XXIX SEPE Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão
Teaching, Research and Extension Symposium
Presente e futuro: uso consciente da Inteligência Artificial
Today and tomorrow: the conscious use of Artificial Intelligence
E-book
ISBN 978-65-5852-415-1
20 A 22 DE OUTUBRO DE 2025
OCTOBER 20th to 22nd, 2025
UFN Universidade Franciscana Franciscan University

DOI: https://doi.org/10.48195/sepe2025.29661

NANOCOMPÓSITO POLIMÉRICO DE POLICAPROLACTONA COM NANOPARTÍCULAS VERDES DE COBALTO PARA POTENCIAL APLICAÇÃO EM EMBALAGENS ATIVAS

Eduarda Castilho da Silveira[1]*, Lailla Daianna Soltau Missio Pinheiro[2], Daniel Moro Druzian[3], Yolice Patricia Moreno Ruiz[4], Giovani Pavoski[5], Denise Crocce Romano Espinosa[5], Maria Amélia Zazycki[6], William Leonardo da Silva[7]

RESUMO

A policaprolactona (PCL) é um polímero biodegradável com potencial para aplicação em embalagens ativas, minimizando impactos ambientais relacionados ao uso excessivo de polímeros sintéticos. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar filmes nanocompósitos à base de PCL com nanopartículas verdes de óxido de cobalto (Co_3O_4-NPs) (5 e 10% em massa), nomeadas PCL@5%Co_3O_4-NPs e PCL@10%Co_3O_4-NPs, obtidos pelo método de eletrofiação, bem como avaliar a fitotoxicidade em sementes de alface (*Lactuca sativa*) e couve (*Brassica oleracea*). Os filmes foram caracterizados pelas técnicas de difração de raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura - Fonte de Emissão de Campo (MEV-FEG) com Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), ângulo de contato e propriedades mecânicas (tensão-deformação). Os difratogramas de DRX confirmaram uma estrutura semicristalina, enquanto as micrografias de MEV-FEG indicaram uma morfologia heterogênea, onde o PCL apresentou fibras uniformes, enquanto os filmes nanocompósitos mostraram maior compactação e aglomeração, principalmente para o filme com maior concentração de Co_3O_4-NPs. Os ensaios de ângulo de contato revelaram um caráter hidrofóbico, com $\theta > 90^o$. Nos testes mecânicos, o PCL apresentou baixa resistência ($\sigma_{máx}$ = 48,6 kPa e E = 3,5 MPa), enquanto a adição de 5%Co_3O_4-NPs resultou em um aumento expressivo da resistência máxima (89,6 kPa) e do módulo elástico (5,1 MPa), além de elevar a deformação na ruptura (10,9%). Para os ensaios de toxicidade em sementes de alface e couve, PCL não apresentou fitotoxicidade, enquanto os filmes nanocompósitos reduziram o crescimento radicular de alface (*Lactuca sativa*) e couve (*Brassica oleracea*) de forma dependente da concentração, sendo o efeito mais acentuado para 10%Co_3O_4-NPs. Por conseguinte, o filme nanocompósito PCL@5%Co_3O_4-NPs apresentou propriedades otimizadas, configurando-se como material promissor para embalagens ativas biodegradáveis e multifuncionais.

[1]Bolsista de Iniciação Científica - PROBITI FAPERGS, Universidade Franciscana, Curso de Engenharia Química, Santa Maria-RS, Brasil. E-mail: eduarda.castilho@ufn.edu.br, ORCID: 0009-0007-6815-0792

[2]Pesquisadora colaboradora, Dra. Lailla Daianna Soltau Missio Pinheiro, Doutora, Universidade Franciscana, Programa de Pós-Graduação em Nanociências, Santa Maria-RS, Brasil. E-mail: lailladpinheiro@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7785-2859

[3]MSc. Daniel Moro Druzian, Doutorando, Universidade Franciscana, Programa de Pós-Graduação em Nanociências, Santa Maria-RS, Brasil. E-mail: daniel.druzian@ufn.edu.br, ORCID: 0009-0005-0198-1482

[4]Pesquisadora colaboradora, Dra. Yolice Patricia Moreno Ruiz, Doutora, Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), Recife - PE, Brasil. E-mail: ypmoreno@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1976-003X

[5]Giovani Pavoski, Denise Crocce Romano Espinosa, Doutores, Universidade de São Paulo, Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Extração, São Paulo-SP, Brasil. E-mail: giovanipavoski@gmail.com; espinosa@usp.br; ORCID: 0000-0002-2610-6669; 0000-0003-2359-9485

[6]Professora. Dra. Maria Amélia Zazycki, Doutora, Universidade Franciscana, Engenharia Química, Santa Maria-RS, Brasil. E-mail: zazycki@ufn.edu.br, ORCID: 0009-0008-8638-3124

[7]Professor. Dr. William Leonardo da Silva, Doutor, Universidade Franciscana, Programa de Pós-Graduação em Nanociências, Santa Maria-RS, Brasil. E-mail: w.silva@ufn.edu.br, ORCID: 0000-0002-7804-9678

Palavras-chave: Biopolímeros, Nanobiofilmes, Nanobiotecnologia, Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A alta demanda por polímeros sintéticos em setores como embalagens tem impulsionado o consumo de recursos não renováveis, aumentado os impactos ambientais relacionado ao acúmulo de polímeros (Cai *et al.*, 2024). Normalmente, as embalagens plásticas utilizadas em alimentos contribuem significativamente para a poluição ambiental, devido à sua lenta degradação e acúmulo em ecossistemas aquáticos e terrestres (Fabbri, 2001). Nesse contexto, surge a necessidade de alternativas sustentáveis relacionando a tecnologia, biodegradabilidade e um menor impacto ambiental.

A poliε-caprolactona (PCL) é um polímero que se destaca por ser capaz de se decompor em até quatro anos, apresentando propriedades mecânicas vantajosas, como a flexibilidade e resistência ao impacto, sendo uma alternativa promissora para o desenvolvimento de embalagens inteligentes (Felemban, 2025). Já a nanotecnologia, surge como uma crescente alternativa para manipular a escala atômica de um material, trabalhando com estruturas de 1 a 100 nanômetros (1 nm = 10^{-9} m), o que permite um design de nanomateriais eficiente para melhorar as propriedades de barreira, resistência e funcionalidades específicas.

