# SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE BEADS DE ALGINATO PARA A LIBERAÇÃO CONTROLADA

Victória R. M. da Silva (PIBIC/CNPq/FA/UEM), João M. F. Rubim (PG), Marcos R. Guilherme (PQ), Andrelson W. Rinaldi (Coorientador), Emerson M. G. Spagnolo (Orientador). E-mail: emgirotto@uem.br.

Universidade Estatual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, Maringá, PR.

**Área e subárea do conhecimento: Ciências Exatas e da Terra/Química.**

**Palavras-chave:** Material funcional; Microesferas; Carreadores biocompatíveis.

## RESUMO

*Beads* de alginato reticuladas com cálcio foram sintetizadas e caracterizadas para o encapsulamento e liberação controlada de ativos (azul de metileno – "AM" e B12). A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicou superfície lisa, homogênea e sem macroporos. Os ensaios por espectrofotometria UV-Vis demonstraram perfil de liberação sustentado, reprodutível e não linear, com ótimo ajuste aos modelos matemáticos. A avaliação dos mecanismos cinéticos revelou que a difusão Fickiana atua apenas na etapa inicial (*burst release*), enquanto o relaxamento macromolecular rege a liberação contínua, comprovando a eficiência e a versatilidade da matriz de alginato na modulação da liberação de diferentes moléculas.

## INTRODUÇÃO

O mecanismo de liberação controlada de ativos em matrizes poliméricas envolve a difusão do soluto pelos poros do gel e pelo relaxamento macromolecular das cadeias poliméricas em meio aquoso (MACHADO et al., 2026). Nesse contexto, as *beads* de alginato são uma alternativa promissora e sustentável por serem formadas por um polímero natural, biodegradável e atóxico (FERNANDES, 2020). Sua estrutura porosa e a capacidade de reticulação iônica protegem os ativos encapsulados contra a degradação prematura, permitindo a modulação e o ajuste da taxa de liberação gradual. Como compostos modelos para avaliação desse sistema, o azul de metileno, um corante catiônico amplamente utilizado na indústria pode ser usado como uma molécula modelo na liberação controlada, e a B12, uma molécula hidrossolúvel de elevada massa molecular, foram encapsulados para preservar sua estabilidade química e promover uma liberação contínua e controlada (SANTOS et al., 2021).

## MATERIAIS E MÉTODOS

*Preparação de beads de alginato/sais de cálcio; AM e B12*

Uma solução de alginato (10 mg/mL) foi gotejada em uma solução de cloreto de cálcio (5 % m/m) formando *beads* de alginato/sais de cálcio. Foi adicionado AM (10 mg/mL) a uma solução de alginato (10 mg/mL), sendo gotejada em uma solução de $CaCl_2$ (5 % m/m) formando *beads* de AM. E uma solução de alginato (10 mg/mL) foi gotejada em 50 mL de uma solução aquosa de $CaCl_2$, preparada com 2,5 g do sal e contendo 5 mg de B12, para a formação das *beads* de alginato de cálcio com vitamina B12.

*Microscopia Eletrônica de varredura (MEV)*

A caracterização morfológica das *beads* foram realizadas por meio da microscopia eletrônica de varredura utilizando um microscópio eletrônico de varredura FEI Quanta 250.

*Teste de liberação*

O processo de liberação das *beads* foi monitorado por meio de espectrofotometria UV-Vis, realizando-se leituras em intervalos regulares de tempo, para ambas as amostras (AM e B12).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando as Figuras 1 (A-D) obtidas através da Microscopia de varredura eletrônica pode-se observar que o material exibe uma superfície predominantemente lisa e homogênea e isenta de porosidades de grandes dimensões ou imperfeições estruturais significativas. Essa textura uniforme indica uma boa coesão estrutural e regularidade na formação do material analisado.

