023.

ESTEVINHO, B. N. *et al.* Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications – A review, **Trends in Food Science & Technology**, v. 31, ed. 2, p. 138-155, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.04.001>. Acesso em: 09 maio. 2023.

FAVARO-TRINDADE, C. S. *et al.* Encapsulation of active pharmaceutical ingredients in lipid micro/nanoparticles for oral administration by spray-cooling. **Pharmaceutics**, v. 13, n. 8, p. 1186, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081186>. Acesso em: 30 abr. 2023.

FAVARO-TRINDADE, C. S.; PINHO, S.; ROCHA, G. Revisão: Microencapsulação de ingredientes alimentícios. **Brazilian Journal of Food Technology**. v.11. n.2, p.103-112, 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/237521407\\_Revisao\\_Microencapsulacao\\_de\\_ingredientes\\_alimenticios](https://www.researchgate.net/publication/237521407_Revisao_Microencapsulacao_de_ingredientes_alimenticios). Acesso em: 21 abr. 2023.

FERREIRA, S; NICOLETTI, V. R.; DRAGOSAVAC, M. Novel methods to induce complex coacervation using dual fluid nozzle and metal membranes: Part II – Use of metal membrane technology to induce complex coacervation, **Food and Bioproducts Processing**, v. 139, p. 46-60, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.03.002>. Acesso em: 02 maio. 2023.

FIGUEIREDO, J. A. *et al.* Microencapsulation by spray chilling in the food industry: Opportunities, challenges, and innovations. **Trends in Food Science & Technology**, v. 120, p. 274-287, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.026>. Acesso em: 24 abr. 2023.

GARTI, N.; MCCLEMENTS, D. J. **Encapsulation Technologies and Delivery System for Food Ingredients and Nutraceuticals**. Philadelphia: Wood Publishing Limited, 2012.

Disponível em:  
[https://books.google.com.br/books?id=qHNHAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=qHNHAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 20 abr. 2023.

GHARSALLAOUI, A. *et al.* Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview, **Food Research International**, v. 40, ed. 9, p. 1107-1121, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>. Acesso em: 20 abr. 2023.

GHAYEMPOUR, S.; MORTAZAVI, S. M. Microwave curing for applying polymeric nanocapsules containing essential oils on cotton fabric to produce antimicrobial and fragrant textiles. *Cellulose*, v. 22, ed. 6, p. 4065-4075, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0765-1>. Acesso em: 30 maio. 2023.

GHOSH, S. K. **Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective**. Zelgate, Bélgica: Wiley – VHC, 2006. Disponível em: [https://application.wiley-vch.de/books/sample/352731296X\\_c01.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/352731296X_c01.pdf). Acesso em: 24 mar. 2023.

GONZÁLEZ, A.; ALVAREZ IGARZABAL, C. I. Nanocrystal-reinforced soy protein films and their application as active packaging, **Food Hydrocolloids**, v. 43, p. 777-784, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.008>. Acesso em: 30 maio. 2023.

GOMBOTZ, W. R.; WEE, S. Protein release from alginate matrices, **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 31, ed. 3, p. 267-285, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(97\)00124-5](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(97)00124-5). Acesso em: 28 maio. 2023.

GOUIN, S. Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends, **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, ed. 7–8, p. 330-347, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.10.005>. Acesso em: 19 abr. 2023.

GRAND VIEW RESEARCH – GVS. San Francisco, United States. 2023. Microencapsulation Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Pharmaceutical & Healthcare products), By Technology (Coating), By Coating Material (Carbohydrates), By Region And Segment Forecasts, 2023 – 2030. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microencapsulation-market>. Acesso em: 06 jun. 2023.

HASAN, K. F. *et al.* Wool functionalization through AgNPs: coloration, antibacterial, and wastewater treatment. **Surf Innov** v. 9 ed. 1, p. 25–36, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jsuin.20.00031>. Acesso em: 26 maio. 2023.

HUSSAIN, A. *et al.* Effect of cellulose acetate phthalate and polyethylene glycol on physical properties and release of theophylline from microcapsules. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 52, p. 27-34, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1984-82502016000100004>. Acesso em: 27 maio. 2023.

JAFARI, S. *et al.* A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: Characterization, food application and in vitro gastrointestinal digestion, **Food Hydrocolloids**, v. 134, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108068>. Acesso em: 24 abr. 2023.