Nesse contexto, a síntese verde de nanopartículas metálicas surge como uma alternativa promissora, sendo um método que utiliza recursos naturais, como extratos vegetais em substituição a reagentes químicos tóxicos, proporcionando rotas de produção mais limpas e seguras (Osman *et al.*, 2024). Em particular, o extrato de *Ginkgo biloba* apresenta potencial redutor e antioxidante, favorecendo a síntese de nanopartículas de tetróxido de tricobalto (Co_3O_4) de forma ecológica, conferindo estabilidade, biocompatibilidade e propriedades antimicrobianas ao nanomaterial (Sati *et al.*, 2019).

A incorporação das nanopartículas de Co_3O_4 em matrizes de PCL, especialmente via eletrofiação, possibilita a produção de nanofilmes compostos por nanofibras com alta área superficial e potencial aplicação em embalagens ativas e inteligentes. Esses sistemas não apenas aumentam a preservação e segurança alimentar, como oferecem respostas funcionais, como a liberação controlada de agentes antimicrobianos e a detecção de variações ambientais (Zielińska *et al.*, 2020).

Neste contexto, nanocompósitos à base de PCL com nanopartículas metálicas verdes, como nanoreforços, representam uma estratégia promissora para substituir plásticos convencionais em embalagens, unindo sustentabilidade, nanotecnologia e inovação. Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e caracterizar um nanocompósito polimérico biodegradável (PCL@Co_3O_4-NPs), com potencial aplicação em embalagens inteligentes e ativas, contribuindo para a redução do impacto ambiental e para a preservação da qualidade e segurança dos alimentos.

METODOLOGIA

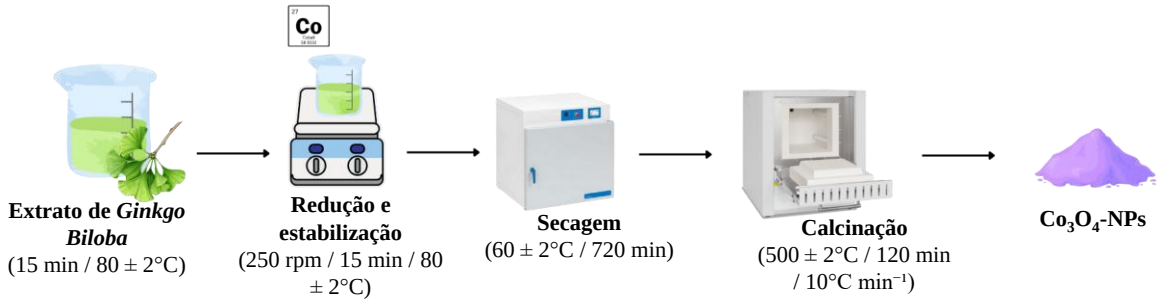
SÍNTESE DAS NANOPARTÍCULAS VERDES DE TETRÓXIDO DE TRICOBALTO

Incialmente, foi preparado o extrato de *Ginkgo biloba* pelo método de infusão (Gao *et al.*, 2019). Assim, 10 gramas de folhas secas foram adicionadas em 100 mL de água destilada, mantendo-se sob agitação magnética (250 rpm / 15 minutos) à 80 ± 2°C. Em seguida, a solução foi filtrada (ϕ = 110 mm) e armazenada em frasco âmbar, sob refrigeração.

Para a síntese das Co_3O_4-NPs foi utilizado o método de síntese verde a partir do extrato de *Ginkgo biloba* (Wouters *et al.*, 2025). Assim, 50 mL do extrato vegetal foram adicionados com 50 mL da solução precursora de cloreto de cobalto hexahidratado ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$, 1 mol L^{-1}, ACS, 98%, Sigma-Aldrich®), sob agitação magnética (250 rpm / 15 minutos) à 80 ± 2°C, promovendo as etapas de redução e crescimento. Após, o precipitado foi seco (60 ± 2°C por 720 minutos) e calcinado (500 ± 2ºC por 120 minutos sob 10 °C min^{-1}), promovendo a etapa

de estabilização das nanopartículas. A Figura 1 representa um esquema sobre o processo de síntese verde das Co_3O_4-NPs a partir do extrato de *Ginkgo biloba*.

Figura 1 – Representação esquemática da biossíntese das Co_3O_4-NPs a partir do extrato de *Ginkgo biloba*.



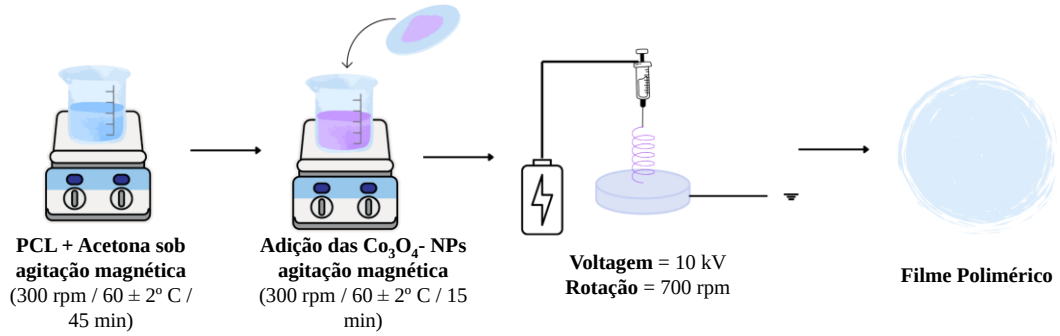
Fonte: Construção da autora (2025).

SÍNTESE DOS FILMES NANOCOMPÓSITOS

Os filmes nanocompósitos foram preparados a partir do PCL (como matriz polimérica) e Co_3O_4-NPs em 5 e 10% em massa (como nanoreforço), por meio do método de eletrofiação (*electrospinning*) (Mohandesnezhad *et al.*, 2020).