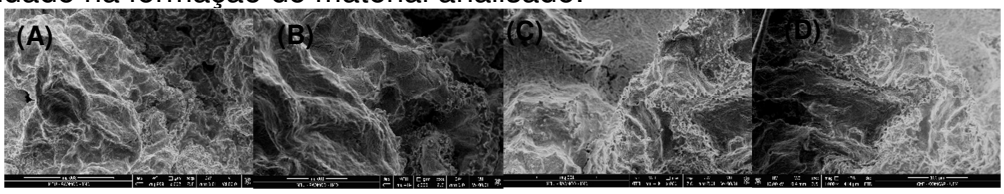



**Figura 1:** Microscopia Eletrônica de Varredura, sendo (A)Imagem da superfície com aumento 500x, (B)Textura superficial 1000x, (C) Porosidade 1000x e (D) Maior aproximação da textura 1000x.

*Teste de liberação*

As análises dos perfis cinéticos de liberação do AM e da vitamina B12 revelaram baixa dispersão nos dados experimentais, indicando alta reprodutibilidade do processo de síntese. Oscilações nos desvios padrão, como a variabilidade pontual observada aos 15 min para a B12, decorrem pelo processamento das *beads*, em que discretas variações de tamanho e diâmetro (polidispersão) alteram ligeiramente a relação área superficial/volume e o caminho difusivo dos compostos. Contudo, a acentuada monodispersão e a homogeneidade dimensional alcançadas garantiram a padronização das esferas, estabilizando as taxas de liberação e

proporcionando um comportamento previsível com mínimas oscilações. A Figura 2 ilustra as curvas de liberação para AM em (A) e para a Vitamina B12 em (B).

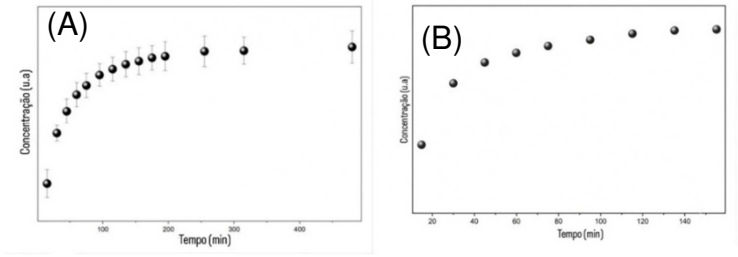



**Figura 2:** Gráficos de liberação: (A) AM e (B) B12.

*Modelos de liberação*

Os dados cinéticos do AM e da B12 apresentaram excelente ajuste aos modelos matemáticos testados, e coeficientes de determinação $R^2$> 0,94. Para o AM, o Modelo de Weibull e o de Relaxamento ($R^2$> 0,99) descreveram com precisão o perfil não linear do processo, caracterizado por uma etapa inicial de *burst release* até o platô de saturação. O parâmetro de forma, d < 0,75 indicou um mecanismo de difusão Fickiana em matrizes de geometria fractal. Para a B12, o Modelo de Relaxamento Polimérico apresentou maior precisão estatística ($R^2$ = 0,984), já o parâmetro d = 1,93 (d > 1) no Modelo de Weibull ($R^2$ = 0,946) caracterizou um perfil de liberação sigmoidal. Esses resultados revelaram que, para a B12, o transporte de massa é governado predominantemente pelo relaxamento das cadeias do polímero. As curvas para os modelos cinéticos encontram-se ilustradas na Figura 3. Sendo (A) para o AM e (B) para a B12.

