

Interface Material-Processo: Sistema de extrusão de fibras de alginato para aplicações têxteis orientadas à sustentabilidade

Material-Process Interface: Alginate fiber extrusion system for sustainability-oriented textile applications

Guilherme Freitas de Abreu, mestrando, UEMG

gfdabreu@gmail.com

Júlia Silveira Pereira Guimarães, doutoranda, UEMG

juliaguimaraes997@gmail.com

Raquel Pimenta Vieira, graduanda, UEMG

raquelpimentav@gmail.com

Pedro Paulo Vannucci Ferreira, fundamental, LOYOLA

pedrferreira192@gmail.com

Caroline Salvan Pagnan, doutora, UEMG

caroline.pagnan@uemg.br

Número da sessão temática da submissão – [03]

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de extrusão automatizado, construído a partir do reaproveitamento de componentes eletrônicos, para a produção de fibras de alginato com maior uniformidade. A metodologia seguiu um processo iterativo de concepção, com ajustes no controle de velocidade e na redução de ruído operacional, assegurando uma extrusão contínua e estável. O sistema foi integrado aos parâmetros reológicos do processamento da solução polimérica, utilizando concentrações otimizadas de alginato de sódio, glicerol e cloreto de cálcio, mitigando as instabilidades do processo convencional de fiação úmida. As análises de FTIR confirmaram a reticulação iônica da estrutura, enquanto os filamentos obtidos apresentaram morfologia homogênea, com baixa incidência de defeitos superficiais ou manchas, além do reduzido coeficiente de variação dimensional e resistência à tração. Os resultados evidenciam que a integração entre automação e controle de processamento garante a reprodutibilidade e a eficiência para o desenvolvimento de fibras de alginato para aplicações têxteis mais sustentáveis.

Palavras-chave: Biomateriais; Fibras de alginato; Sistema extrusão

Abstract

This study presents the development of an automated extrusion system, built from reused electronic components, for the production of alginate fibers with improved uniformity. The methodology followed an iterative design process, with adjustments in extrusion speed control and operational noise reduction, ensuring continuous and stable extrusion. The system was integrated with the rheological parameters of the polymer solution, using optimized concentrations of sodium alginate, glycerol, and calcium chloride, thereby mitigating instabilities associated with conventional wet-spinning processes. FTIR analyses confirmed ionic cross-linking of the polymeric structure, while the resulting filaments exhibited homogeneous morphology, low incidence of surface defects, reduced dimensional coefficient of variation, and improved tensile strength. The results demonstrate that integrating automation with process control ensures reproducibility and efficiency in alginate fiber development for more sustainable textile applications.

Keywords: Biomaterials; Alginate fibers; Extrusion system

1. Introdução

O alginato de sódio é um biopolímero natural extraído de algas marrons, composto por blocos de ácido β -D-manurônico (M) e ácido α -L-gulurônico (G) (Tordi *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2023). Devido às suas propriedades, como boa biocompatibilidade, biodegradabilidade e não toxicidade, este composto tem sido aplicado em setores médicos, alimentícios e têxteis (Bi *et al.*, 2025; Azam *et al.*, 2024; Ullah *et al.*, 2020). No contexto da indústria têxtil, o alginato apresenta potencial como matéria-prima de menor impacto ambiental, uma vez que o cultivo de algas marinhas oferece rendimentos elevados de biomassa sem a necessidade de água doce ou terras aráveis, mitigando os impactos ambientais associados às fibras convencionais (Silva *et al.*, 2023; Badruddin *et al.*, 2024).

Apesar de seu potencial, a transposição do alginato para aplicações em produtos enfrenta desafios no nível de implementação (Xie; Gao; Avérous, 2024), especialmente no que se refere à obtenção de fibras contínuas e homogêneas e à dificuldade de adaptação dos processos para escalas menores. Essas limitações restringem sua adoção por iniciativas independentes, evidenciando a necessidade de abordagens que promovam uma aplicação integrada mediada pelo Design, aliando viabilidade técnica para contextos reais de produção.

A produção de fibras de alginato é realizada em maior parte por meio da fiação úmida (Brzezińska; Szparaga, 2014; Xu *et al.*, 2024). Neste processo, a solução de alginato, previamente homogeneizada em água, é extrudada em um banho de coagulação contendo íons divalentes (Azam *et al.*, 2024; Xu; Liu; Yao, 2013). A formação da fibra ocorre por meio da troca iônica e difusão dupla: o solvente difunde-se para fora enquanto o agente precipitante difunde-se para o interior do fluxo polimérico (Bi *et al.*, 2025). O cloreto de cálcio (CaCl_2) é o agente de coagulação mais utilizado, onde os íons de cálcio (Ca^{2+}) interagem com os blocos G do alginato, criando uma estrutura reticulada conhecida como modelo "caixa de ovos" (Homem *et al.*, 2021; Han *et al.*, 2023).