Inicialmente, PCL foi dissolvido em 10 mL de acetona (95,5%, Sigma-Aldrich®), sob agitação magnética (300 rpm / 40 minutos) à 60 ± 2°C, a fim de obter uma solução homogênea. Após, Co_3O_4-NPs foram incorporadas à matriz por incorporação direta na solução antes da eletrofiação, em 5% e 10% (em massa), sob agitação magnética (300 rpm / 15 minutos / 60 ± 2°C). Em seguida, a mistura foi transferida para uma seringa acoplada ao sistema de eletrofiação (10 kV e 700 rpm), proporcionando a formação dos filmes nanocompósitos, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Representação do processo de eletrofiação para o desenvolvimentos dos filmes nanocompósitos à base de PCL e Co_3O_4-NPs verdes.



Fonte: Construção da autora (2025).

A nomenclatura adotada para os filmes seguiu a forma de processamento e concentração de nanopartículas: PCL para o filme sem as nanopartículas; PCL@5%Co_3O_4-NPs e PCL@10%Co_3O_4-NPs para os filmes nanocompósitos obtidos por eletrofiação contendo 5% e 10% em massa, como nanoreforços.

CARACTERIZAÇÃO DO PCL@Co_3O_4-NPs

As amostras de PCL, Co_3O_4-NPs e PCL@Co_3O_4-NPs foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), em um difratômetro modelo D2 Phaser ($\lambda_{Cu\text{-}\alpha}$ = 0,15406 nm), com uma variação angular (2θ) de 5° a 70°, a fim de avaliar a cristalinidade. A morfologia e a composição elementar foram determinadas por meio do MEV-FEG com EDS em um microscópio eletrônico de varredura, modelo MIRA3 da TESCAN, acoplado ao equipamento de Espectroscopia de

raios X por Dispersão de Energia (EDS) da OXFORD. O ângulo de contato foi analisado por uma câmera DermaZoom (1920×1080) e analisados pelo software DigiCapturePro. As medições foram feitas em triplicata, com erro máximo de 0,5° (Mukaila *et al.*, 2024). Para as propriedades mecânicas, aplicou-se ensaios de tração e deformação em 1 mm min^{-1} em corpos de prova de 50 × 20 × 1 mm (comprimento × largura × espessura), utilizando máquina universal EMIC DL 10000 com célula de carga de 5 KN (Guimarães *et al.*, 2023).

ENSAIOS DE FITOTOXICIDADE

Os ensaios de fitotoxicidade foram realizados com sementes de alface (*Lactuva sativa*) e couve (*Brassica oleracea*), conforme a literatura (Falanga *et al.*, 2020). Assim, 15 sementes foram cultivadas em placas de Petri com os filmes nanocompósito, sob condições controladas, com umidade de 70% e 25 ± 2 ºC, após 10 dias, sendo o crescimento radicular a variável mensurada, com um paquímetro digital (Absolute Digimatic®).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

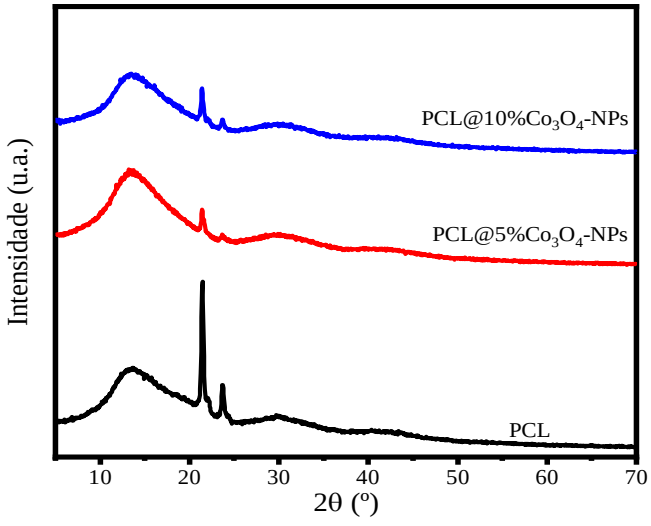
Os dados obtidos foram inicialmente organizados em planilha do Microsoft Excel (versão 2010) e posteriormente convertidos em percentuais relativos ao controle negativo. Para a verificação de diferenças significativas entre os grupos experimentais, empregou-se análise de variância unidirecional (ANOVA), seguida do teste post hoc de Tukey, utilizando o software GraphPad Prism 7®. Valores de $p < 0,05$ foram considerados estatisticamente significativos ($p < 0,05$; $*p < 0,01$; $**p < 0,001$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CARACTERIZAÇÃO DOS NANOFILMES POLIMÉRICOS

A Figura 3 mostra os difratogramas de DRX de todas as amostras, indicando uma estrutura semicristalina, com picos cristalinos do PCL (JPCCDS nº 00-048-1992) em 21° (110) e 24° (200), com tamanho médio do cristalito foi de 31,43 ± 2,48 nm (PCL), 34,75 ± 7,15 nm (PCL@5%Co3O4-NPs), 37,65 ± 4,25 nm (PCL@10%Co3O4-NPs). A presença desses picos confirma que o PCL mantém sua estrutura semicristalina, mesmo após a incorporação das Co_3O_4-NPs (Guesmi *et al.*, 2025). A análise dos difratogramas demostra o impacto das nanopartículas na matriz polimérica, mostrando que a intensidade dos picos de PCL diminuem quando a concentração das nanopartículas aumenta, sugerindo que a adição de Co_3O_4-NPs influenciou a intensidade dos picos da matriz polimérica (Alwadai, 2025).