JAFARI, S. M. **Nanoencapsulation Technologies for the Food and Nutraceutical Industries**, London: Academic Press, 2017. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=qkouDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=dYa-7Z0AvD&sig=WIGmYR31jKRiDqU4lkWorq5iMV&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=qkouDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=dYa-7Z0AvD&sig=WIGmYR31jKRiDqU4lkWorq5iMV&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 15 abr. 2023.

JAMEKHORSHID, A.; SADRAMELI, S. M.; FARID, M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 31, p. 531-542, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.033>. Acesso em: 28 abr. 2023.

JUNG, T. *et al.* Properties of Cholesterol-reduced Butter and Effect of Gamma Linolenic Acid Added Butter on Blood Cholesterol **Animal Bioscience**, v.18 ed. 11, p. 1646-1654, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.5713/ajas.2005.1646>. Acesso em: 30 maio. 2023.

KIM, G. Y. Microencapsulation of Caramel Flavor and Properties of Ready-to-drink Milk Beverages Supplemented with Coffee Containing These Microcapsules. **Food Sci Anim Resour**. v. 39, ed. 5, p. 780-791, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e68>. Acesso em: 28 abr. 2023.

KARAASLAN, M. *et al.* Gum arabic/maltodextrin microencapsulation confers peroxidation stability and antimicrobial ability to pepper seed oil, **Food Chemistry**, v. 337, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127748>. Acesso em: 28 maio. 2023.

LAOKULDILOK, N. *et al.* Optimisation of microencapsulation of turmeric extract for masking flavour, **Food Chemistry**, v. 194, p. 695-704, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.150>. Acesso em: 30 maio. 2023.

LEDO, C. M. *et al.* Matrizes poliméricas para encapsulação de bioinseticidas. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**. 26 ed. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.12661/pap.2021.015>. Acesso em: 08 maio. 2023.

LEE, D. K.; AHN, J.; KWAK, H. S. Cholesterol Removal from Homogenized Milk with  $\beta$ -Cyclodextrin, **Journal of Dairy Science**, v. 82, ed. 11, p. 2327-2330, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75481-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75481-0). Acesso em: 30 maio. 2023.

LEE, K. Y.; MOONEY, D. J. Alginate: Properties and biomedical applications, **Progress in Polymer Science**, v. 37, ed. 1, p. 106-126, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>. Acesso em: 28 maio. 2023.

LÓPEZ-DE-DICASTILLO, C. *et al.* Food applications of active packaging EVOH films containing cyclodextrins for the preferential scavenging of undesirable compounds, **Journal of Food Engineering**, v. 104, ed. 3, p. 380-386, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.033>. Acesso em: 08 jul. 2023.

LUCAS, J. *et al.* A new approach for the microencapsulation of curcumin by a spray drying method, in order to value food products, **Powder Technology**, v. 362, p.428-435, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.095>. Acesso em: 30 maio. 2023.

MADENE, A. *et al.* Flavour encapsulation and controlled release – a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 41: p. 1-21, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>. Acesso em: 04 maio. 2023.

MAHDAVEE KHAZAEI, K. *et al.* Application of maltodextrin and gum Arabic in microencapsulation of saffron petal's anthocyanins and evaluating their storage stability and color, **Carbohydrate Polymers**, v. 105, p.57-62, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.042>. Acesso em: 30 maio. 2023.

MARTĂU, G. A.; MIHAI, M.; VODNAR, D. C. The Use of Chitosan, Alginate, and Pectin in the Biomedical and Food Sector—Biocompatibility, Bioadhesiveness, and Biodegradability. **Polymers**, v. 11, n. 11, p. 1837, 8 nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym11111837>. Acesso em: 08 jul. 2023.

MARTINS, I. M. Microencapsulation of essential oils with biodegradable polymeric carriers for cosmetic applications, **Chemical Engineering Journal**, v. 245, p. 191-200, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.02.024>. Acesso em: 08 jul. 2023.

MARTINS, P. M. M. *et al.* Microencapsulation of epiphytic coffee yeasts by spray drying using different wall materials: Implementation in coffee medium, **International Journal of Food Microbiology**, v. 379, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109839>. Acesso em: 11 abr. 2023.

MATENCIO, A. *et al.* Applications of cyclodextrins in food science. A review, **Trends in Food Science & Technology**, v. 104, p. 132-143, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.009>. Acesso em: 30 maio. 2023.