Apesar da fundamentação teórica da literatura, o processamento é limitado por interações que frequentemente geram estruturas não homogêneas e baixas propriedades mecânicas (Li *et al.*, 2025). A concentração da solução, por exemplo, é um fator crítico: deve-se manter uma viscosidade específica, pois concentrações baixas comprometem a continuidade do fluxo, enquanto teores mais elevados podem interromper a extrusão (Brzezińska; Szparaga, 2014).

Além disso, a troca de compostos entre a solução e o agente coagulante pode causar um dessincronismo na separação de fases, resultando em irregularidades na seção transversal da fibra (Bi *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2023). Tal fenômeno é intensificado por concentrações elevadas do coagulante no banho, podendo promover reticulação superficial rápida, criando uma barreira que dificulta a difusão homogênea dos íons para o núcleo da fibra (Homem *et al.*, 2021).

Para superar essas limitações, a redução de variações morfológicas e estruturais da fibra torna-se um componente relevante. O ajuste do processo permite evitar fraturas no fluxo e minimizar oscilações no regime de cisalhamento. Isso envolve a padronização da

concentração de alginato em função de sua viscosidade, além do equilíbrio entre a proporção de plastificante, agente coagulante e a velocidade de extrusão (Badrudin *et al.*, 2024). O objetivo é manter a solução em um intervalo viscoso ideal e reduzir comportamentos não lineares que prejudicam a formação da fibra.

Além desses parâmetros, o controle mecânico do processo também é indispensável, uma vez que as soluções de alginato apresentam comportamento não newtoniano do tipo pseudoplástico, no qual a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (Brzezińska; Szparaga, 2014; Xu; Liu; Yao, 2013). Na ausência desse controle, tal comportamento pode resultar em variações no diâmetro das fibras e no desenvolvimento de morfologias irregulares. Nesse sentido, o emprego de sistemas automatizados, como bombas de seringa, configura-se como uma estratégia eficaz para manter a taxa de injeção constante e contribuir para a estabilização do processo de fiação.

O presente trabalho foca na resolução do problema da uniformidade das fibras por meio de uma abordagem integrada: o desenvolvimento de um sistema de extrusão automatizado, a partir do reaproveitamento de componentes eletrônicos, aliado à redução de variações da fibra sobre o processamento. Dessa forma, o objetivo é aliar o controle mecânico à estabilidade do gel, gerando fibras reproduzíveis com baixo desvio padrão e menores defeitos estruturais, assegurando uma melhor qualidade de processamento para futuras aplicações.

2. Procedimentos Metodológicos

2.1 Sistema de extrusão

O desenvolvimento da extrusora seguiu um percurso metodológico dividido em quatro etapas (Figura 1): [I] **Entendimento**; [II] **Investigação**; [III] **Adaptação**; e [IV] **Teste**.

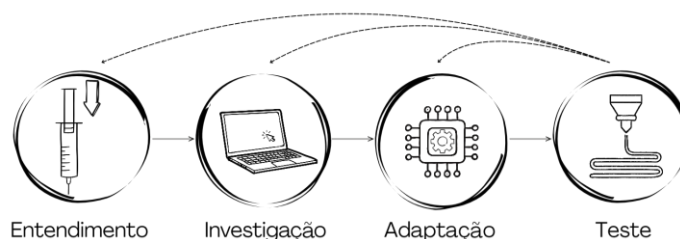


Figura 1: Desenho do caminho metodológico para desenvolvimento do sistema de extrusão do alginato.
Fonte: Os autores (2026)

Na fase de **Entendimento**, foram analisados os requisitos que o equipamento a ser desenvolvido deveria atender. Avaliou-se, de forma háptica, a força aproximada necessária para a extrusão da solução de alginato, bem como as direções mais adequadas de aplicação dessa força, visando à otimização do processo e à minimização do esforço manual.

Em seguida, na etapa de **Investigação**, foram analisados projetos e equipamentos com funções iguais ou semelhantes à da extrusora, sendo selecionado um projeto open source

para dar continuidade à etapa de **Adaptação**. Por fim, após as modificações necessárias para a extrusão de alginato, foram realizados testes com o modelo final.