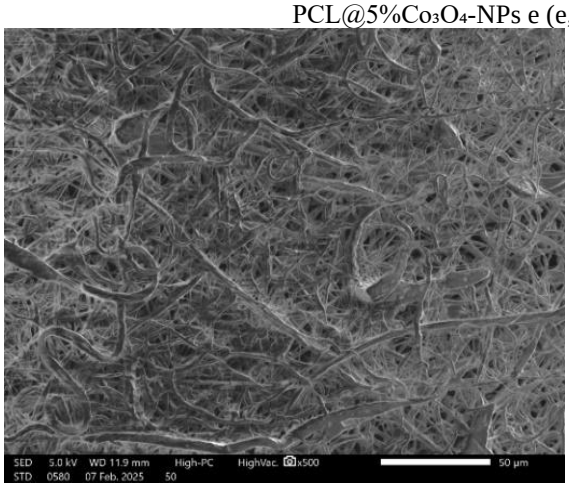
Figura 3 - Difratogramas de DRX do PCL, PCL@5%Co_3O_4-NPs e PCL@10%Co_3O_4-NPs.



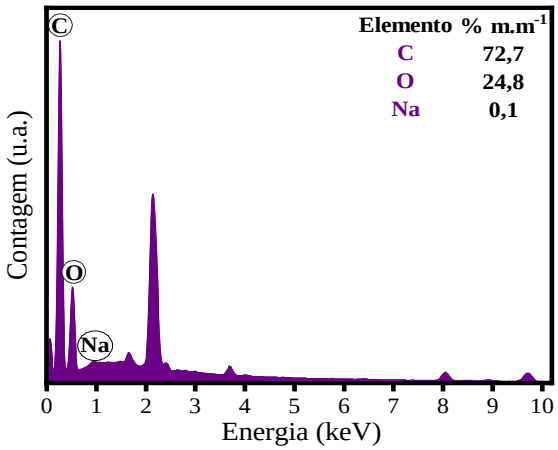
Fonte: Construção da autora (2025).

A Figura 4 apresenta as micrografias de alta resolução e composição elementar por EDS, onde PCL apresentou uma morfologia heterogênea com fibras uniformes e bem distribuídas (Figura 4a) e uma composição predominantemente constituídas por C (72,2%) e O (24,8%) (Figura 4b). A adição de 5% de Co_3O_4-NPs (em massa) promoveu maior compactação da rede fibrosa (Figura 4c), com uma composição elementar de C (75,9%), O (21%), Cl (1,4%), Co (1,2%) e Ca (0,5%) (Figura 4d), evidenciando a incorporação das nanopartículas verdes. No filme com 10% de Co_3O_4-NPs, verificou-se a intensa aglomeração das fibras com forte compactação (Figura 4e), com uma composição elementar com elevados teores de Co (22,63%) e Cl (24,85%), indicando a efetividade do processo de eletrofiação. De forma geral, os resultados demonstram que a incorporação de Co_3O_4-NPs alterou significativamente a morfologia das fibras poliméricas, promovendo maior compactação e aglomeração, em concordância com os relatos da literatura (Al-Mhyawi *et al.*, 2025).

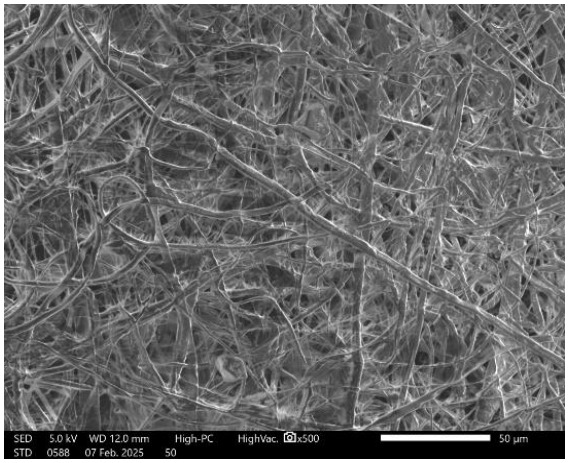
Figura 4 – Micrografias eletrônica de alta resolução e resultados de EDS para o (a,b) PCL, (c,d) PCL@5%Co_3O_4-NPs e (e,f) PCL@5%Co_3O_4-NPs.



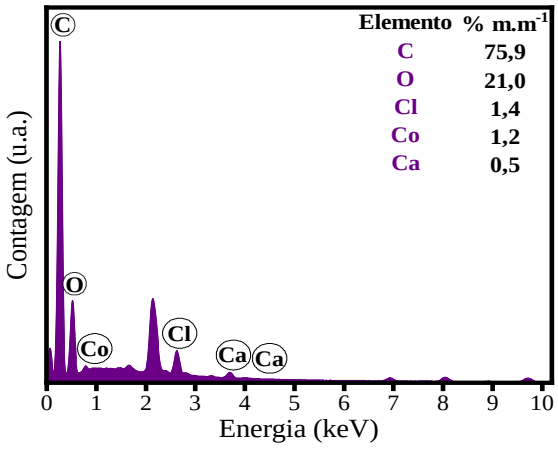
(a)



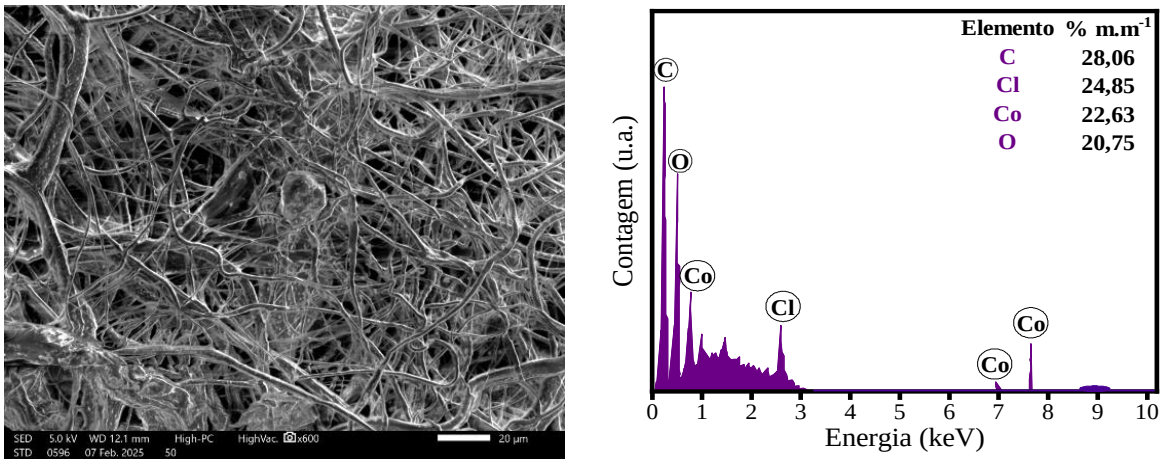
(b)