MATOS-JR, F. E. *et al.* Effect of feed preparation on the properties and stability of ascorbic acid microparticles produced by spray chilling, **LWT**, v. 75, p. 251-260, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.006>. Acesso em: 11 maio. 2023.

MAULIDNA, B. WIRJOSENTONO; TAMRIN, L. MARPAUNG. Microencapsulation of ginger-based essential oil (*Zingiber cassumunar roxb*) with chitosan and oil palm trunk waste fiber prepared by spray-drying method. **Case Stud. Therm. Eng.**, v. 18, p. 100606, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100606>. Acessado em 28 mai. 2023.

MEHTA, N. *et al.* Microencapsulation as a Noble Technique for the Application of Bioactive Compounds in the Food Industry: A Comprehensive Review. **Applied Sciences**. v. 12, ed. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12031424>. Acesso em: 25 abr. 2023.

MICROENCAPSULAÇÃO. A tecnologia da microencapsulação de ingredientes. **Food Ingredients Brasil**, São Paulo, n. 42, p. 18-26, 2017. Disponível em: [https://revista-fi.com/upload\\_arquivos/201712/2017120513667001512668505.pdf](https://revista-fi.com/upload_arquivos/201712/2017120513667001512668505.pdf). Acesso em: 11 abr. 2023.

NAHUM, V.; DOMB, A. J. Recent Developments in Solid Lipid Microparticles for Food Ingredients Delivery. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 400, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/foods10020400>. Acesso em: 30 abr. 2023.

NAMI, B. *et al.* Gelatin-maltodextrin microcapsules as carriers of vitamin D3 improve textural properties of synbiotic yogurt and extend its probiotics survival, **Food Bioscience**, v. 53, 2023.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102524>. Acesso em: 30 maio. 2023.

NANDY, A. *et al.* Microencapsulation of retinyl palmitate by melt dispersion for cosmetic application. **Journal of microencapsulation**, v. 37, ed. 3, p. 205-219, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02652048.2020.1720029>. Acesso em: 24 maio. 2023.

OGILVIE-BATTERSBY, J. D. *et al.* Microencapsulation and controlled release of insect repellent geraniol in gelatin/gum arabic microcapsules. **Colloids and Surfaces A: physicochemical and Engineering Aspects**, v. 640, 128494, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128494>. Acesso em: 28 maio. 2023.

OLIVEIRA, F. M. *et al.* Encapsulation of olive leaf extract (*Olea europaea L.*) in gelatin/tragacanth gum by complex coacervation for application in sheep meat hamburger, **Food Control**, v. 131, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108426>. Acesso em: 30 maio. 2023.

OXLEY, J. Chapter 4 - **Overview of Microencapsulation Process Technologies**, Microencapsulation in the Food Industry, Academic Press, p. 35-46, 2014. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=b7JZAwwAAQBAJ&printsec=frontcover&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=b7JZAwwAAQBAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 28 abr. 2023.

OXLEY, J. D. 5 - Spray cooling and spray chilling for food ingredient and nutraceutical encapsulation, Editor(s): Nissim Garti, D. Julian McClements, In Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals, **Woodhead Publishing**, 2012, p. 110-130, ISBN 9780857091246. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857095909.2.110>. Acesso em: 30 abr. 2023.

ÖZSEVINÇ, A.; ALKAN, C. Ethylene glycol based polyurethane shell microcapsules for textile applications releasing medicinal lavender and responding to mechanical stimuli. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 652, 129888, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129888>. Acesso em: 29 maio. 2023.

PATEIRO, M. *et al.* Nanoencapsulation of Promising Bioactive Compounds to Improve Their Absorption, Stability, Functionality and the Appearance of the Final Food Products. **Molecules**, v. 26, n. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26061547>. Acesso em: 27 abr. 2023.

PAUCAR, O. C. *et al.* Production by spray chilling and characterization of solid lipid microparticles loaded with vitamin D3, **Food and Bioproducts Processing**, v. 100, p. 344-350, Part A, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.08.006>. Acesso em: 11 maio. 2023.

PAULO, F., SANTOS, L. Microencapsulation of caffeic acid and its release using aw/o/w double emulsion method: Assessment of formulation parameters. **Drying Technology**, v. 37, ed. 8, p. 950-961, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1480493>. Acesso em: 26 maio. 2023.

PENG, X. *et al.* Biopolymers-based microencapsulation technology for sustainable textiles development: A short review, **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100349>. Acesso em: 08 jul. 2023.