2.2 Formulação e otimização reológica da solução

Foi estabelecido um protocolo de preparação da solução fundamentado no comportamento reológico do alginato, conforme descrito por Xu, Liu e Yao (2013), cujo estudo evidencia a influência das propriedades do alginato no processamento e no desempenho mecânico das fibras obtidas.

A solução polimérica foi preparada a partir de alginato de sódio proveniente de fornecedor comercial (198,11 g/mol) a 3,5% (p/v), utilizando água destilada como solvente. A concentração de alginato foi definida com base no estudo mencionado, o qual indica a viscosidade dinâmica aparente adequada para a fiação úmida, assegurando estabilidade do jato. A solução foi submetida à agitação mecânica por 10 minutos, até completa homogeneização do polímero e ausência de grânulos visíveis.

Glicerina bidestilada (92,10 g/mol) foi incorporada na concentração à 7,5% (p/v), dentro da faixa considerada ótima (5–10%), para promover resistência mecânica e flexibilidade, com baixa solubilidade e inchamento em água. Concentrações inferiores resultam em materiais frágeis, enquanto teores elevados podem causar separação de fases (Silva; Bierhalz; Kieckbusch, 2009). O plastificante foi adicionado após a hidratação do polímero, garantindo distribuição homogênea e reduzindo gradientes de viscosidade.

A reticulação iônica foi realizada em solução aquosa de cloreto de cálcio a 2% (p/v), concentração selecionada por assegurar a formação da rede iônica das fibras, evitando os efeitos de super-reticulação observados em concentrações mais elevadas (Liling *et al.*, 2016).

2.3 Extrusão das fibras de alginato

A taxa de extrusão foi calibrada com base na observação da estabilidade do jato extrudado, caracterizado por um fluxo contínuo, sem contrações e sem torção imediata, de modo a reduzir o risco de turbulência. Como resultado, estabeleceu-se uma vazão final de 2,9 mL/s. Após a extrusão, as fibras permaneceram por 5 minutos no banho de reticulação e, em seguida, foram lavadas com água destilada, a fim de remover os resíduos na superfície do material.

Na etapa subsequente, as fibras foram submetidas à tração durante o processo de secagem. A tração aplicada correspondeu a uma tensão, medida por um tensiômetro acoplado ao tracionador, aproximadamente de 1,4 MPa (considerando o diâmetro médio das fibras), promovendo o alinhamento das cadeias poliméricas sem induzir ruptura estrutural. A secagem foi realizada sob tensão por um período de 24 horas.

2.4 Análise morfológica e uniformidade dimensional

A uniformidade do diâmetro das fibras foi avaliada por microscopia óptica, por meio de

medições realizadas ao longo de diferentes segmentos dos filamentos, permitindo o cálculo do desvio padrão e a análise da variação dimensional. A microscopia eletrônica de varredura (MEV/SEM), utilizada no equipamento Hitachi TM4000, foi empregada para examinar a morfologia superficial e a seção transversal das fibras.

2.5 Análise química (FTIR)

A estrutura química das fibras foi investigada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando o equipamento Shimadzu IRAffinity-1S. Essa técnica permitiu identificar deslocamentos característicos nos picos de estiramento dos grupos carboxila, associados à coordenação entre íons Ca^{2+} e grupos carboxílicos do alginato.

2.6 Ensaios mecânicos de tração

As propriedades mecânicas das fibras foram determinadas por ensaios de tração, visando à obtenção dos valores consistentes entre as amostras de resistência à tração, módulo de Young e alongamento na ruptura. Os ensaios foram realizados utilizando a Máquina de Ensaio Universal EMIC DL-3000, com uma célula de carga de 50N e distância inicial entre garras de 10 mm, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D3822.

2.7 Tratamento dos dados experimentais

A análise dos dados foi realizada considerando a média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação, visando a avaliação da uniformidade dimensional e da reprodutibilidade do processo. A média aritmética ($\bar{x}$) e o desvio padrão (s) foram calculados conforme as Equações (1) e (2). O coeficiente de variação (CV) foi determinado conforme a Equação (3). Nos ensaios mecânicos, a tensão (T) foi determinada a partir da razão entre a força aplicada (F) e a área de seção transversal da fibra (A), conforme a Equação (4). O módulo de Young foi determinado a partir da inclinação da região linear da curva tensão-deformação, no regime elástico, sendo obtido por regressão linear dos dados experimentais, utilizando o software Origin.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$CV (\%) = \frac{\text{Desvio padrão}}{\text{Média}} \times 100 \quad (3)$$

$$T \text{ (MPa)} = \frac{F \text{ (N)}}{A \text{ (área)}} \quad (4)$$

3. Resultados e discussão

3.1 Sistema extrusão

Como resultado da etapa de entendimento (Etapa I), foram definidos os seguintes requisitos: minimização do uso de força manual no processo de extrusão da solução; obtenção de fibras mais regulares e homogêneas; fabricação do equipamento por impressão 3D por deposição de filamento fundido em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno); e reaproveitamento da maioria dos componentes não impressos, provenientes de impressoras 3D de filamento fundido inoperantes do centro de pesquisa.