(c)



(d)



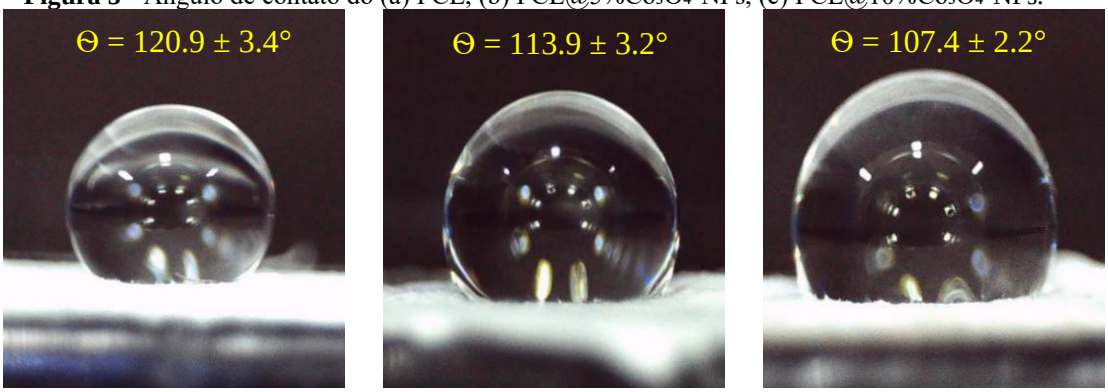
(e) (f)

Fonte: Construção da autora (2025).

A Figura 5 apresenta os valores de ângulo de contato obtidos para os filmes nanocompósitos, onde o filme de PCL puro apresentou um ângulo de 120,9° ± 3,4°, caracterizando-o como altamente hidrofóbico, propriedade intrínseca da policaprolactona, devido à sua natureza semicristalina e baixa polaridade superficial (Shaltooki; Dini; Mehdikhani, 2019). Com a incorporação de 5% de Co_3O_4-NPs, observou-se uma redução no ângulo de contato para 113,9° ± 3,2°, indicando uma pequena diminuição da hidrofobicidade, possivelmente associado à presença de grupos funcionais superficiais das nanopartículas, aumentando a interação do filme com a fase aquosa. O filme 10% de Co_3O_4-NPs apresentou o menor ângulo de contato (107,4° ± 2,2°), sugerindo que o aumento da concentração das nanopartículas intensificou a modificação da energia superficial do material, favorecendo maior afinidade com a água (Domyati, 2023).

Apesar da redução gradual dos ângulos de contato com o aumento da carga de Co_3O_4-NPs, todos os valores permaneceram acima de 90°, confirmando que os nanocompósitos mantêm caráter hidrofóbico. Essa característica é fundamental para aplicação em embalagens ativas, uma vez que a hidrofobicidade contribui para limitar a absorção de umidade, preservando a integridade estrutural do material e aumentando a barreira contra penetração de líquidos (Emel'yanov *et al.*, 2023). Além disso, a presença das Co_3O_4-NPs pode conferir funcionalidades adicionais, como atividade antimicrobiana e capacidade de interação com espécies reativas, ampliando o potencial de uso desses filmes na conservação de alimentos e em sistemas de embalagem inteligente.

Figura 5 - Ângulo de contato do (a) PCL, (b) PCL@5%Co_3O_4-NPs, (c) PCL@10%Co_3O_4-NPs.



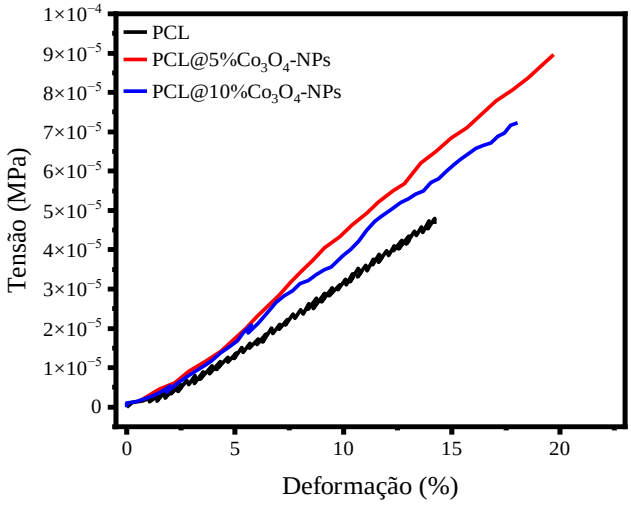
(a) (b) (c)

Fonte: Construção da autora (2025).

A Figura 6 apresenta as curvas de tensão-deformação do PCL puro e dos filmes nanocompósitos PCL@Co_3O_4-NPs, onde observou-se que todos os filmes apresentam comportamento típico de polímeros dúcteis, com uma região inicial de deformação elástica, seguida de escoamento plástico progressivo até a ruptura (Díaz; Aresti; León, 2021). O filme de PCL puro apresentou maiores valores de tensão ao longo da deformação, evidenciando maior resistência mecânica em comparação aos filmes nanocompósitos. Enquanto os filmes nanocompósitos apresentaram em uma pequena redução da resistência, como indicado pela curva deslocada para valores inferiores de tensão, em virtude da aglomeração parcial das Co_3O_4-NPs sob a matriz de PCL, gerando pontos de descontinuidade e atuar como iniciadores de falha mecânica (Zia *et al.*, 2025).