PEREIRA, K. C., *et al.* Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão. 2018. **Brazilian Journal of Food Technology**, 21, e2017083. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.08317>. Acesso em: 27 abr. 2023.

POSHADRI, A.; KUNA. A. Microencapsulation technology: a review. **Journal of Research ANGRAU**, v. 38, n. 1, p.86-102, 2010. Disponível em: [http://oar.icrisat.org/6375/1/JR\\_ANGRAU\\_38\\_1\\_86-102\\_2010.pdf](http://oar.icrisat.org/6375/1/JR_ANGRAU_38_1_86-102_2010.pdf). Acesso em: 20 maio. 2023.

POTHAKAMURY, U. R.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Fundamental aspects of controlled release in foods, **Trends in Food Science & Technology**, v. 6, ed. 12, p. 397-406, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(00\)89218-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(00)89218-3). Acesso em: 20 abr. 2023.

RATHORE, S., *et al.* Microencapsulation of microbial cells, **Journal of Food Engineering**, v. 116, ed. 2, p. 369-381, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.022>. Acesso em: 30 abr. 2023.

RAY, S.; RAYCHAUDHURI, U.; CHAKRABORTY, R. An overview of encapsulation of active compounds used in food products by drying technology, **Food Bioscience**, v. 13, p. 76-83, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2015.12.009>. Acesso em: 07 abr. 2023.

REED PACIFIC SPECIALTY CHEMICALS. Argan Oils Cosmetic Use Microcapsules: Reed Pacific's new Potenza Argan Oil microcapsules. Sidney, New South Wales, Austrália. 2022. Disponível em: <https://www.reedpacific.com/argan-oil-cosmetic-use-microcapsules/>. Acesso em: 06 jun. 2023.

ROCHA, J. C. G. *et al.* Microencapsulation by atomization of the mixture of phenolic extracts, **Powder Technology**, v. 343, p. 317-325, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.040>. Acesso em: 03 jun. 2023.

SABERI RISEH, R. *et al.* Nano/microencapsulation of plant biocontrol agents by chitosan, alginate, and other important biopolymers as a novel strategy for alleviating plant biotic stresses, **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 222, Part A, p. 1589-1604, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.278>. Acesso em: 28 maio. 2023.

SAMANTHA, S. *et al.* Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. **African Journal of Food Science**. v.9, p. 462-470, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJFS2015.1279>. Acesso em: 28 maio. 2023.

SCHELL, D.; BEERMANN, C. Fluidized bed microencapsulation of *Lactobacillus reuteri* with sweet whey and shellac for improved acid resistance and in-vitro gastro-intestinal survival, **Food Research International**, v. 62, p. 308-314, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.016>. Acesso em: 21 maio. 2023.

SCHNEIDER, A. C. *et al.* Development of microparticles and microparticulated tablets containing piperine. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 59, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s2175-97902023e21265>. Acesso em: 27 maio. 2023.

SEON, K. H.; AHN, J.; KWAK, H. S. The accelerated ripening of cholesterol-reduced Cheddar cheese by crosslinked  $\beta$ -cyclodextrin, **Journal of Dairy Science**, v. 92, ed. 1, p. 49-57, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1319>. Acesso em: 30 maio. 2023.

SILVA, C., *et al.* Administração oral de peptídeos e proteínas: II. Aplicação de métodos de microencapsulação. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas** [online], v. 39, n. 1, pp. 1-20, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-93322003000100002>. Acesso em: 24 mar. 2023.

SILVA, D. R. E. M. **Desenvolvimento do processo de Microencapsulação: Formulações com Menor Classificação Toxicológica**. 2019. 73 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica). Faculdades de Ciências e Tecnologia de Lisboa, Lisboa. 2019. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/88636>. Acesso em: 28 maio. 2023.

SILVA, P. T. *et al.* Microencapsulation: concepts, mechanisms, methods and some applications in food technology. **Ciência Rural**, v. 44, ed. 7, p. 1304–1311, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130971>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SIMÕES, L. *et al.* Micro- and nano bio-based delivery systems for food applications: In vitro behavior, **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 243, Pages 23-45, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.02.010>. Acesso em: 05 mar. 2023.

SOBEL, R. **Microencapsulation in the Food Industry: A Practical Implementation Guide**. San Diego: Academic Press, 2014. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=b7JZAwwAAQBAJ>. Acesso em: 17 maio. 2023.