Com base nesses requisitos, realizou-se uma pesquisa on-line em artigos acadêmicos no Google Acadêmico, projetos open source disponíveis no Thingiverse e materiais técnicos de fabricantes de bombas de seringa. Para adaptação, foi selecionado o projeto apresentado por Wijnen et al. (2014), por atender aos critérios estabelecidos e apresentar detalhamento técnico adequado para a execução de um equipamento open source.

A adaptação consistiu na remodelagem de componentes para integração de peças reaproveitadas de impressoras 3D, como hastes, motor NEMA 17 e rolamentos, além da adequação à seringa de 200ml utilizada na pesquisa. A modelagem tridimensional foi realizada no software SolidWorks (Figura 2).

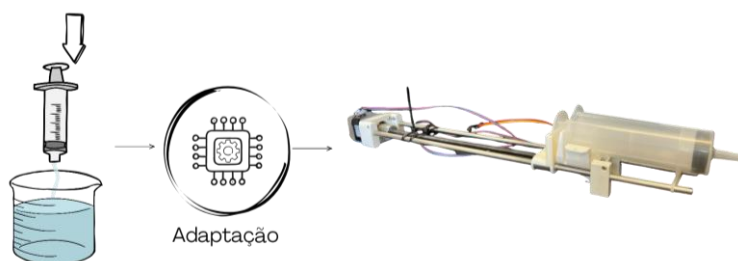


Figura 2: Ilustração da adaptação da extrusora desenvolvida para o projeto. Fonte: Os autores (2026)

Posteriormente, foram conduzidos os testes de montagem do modelo final impresso e o planejamento do sistema eletrônico. A programação foi desenvolvida no Arduino IDE, configurando o acionamento do motor nos dois sentidos: para a extrusão da solução, por meio da aplicação de força sobre o êmbolo da seringa, e para o recuo do êmbolo, permitindo o abastecimento com a solução de alginato.

As fibras obtidas por meio do sistema apresentaram boa homogeneidade. A manutenção de uma velocidade constante possibilitou a formação de estruturas mais retilíneas, com menor incidência de curvaturas ao longo do comprimento (Figura 3). Observa-se maior uniformidade morfológica das fibras produzidas no presente trabalho em comparação às obtidas manualmente em tentativas anteriores, realizadas apenas com o uso de seringa, como ilustrado na porção esquerda da Figura 3.

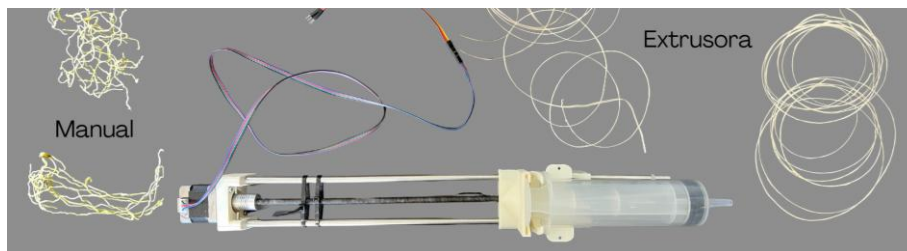


Figura 3: Ilustração da adaptação da extrusora e dos filamentos de alginato. Fonte: Os autores (2026)

Porém, durante a operação do sistema foram identificados aspectos passíveis de aprimoramento. Em função da força requerida para o acionamento do êmbolo pelo motor, observaram-se vibrações significativas, que chegaram a provocar o deslocamento do conjunto ao longo do processo. Além disso, em determinado momento do experimento, verificou-se o movimento das hastes na mesma direção da carga aplicada, o que indica baixa eficiência da fixação adotada, baseado no uso de parafusos em componentes impressos.

Com o objetivo de não comprometer o andamento do presente artigo, adotaram-se soluções provisórias, como a utilização de lacres para limitar a mobilidade das hastes e a aplicação de Etileno Vinil Acetato (E.V.A) na base do conjunto, contribuindo para a atenuação das vibrações geradas durante a extrusão.