Por outro lado, a presença das nanopartículas influenciou positivamente na deformabilidade do material, sugerindo maior capacidade de acomodação das tensões internas, em virtude da interação entre as cadeias poliméricas de PCL e as Co_3O_4-NPs, alterando a mobilidade molecular e a dissipação de energia durante o processo de deformação. Do ponto de vista de aplicação em embalagens ativas, esses resultados são relevantes, pois mesmo com a pequena redução da resistência, os filmes nanocompósitos mantêm propriedades mecânicas adequadas para processabilidade e uso prático. Além disso, a modificação estrutural proporcionada pela adição de Co_3O_4-NPs, somada às suas funcionais, amplia o potencial desses nanocompósitos como alternativas sustentáveis e multifuncionais para a conservação de alimentos (Jayalakshmi *et al.*, 2024).

Figura 6 – Curvas tensão-deformação do PCL, PCL@5%Co3O4-NPs, PCL@10%Co3O4-NPs.



Fonte: Construção da autora (2025).

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas determinadas a partir da curva verdadeira de tração para o PCL e os filmes nanocompósitos contendo 5% e 10% de Co_3O_4-NPs.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas obtidas a partir da curva verdadeira de tração para o PCL, PCL@5%Co_3O_4-NPs e PCL@10%Co_3O_4-NPs.

Amostras	σ_{max} **(kPa)**	**ε (a.u.)**	Δ_L **(%)**	**E (MPa)**	σf_u **(MPa)**	Urt **(J m^{-3})**	Utt **(J m^{-3})**
PCL	48,6	0,12	7,6	3,5	0,0004	3,1	3,6
PCL@5%Co_3O_4-NPs	89,6	0,20	10,9	5,1	0,0007	15,5	1,1
PCL@10%Co_3O_4-NPs	72,2	0,18	9,9	5,3	0,0006	13,9	6,7

Fonte: Construção da autora (2025).

Conforme a Tabela 1, observou-se que a adição das Co_3O_4-NPs promoveu alterações significativas no comportamento mecânico do polímero, evidenciando o efeito de reforço e a influência da concentração de carga na matriz polimérica. O PCL puro exibiu uma tensão máxima relativamente baixa (48,6 kPa) e módulo elástico de 3,5 MPa, associados a um alongamento limitado (7,6%), características típicas de um polímero de natureza dúctil, porém com baixa resistência. A adição de 5%Co_3O_4-NPs promoveu um aumento expressivo da resistência máxima (89,6 kPa) e do módulo elástico (5,1 MPa), além de elevar a deformação na ruptura (10,9%), sugerindo uma boa interação entre as Co_3O_4-NPs e o PCL, favorecendo a transferência de esforços mecânicos e melhorando simultaneamente rigidez e ductilidade. Por outro lado, a adição de 10%Co_3O_4-NPs na matriz polimérica apresentou desempenho intermediário, com uma tensão máxima (72,2 kPa), superior à do PCL puro e inferior do PCL@5%Co_3O_4-NPs, o que pode estar relacionado à formação de aglomerados em concentrações mais elevadas de nanopartículas, comprometendo a eficiência do reforço. Além disso, apresentou módulo de elasticidade elevado (5,3 MPa) e a deformação na ruptura (9,9%), confirmando que quanto mais aglomeradas as partículas ficam menor é o efeito de reforço na estrutura do material (Sousa *et al.*, 2020).

O PCL puro apresentou valores característicos de energia de ruptura (3,1 J m^{-3}) e tenacidade (3,6 J m^{-3}), enquanto a adição de 5%Co_3O_4-NPs promoveu um aumento expressivo da energia de ruptura (15,5 J m^{-3}), indicando maior capacidade de dissipação de energia antes da fratura. No entanto, a amostra com 10% Co_3O_4-NPs apresentou redução desse parâmetro, embora tenha exibido o maior valor de tenacidade (6,7 J m^{-3}), sugerindo um comportamento mais resistente à propagação de trincas. Dessa forma, os resultados indicam que a adição do Co_3O_4-NPs pode ser utilizada como estratégia eficaz para a modulação das propriedades mecânicas do PCL. A concentração de 5%Co_3O_4-NPs apresentou desempenho otimizado, conciliando aumento de resistência, ductilidade e capacidade de absorção de energia, características relevantes para aplicações em embalagens ativas (García *et al.*, 2024).