SOBRINHO, E. C. S.; FARIAS, M. C. A MICROENCAPSULAÇÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA. **Infarma - Ciências Farmacêuticas**, v. 24, n. 1/3, p. 84-92, 2013. Disponível em:

<https://revistas.cff.org.br/?journal=infarma&page=article&op=view&path%5B%5D=364&path%5B%5D=352>. Acesso em: 05 maio. 2023.

SOUSA, D. G. **Efeito da microencapsulação de EPA e DHA e do uso de urucum na qualidade de língua de tilápia**. 2020. 78 p. João Pessoa, Universidade Federal da Paraíba – UFPB – Campus Bananeiras, Programa de Pós Graduação em Tecnologia Agroalimentar. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/22742>. Acesso em: 20 abr. 2023.

SPERANZA, B., *et al.* Encapsulation of Active Compounds in Fruit and Vegetable Juice Processing: Current State and Perspectives. **Journal of Food Science**, v. 82: p. 1291-1301, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13727>. Acesso em: 08 abr. 2023.

SUAVE, J., *et al.* Microencapsulação: Inovação em diferentes áreas. 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228663357\\_Microencapsulacao\\_Inovacao\\_em\\_diferentes\\_areas](https://www.researchgate.net/publication/228663357_Microencapsulacao_Inovacao_em_diferentes_areas). Acesso em: 29 mar. 2022.

TAOFIQ, O. *et al.* Phenolic acids, cinnamic acid, and ergosterol as cosmeceutical ingredients: Stabilization by microencapsulation to ensure sustained bioactivity. **Microchemical Journal**, v. 147, p. 469-477, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.059>. Acesso em: 25 maio. 2023.

TERADA, T. *et al.* Sustained-release microsphere formulation containing an agrochemical by polyurethane polymerization during an agitation granulation process. **International Journal of pharmaceuticals**, v. 509, ed. (1-2), p. 328-337, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.05.061>. Acesso em: 27 maio. 2023.

TIMILSENA, Y. P. *et al.* Complex coacervation: Principles, mechanisms and applications in microencapsulation, **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 121, p. 1276-1286, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.144>. Acesso em: 26 abr. 2023.

TIMILSENA, Y.; HAQUE, M.; ADHIKARI, B. Encapsulation in the Food Industry: A Brief Historical Overview to Recent Developments. **Food and Nutrition Sciences**, v. 11, p. 481-508, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/fns.2020.116035>. Acesso em: 26 abr. 2023.

TSIRIGOTIS-MANIECKA, M. *et al.* Benefits of pH-responsive polyelectrolyte coatings for carboxymethyl cellulose-based microparticles in the controlled release of esculin, **Materials Science and Engineering: C**, v. 118, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111397>. Acesso em: 20 abr. 2023.

VALDUGA, E. *et al.* Extração, secagem por atomização e microencapsulamento de antocianinas do bagaço da uva "Isabel" (*Vitis labrusca*). **Ciência e Agrotecnologia**, 32, 1568-1574, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500032>. Acessado em 27 mai. 2023.

VENKATESAN, P.; MANAVALAN, R.; VALLIAPPAN, K. Microencapsulation: A vital technique in novel drug delivery system. **Journal of Pharmaceutical Sciences and Research**. 2009. v. 1. p. 26-35. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/279674682\\_Microencapsulation\\_A\\_vital\\_technique\\_in\\_novel\\_drug\\_delivery\\_system](https://www.researchgate.net/publication/279674682_Microencapsulation_A_vital_technique_in_novel_drug_delivery_system). Acesso em: 03 mar. 2023.

XIAO, Z. *et al.* Encapsulation and sustained release properties of watermelon flavor and its characteristic aroma compounds from  $\gamma$ -cyclodextrin inclusion complexes, **Food Hydrocolloids**, v. 97, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105202>. Acesso em: 30 maio. 2023.

YANG, M. *et al.* Microencapsulation Delivery System in Food Industry—Challenge and the Way Forward. **Advances in Polymer Technology**, v. 2020, p. 14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/7531810>. Acesso em: 28 maio. 2023.

YE, Q; GEORGES, N; SELOMULYA, C. Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products, **Trends in Food Science & Technology**, v. 78, p. 167-179, 2018. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.025>. Acesso em: 08 maio. 2023.

YINGNGAM, B. *et al.* Response surface optimization of spray-dried citronella oil microcapsules with reduced volatility and irritation for cosmetic textile uses. **Powder Technology**, v. 355, p. 372-385, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.065>. Acesso em: 30 maio. 2023.