3.2 Caracterização morfológica

A morfologia das fibras de alginato foi analisada a partir das amostras previamente secas. As imagens foram obtidas em ampliação de 40x e 150x, permitindo a observação da superfície e da seção transversal das fibras, conforme apresentado na Figura 4.

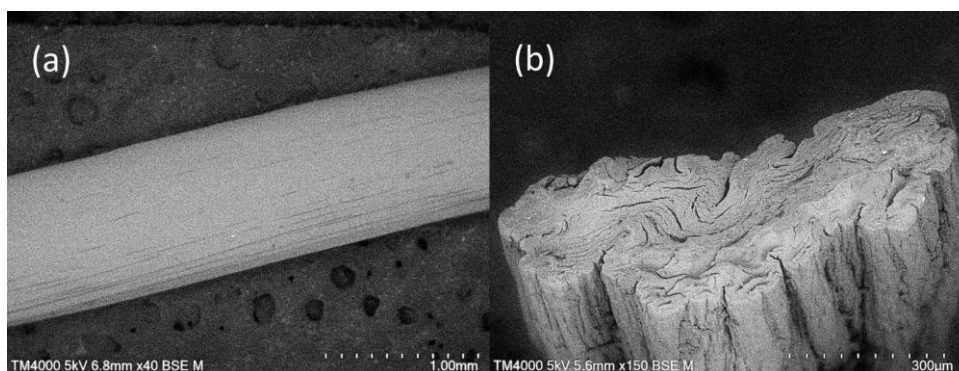


Figura 4: Imagens obtidas por MEV das fibras de alginato, apresentando a morfologia superficial e a seção transversal em diferentes ampliações: (a) 40x, (b) 150x. Fonte: Os autores (2026).

A análise por MEV (Figura 4a) demonstra que o sistema de extrusão automatizado cumpriu o objetivo de gerar fibras mais uniformes. A ausência de grandes deformações, manchas ou variações bruscas de diâmetro indica que o controle da taxa de injeção e a estabilidade da solução foram eficazes para mitigar as oscilações de cisalhamento comuns em processos manuais. As ranhuras observadas na superfície são inerentes ao processamento de biomateriais por fiação úmida, resultantes da contração do polímero

durante o contato no banho coagulante.

Na seção transversal (Figura 4b), a presença de uma estrutura interna preenchida confirma que a reticulação ocorreu no interior da fibra. Contudo, a observação de cavidades sugere que a reticulação não foi completamente homogênea. Como discutido por Bi *et al.* (2025), a rápida formação de uma camada externa reticulada em contato imediato com o CaCl_2 pode criar uma barreira superficial, dificultando a difusão dos íons para o núcleo. Apesar disso, a morfologia obtida distancia-se do modelo de "fibra casca", já que o interior apresenta grandes porções reticuladas, ainda que a conformação cilíndrica tenha sofrido alterações após o seccionamento.

3.3 Caracterização química

A caracterização química das fibras de alginato foi realizada por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). O espectro apresentado na Figura 5 indica uma absorção na região de 3255 cm^{-1} , atribuída às vibrações de estiramento dos grupos hidroxila ($-\text{OH}$), característicos de ligações de hidrogênio e cadeias polissacarídicas (Wang *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2023).