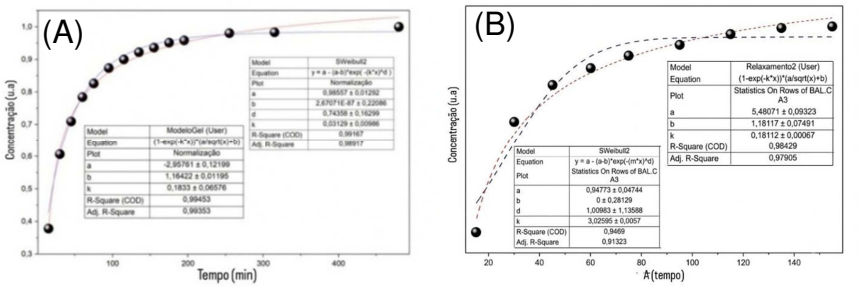



**Figura 3:** Modelos aplicados a liberação: (A) AM e (B) B12.

*Relaxamento e Difusão*

A análise dos mecanismos de transporte revelou um comportamento dinâmico semelhante para ambos os ativos, conforme ilustrado na Figura 4 (A) para o AM e Figura 4 (B) para a B12. A Difusão Fickiana (pontos pretos) atua no início, promovendo a dessorção rápida do composto presente nas regiões mais externas e superficiais do material. Contudo, à medida que o meio aquoso penetra no suporte e hidrata a matriz, a participação difusiva reduz progressivamente, dando lugar ao comportamento dinâmico do polímero. Assim, com o intumescimento, expansão e reorganização das cadeias ao longo do tempo, o mecanismo de Relaxamento

Macromolecular (pontos vermelhos) passa a predominar amplamente sobre a Difusão, governando a liberação contínua e sustentada.

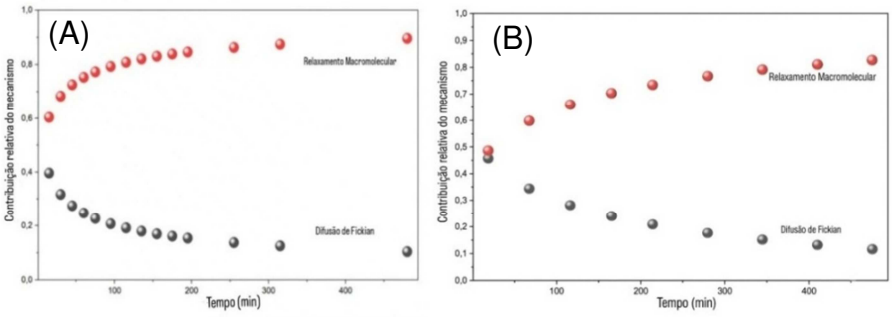



**Figura 4:** Relaxamento e Difusão: (A) AM e (B) B12.

## CONCLUSÕES

As *beads* de alginato de cálcio foram sintetizadas com sucesso, apresentando formato esférico, boa coesão e superfície homogênea. A liberação do azul de metileno e da B12 exibiu perfil sustentado e não linear, iniciado por um *burst release* seguido de estabilização. A modelagem cinética ($R^2 > 0,94$) revelou que o mecanismo varia conforme o ativo: difusão Fickiana em geometria fractal ($d < 0,75$) para o azul de metileno e perfil sigmoidal ($d = 1,93$) para a B12. Para ambos, o relaxamento macromolecular prevalece sobre a difusão simples, consolidando a matriz como um suporte promissor para a liberação modulada de compostos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação Araucária, CNPq, UEM, Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) e ao Grupo de Pesquisa Rinaldi ResearchGroup.

## REFERÊNCIAS

FERNANDES, M. L. G. ***Hidrogéis bionanocompósitos ativos à base de amido e alginato: aplicação potencial na agricultura e na biomedicina.*** *2020.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UNESP - Araraquara, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/213232.

MACHADO, V.D.; LIMA-TENÓRIO, M.K.; TENÓRIO-NETO, E.T. Understanding the Swelling Behavior of Polysaccharide-Based Hydrogels through a Kinetic Modeling. ***ACS Polymers***, v. 6, n. 1, p. 74–84, 2026.

SANTOS, T. G.; Araujo, G. T.; Lima, E. C. ***Revista Brasileira de Nanotecnologia****, v. 12,* n. 1, p. 45-58, 2021.