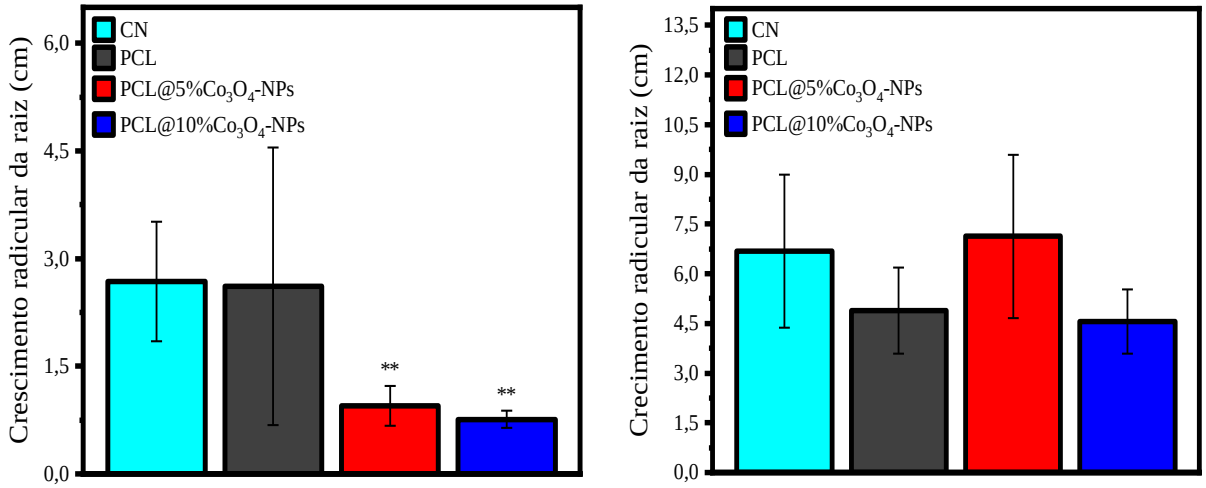
ENSAIOS DE FITOTOXICIDADE

A Figura 7 apresenta os resultados dos ensaios de fitotoxicidade avaliando o crescimento radicular em sementes de *Lactuca sativa* (alface) e *Brassica oleracea* (couve) em contato com os filmes nancompósitos. Para as sementes de alface (Figura 7a), o controle negativo (CN) apresentou comprimento radicular médio de 2,68 ± 0,84 cm, enquanto o grupo contendo PCL mostrou valor semelhante 2,61 ± 1,93 cm, sem diferenças estatisticamente significativas entre si ($p > 0,05$). Esses resultados confirmam que a matriz polimérica isolada não apresentou efeito fitotóxico. Por outro lado, o PCL@5%-Co_3O_4 apresentou comprimento médio de 0,95 ± 0,28 cm, representando uma diminuição estatisticamente significativa em comparação ao grupo controle negativo ($p < 0,05$). Esse efeito na amostra contendo PCL@10%-Co_3O_4 apresentou apenas 0,76 ± 0,12 cm, ambos diferindo estatisticamente do controle negativo e do PCL puro ($p < 0,05$), valor significativamente inferior em relação ao PCL puro e ao filme nanocompósito com 5% ($p < 0,01$). A análise estatística evidenciou que a fitotoxicidade foi dependente da concentração das nanopartículas incorporadas, indicando relação direta entre o teor de Co_3O_4-NPs e a inibição no crescimento radicular das sementes. Embora essa propriedade represente uma limitação em termos de impacto ambiental, pode ser considerada estratégica para a aplicação em embalagens ativas, uma vez que sugere potencial ação antimicrobiana e de barreira contra agentes biológicos (Wang *et al.*, 2024).

A Figura 7(b) apresenta os resultados do crescimento radicular em sementes de *Brassica oleracea* (couve) expostas aos diferentes filmes poliméricos. O grupo controle negativo apresentou crescimento médio de 6,2 ± 1,5 cm, representando o desenvolvimento esperado em condições normais. O filme de PCL puro resultou em um crescimento médio de 4,5 ± 1,0 cm, valor significativamente inferior ao controle ($p < 0,05$), sugerindo discreto efeito inibitório da

matriz polimérica sobre o alongamento radicular. Por outro lado, a incorporação de nanopartículas de Co_3O_4-NPs modificou de forma distinta a resposta biológica. O nanocompósito contendo 5% de Co_3O_4-NPs apresentou crescimento médio de 6,8 ± 1,8 cm, não apresentando diferença estatística em relação ao CN ($p > 0,05$), mas registrando valores superiores ao PCL puro ($p < 0,05$). Enquanto o filme contendo 10% de Co_3O_4-NPs, exibiu crescimento radicular significativamente reduzido (3,9 ± 0,7 cm), inferior tanto ao controle quanto ao nanocompósito com 5% de nanopartículas ($p < 0,05$). Esses resultados evidenciaram que a presença das Co_3O_4-NPs exerceram o efeito dependente da concentração, ou seja, para teores moderados (5%) não afetou de forma negativa o crescimento radicular, enquanto altas concentrações (10%) promoveram acentuada inibição. Assim, este comportamento indicou que o equilíbrio entre a quantidade de nanoreforço incorporada e a resposta biológica foi determinante para a aplicação segura do material. Apesar da fitotoxicidade observada em concentrações elevadas, esse efeito pode ser explorado de forma estratégica no desenvolvimento de embalagens ativas (Alkassfarity *et al.*, 2024).

Figura 7 - Crescimento radicular das sementes de (a) *Lactuca sativa* e (b) *Brassica oleracea*.



Fonte: Construção da autora (2025).

CONCLUSÃO

Com o possível trabalho foi possível desenvolver e caracterizar filmes nanocompósitos de PCL@Co_3O_4-NPs, onde a incorporação de nanopartículas verdes como nanoreforço foi capaz de modificar de forma significativa as propriedades estruturais, mecânicas e biológicas da matriz polimérica, ajustando-a para potencial aplicação em embalagens ativas. As análises estruturais confirmaram a redução da intensidade dos picos o polímero, enquanto as avaliações morfológicas revelaram alterações favoráveis à funcionalidade do material. Do ponto de vista biológico, a fitotoxicidade evidenciou comportamento dependente da concentração das Co_3O_4-NPs, sendo que 5% (em massa) apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho e segurança. Por conseguinte, este estudo reforça que a nanotecnologia possibilitou o desenvolvimento de materiais que conciliam eficiência em suas aplicações e baixo impacto ambiental, indicando que o filme nanocompósito PCL@5%Co_3O_4-NPs destacou-se como alternativa sustentável e promissora para embalagens ativas biodegradáveis, ao mesmo tempo em que abrem perspectivas para exploração em diversas áreas.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos desse trabalho são para o Grupo de Pesquisa em Nanomateriais Aplicados (GPNAp) a e Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Programa Probic/Probiti – FAPERGS - 2024/2025) pelo apoio financeiro e apoio.

REFERÊNCIAS

ALKASSFARITY, A.N.; YASSIN, M.A.; ABDEL REHIM, M.H.; LIU, L.; JIAO, Z.; WANG, B.; WEI, Z. Modified cellulose nanocrystals enhanced polycaprolactone multifunctional films with barrier, UV-blocking and antimicrobial properties for food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 261, p. 129871-129884, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129871

AL-MHYAWI, S.R.; AL-SULAMI, A.I.; ALSULAMI, F.M.H.; ALDAHIRI, R.H.; ALSABBAN, M.M.; MOSA, F.M.A.B.; ALNAWMASI, J.S.; NUR, O.; MANNAA, M.A.; RAJEH, A. Preparation and modulating of the thermal, optical, dielectric, and electrical properties of PCL/PMMA-NiO/SnO_2 nanocomposites for energy storage devices. **Ceramics International**, v. 51, p. 32623-32636. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.04.440