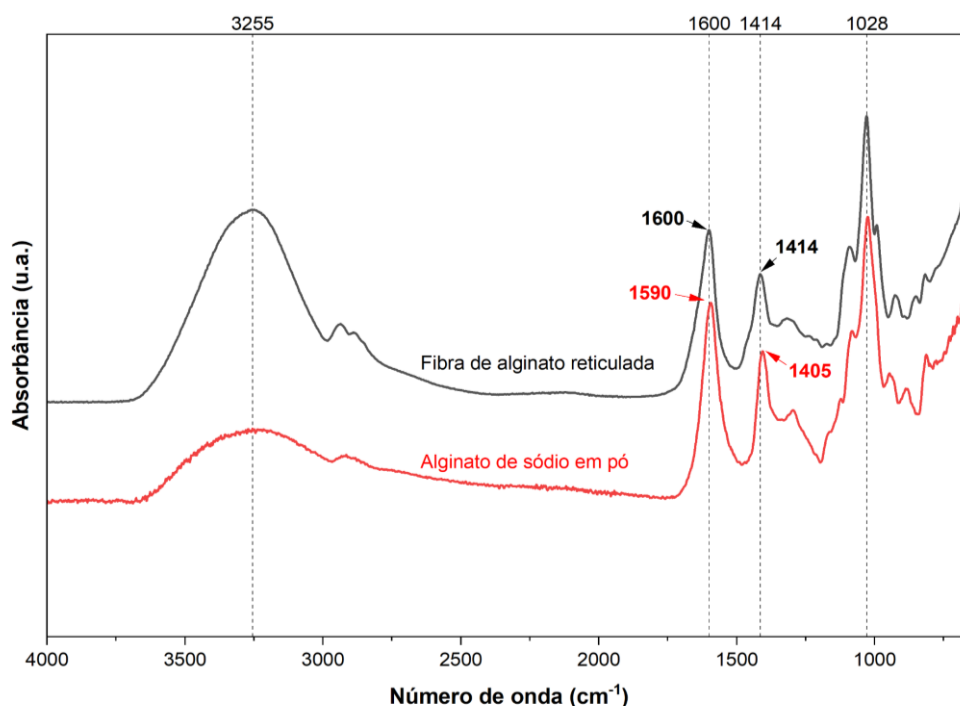


Figura 5: Espectro FTIR das fibras de alginato, com indicação das principais bandas associadas aos grupos funcionais do polímero. Fonte: Os autores (2026).

Na região de menores números de onda, identifica-se uma absorção em 1600 cm^{-1} , correspondente às vibrações assimétricas de estiramento dos grupos carboxilato ($-\text{COO}^-$), bem como uma absorção em 1414 cm^{-1} , atribuída às vibrações simétricas desses mesmos grupos funcionais. Adicionalmente, destaca-se uma absorção em 1028 cm^{-1} , associada às vibrações de estiramento das ligações C-O e C-O-C da estrutura polissacarídica (Wang *et al.*, 2024).

A eficácia da reticulação iônica foi demonstrada pelos deslocamentos químicos observados no FTIR (Figura 5). O deslocamento das bandas de estiramento carboxilato para números de onda maiores 1590 cm^{-1} para 1600 cm^{-1} e 1405 cm^{-1} para 1414 cm^{-1} é um indicativo do aumento da reticulação e, consequentemente, o aumento da rigidez da rede polimérica, conforme reportado por Urquiza, Pérez e Saldaña (2011). Esses incrementos ocorrem devido a formação da estrutura de reticulação, onde os íons de cálcio realizam ligações iônicas entre as unidades de ácido gulurônico.

Além das bandas de carboxilato, a região de 3255 (estiramento OH) reflete a dinâmica das ligações de hidrogênio, que são reorganizadas durante a substituição dos íons Na por Ca^{2+} . O pico em 1028 (C-O-C), embora estrutural, também é influenciado pela nova conformação espacial das cadeias de alginato, indicando que a reticulação não altera apenas a carga dos grupos funcionais, mas estabiliza a estrutura polissacarídica da fibra.

3.4 Avaliação dimensional das fibras

A avaliação dimensional das fibras de alginato foi realizada por meio da medição do diâmetro de cinco corpos de prova distintos, produzidos sob a mesma condição. Os valores individuais obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Diâmetro das fibras de alginato obtidas por fiação úmida.

Amostra	Diâmetro (mm)
F1	0,932
F2	0,921
F3	0,900
F4	0,975
F5	0,965

Fonte: Os autores (2026).

A média de diâmetro das fibras foi de $0,939\text{ mm}$, com desvio padrão de $0,031\text{ mm}$, resultando em um coeficiente de variação de $3,3\%$. A média, o desvio padrão e o coeficiente de variação foram calculados conforme as Equações (1), (2) e (3), respectivamente.

O desvio padrão de $0,031\text{ mm}$ no diâmetro e o coeficiente de variação de $3,3\%$ são reflexos diretos da melhora mecânica do sistema de extrusão automatizado e da formulação controlada das soluções. Na literatura, variações de diâmetro são frequentemente apontadas como causadoras de falhas prematuras, já que a fibra pode apresentar pontos de concentração de tensão, resultando em um comportamento mecânico mais previsível e reproduzível (Li *et al.*, 2025; Han *et al.*, 2023). Nesse caso, a uniformidade dimensional garante uma melhora nas propriedades mecânicas.

3.5 Propriedades mecânicas

As curvas de tensão em função da deformação permitiram a obtenção dos valores de tensão máxima, módulo de Young e alongamento na ruptura. A Tabela 2 apresenta os valores médios e os desvios-padrão desses parâmetros para o conjunto de amostras ensaiado.

Tabela 2: Resultados mecânicos das fibras de alginato obtidas por ensaio de tração.

Tensão máxima (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Alongamento na ruptura
15,45 σ 1,05	169,82 σ 11,33	15,7 σ 2,6

Fonte: Os autores (2026).

A partir dos resultados, foi obtida uma tensão máxima média de 15,45 MPa, com desvio padrão de 1,05 MPa e coeficiente de variação de 6,8%. A tensão foi determinada conforme a Equação (4). As curvas de tensão–deformação obtidas para os corpos de prova (CP) estão disponíveis na Figura 6.

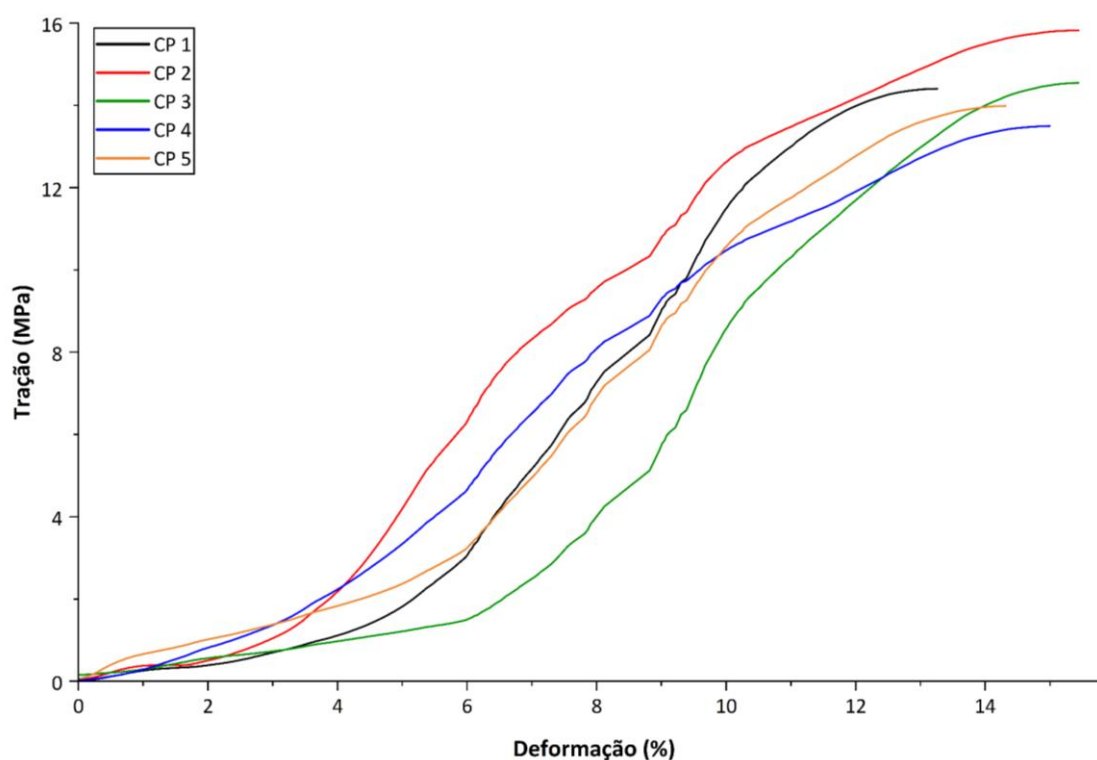


Figura 6: Curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio de tração das fibras de alginato. Fonte: Os autores (2026).

O módulo de Young apresentou valor médio de 169,82 MPa, com desvio padrão de 11,33 MPa e coeficiente de variação de 6,6%. O alongamento de ruptura apresentou média de 15,7% com desvio padrão de 2,6% e coeficiente de variação de 16,6%, correspondendo à deformação registrada no momento da falha da fibra.

Em termos de resistência, a tensão máxima média de 15,45 MPa, apresentada na Figura 6, situa as fibras produzidas de forma competitiva com a literatura de fibras de alginato puro. O baixo desvio padrão observado também nos ensaios de tração (1,05 MPa) reforça a consistência do processo de fiação.

O Módulo de Young (169,82 MPa σ 11,33 MPa) indica uma rigidez moderada, apesar do valor possuir potencial para ser superior. Diferente de outros trabalhos que utilizam concentrações de alginato mais elevadas, a fim de aumentar a rigidez, esta pesquisa empregou uma concentração de 3,5% priorizando a estabilidade do fluxo e a continuidade do jato.

A rigidez pode ser otimizada futuramente por meio da intensificação da reticulação iônica, ajustando-se a densidade do agente coagulante ou por maiores taxas de estiramento durante a secagem. Por fim, o alongamento de 15,7% com 2,6% de desvio padrão demonstra uma capacidade de deformação plástica satisfatória antes da falha, apesar do maior coeficiente de variação. No geral, essa combinação de propriedades valida a abordagem de automação e controle de processamento.

4. Conclusão

O desenvolvimento do sistema de extrusão e a integração do comportamento reológico do alginato para formular as soluções demonstraram ser estratégias eficazes para mitigar as limitações de uniformidade no processo de fiação úmida, cuja aplicação em produtos têxteis é dificultada pela sensibilidade do material às variações de processamento.

A abordagem da mediação projetual orientada pelo Design contribuiu para a produção de fibras com melhor qualidade estrutural e morfológica. Como perspectivas futuras, destaca-se a necessidade de aprimorar a estabilidade do sistema sem o uso de lacres ou suportes externos, explorando a própria estrutura da extrusora, bem como o avanço no desempenho mecânico do material, mantendo um baixo desvio padrão entre amostras e assegurando a reprodutibilidade do processo.

Referências

- AZAM, F. et al. Alginate-cotton blended aerogel fibers: synthesis, characterization, and oil/water separation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 21, p. 5065-5078, 2024.
- BADRUDDIN, I. J. et al. Modulating the Properties of Brown Alga Alginate-Based Fibers Using Natural Cross-Linkers for Sustainable Textile and Fashion Applications. *ACS Omega*, v. 9, p. 37002-37011, 2024.
- BI, X. et al. A novel in-situ crosslinking wet spinning method for promoting the strength of CNC/alginate fiber. *Polymer*, v. 325, 128313, 2025.
- BRZEZIŃSKA, M.; SZPARAGA, G. The effect of sodium alginate concentration on the rheological parameters of spinning solutions. *Autex Research Journal*, v. 14, n. 4, p.

281-290, 2014.

HAN, Z. et al. Superior Strong and Stiff Alginate Fibers by Entanglement-Enhanced Stretching. *Macromolecules*, v. 56, p. 6305-6315, 2023.

HOMEM, N. C. et al. Functionalization of Crosslinked Sodium Alginate/Gelatin Wet-Spun Porous Fibers with Nisin Z for the Inhibition of Staphylococcus aureus-Induced Infections. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 22, n. 2021.

LI, Z. et al. Alkali-soluble polyethylene terephthalate/calcium alginate composite fibers: better mechanical and dyeing properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 309, 143082, 2025.

LI, Z. et al. Oxidized sodium alginate cross-linked calcium alginate/antarctic krill protein composite fiber for improving strength and water resistance. *Colloids and Surfaces A*, v. 656, 130317, 2023.

LILING, G. et al. Effects of ionic crosslinking on physical and mechanical properties of alginate films. *Carbohydrate Polymers*, v. 136, p. 259–265, 2016.

SILVA, M. A.; BIERHALZ, A. C. K.; KIECKBUSCH, T. G. Alginate and pectin composite films crosslinked with calcium ions: Effect of the plasticizer concentration. *Carbohydrate Polymers*, v. 77, n. 4, p. 736–742, 2009.

SILVA, M. P. et al. Environmentally benign alginate extraction and fibres spinning from different European Brown algae species. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 226, p. 434-442, 2023.

TORDI, P. et al. Alginate crosslinking beyond calcium: Unlocking the potential of a range of divalent cations for fiber formation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 306, 141196, 2025.

ULLAH, A. et al. An Experimental Study on Modelling the Physical Properties of Composite Psyllium, Alginate and Chitosan Fibers Using Box-Behnken Technique. *Fibers and Polymers*, v. 21, n. 11, p. 2494-2504, 2020.

URQUIZA, T K. V; PÉREZ, O. P; SALDAÑA, M. G. Effect of the cross-linking with calcium ions on the structural and thermo-mechanical properties of alginate films. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, v. 1355, 2011.

WANG, T. et al. Preparation of high-strength photochromic alginate fibers based on the study of flame-retardant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 258, 128889, 2024.

WIJNEN, B. et al. *Open-Source Syringe Pump Library*. *PLoS ONE*, v. 9, n. 9, p. e107216, 17 set. 2014.

XIE, F; GAO, C; AVÉROUS, L. Alginate-based materials: enhancing properties through multiphase formulation design and processing innovation. *Materials Science and Engineering R: Reports*, v. 159, 2024, art. 100799.

XU, G. K.; LIU, L.; YAO, J. M. Fabrication and Characterization of Alginate Fibers by Wet-Spinning. *Advanced Materials Research*, v. 796, p. 87-91, 2013.

XU, J. et al. In Situ Modification of Alginate Fibers by Nano-montmorillonite for Enhancing the Mechanical Properties. *Fibers and Polymers*, v. 25, p. 3791–3801, 2024.