ALWADAI, N. Evaluation of the electrical behavior of tungsten trioxide and cobalt oxide nanoparticles filled poly (ε-caprolactone) composite for optoelectronic devices. **Materials Chemistry and Physics**, v. 332, p. 130211-130220, 2025. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.130211

CAI, S.; DENG, X.; BEIYUAN, J.; CHEN, X.; LIU, D.; LV, D.; DUAN, C.; LIN, L.; CHA, R.; XIE, W.; CHEN, H.; ZHOU, J.; LU, Z.; HUANG, L.; YUAN, W. Review of synthetic polymer-based thermal insulation materials in construction and building. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110846-110868, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110846

DÍAZ, E.; ARESTI, J.; LEÓN, J. Evaluation of physicochemical and mechanical properties with the in vitro degradation of PCL/nHA/MWCNT composite scaffolds. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 40, n. 3–4, p. 134–142, 2021. https://doi.org/10.1177/0731684420943304

DOMYATI, D. Thermal stability and antibacterial activity of Er_2O_3, and Co_3O_4 scattered in polycaprolactone. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 119, p. 367–375, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.11.058

EMEL'YANOV, A.; KORZHOVA, S.; IVANOVA, A.; SEMENOVA, T.; CHEPENKO, D.; USMANOV, R.; POZDNYAKOV, A. Water-Soluble Nanocomposites Containing Co_3O_4 Nanoparticles Incorporated in Poly-1-vinyl-1,2,4-triazole. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2940-2953, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15132940

FABBRI, D. Use of pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry to study environmental pollution caused by synthetic polymers: a case study: the Ravenna Lagoon. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 58–59, p. 361–370, 2001. https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00170-4

FALANGA, A.; SICILIANO, A.; VITIELLO, M.; FRANCI, G.; DEL GENIO, V.; GALDIERO, S.; GUIDA, M.; CARRATURO, F.; FAHMI, A.; GALDIERO, E. Ecotoxicity Evaluation of Pristine and Indolicidin-coated Silver Nanoparticles in Aquatic and Terrestrial Ecosystem. **International Journal of Nanomedicine**, v. 15, p. 8097–8108, 2020. https://doi.org/10.2147/ijn.s260396

FELEMBAN, S.A. Electrospun polycaprolactone nanofibers reinforced with glutamine and thiosemicarbazide for efficient Pb^{2+} adsorption from aqueous media. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 200, p. 107445-107456, 2025. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107445

GAO, J-F.; WU, Z-L.; DUAN, W-J.; ZHANG, W-Z. Simultaneous adsorption and degradation of triclosan by *Ginkgo biloba* L. stabilized Fe/Co bimetallic nanoparticles. **Science of The Total Environment**, v. 662, p. 978–989, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.194

GARCÍA, G.; MORENO-SERNA, V.; SAAVEDRA, M.; CORDOBA, A.; CANALES, D.; ALFARO, A.; GUZMÁN-SORIA, A.; ORIHUELA, P.; ZAPATA, S.; GRANDE-TOVAR, C.D.; VALENCIA-LLANO, C.H.; ZAPATA, P.A. Electrospun scaffolds based on a PCL/starch blend reinforced with CaO nanoparticles for bone tissue engineering. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 273, p. 132891-132908, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132891

GUESMI, A.; HAMADI, N.B.; EL-FATTAH, W.A.; EL-BINDARY, M.A.; EL-DESOUKY, M.G.; EL-BINDARY, A.A. Sustainable cobalt (II) removal from wastewater using an electrospun Ag-MOF/polycaprolactone-chitosan nanofiber membrane: Optimization and regeneration performance. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 319, p. 145673-145696, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145673

GUIMARÃES, D.T.; DE OLIVEIRA BARROS, M.; DE ARAÚJO E SILVA, R.; SILVA, S.M.F.; DE ALMEIDA, J.S.; DE FREITAS ROSA, M.; GONÇALVES, L.R.B.; BRÍGIDA, A.I.S. Superabsorbent bacterial cellulose film produced from industrial residue of cashew apple juice processing. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 242, p. 124405-124416, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124405

JAYALAKSHMI, K.; ISMAYIL; HEGDE, S.; SANJEEV, G.; MURARI, M.S. Improving electrolyte performance: Nanocomposite solid polymer electrolyte films with cobalt oxide nanoparticles. **Polymer Composites**, v. 45, n. 1, p. 137–150, 2024. https://doi.org/10.1002/pc.27763

MOHANDESNEZHAD, S.; PILEHVAR-SOLTANAHMADI, Y.; ALIZADEH, E.; GOODARZI, A.; DAVARAN, S.; KHATAMIAN, M.; ZARGHAMI, N.; SAMIEI, M.; AGHAZADEH, M.; AKBARZADEH, A. In vitro evaluation of Zeolite-nHA blended PCL/PLA nanofibers for dental tissue engineering. **Materials Chemistry and Physics**, v. 252, p. 123152–123160, 2020. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123152

MUKAILA, T.; ADENIYI, A.; BELLO, I.; SARKER, N.C.; MONONO, E.; HAMMED, A. Optimizing film mechanical and water contact angle properties via PLA/starch/lecithin concentrations. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 8, p. 100095-100105, 2024. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100095

OSMAN, A.I.; ZHANG, Y.; FARGHALI, M.; RASHWAN, A.K.; ELTAWEIL, A.S.; ABD EL-MONAEM, E.M.; MOHAMED, I.M.A.; BADR, M.M.; IHARA, I.; ROONEY, D.W.; YAP, P-S. Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 22, n. 2, p. 841–887, 2024. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01682-3

SATI, P.; DHYANI, P.; BHATT, I.D.; PANDEY, A. *Ginkgo biloba* flavonoid glycosides in antimicrobial perspective with reference to extraction method. **Journal of Traditional and Complementary Medicine**, v. 9, n. 1, p. 15–23, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2017.10.003

SHALTOOKI, M.; DINI, G.; MEHDIKHANI, M. Fabrication of chitosan-coated porous polycaprolactone/strontium-substituted bioactive glass nanocomposite scaffold for bone tissue engineering. **Materials Science and Engineering: C**, v. 105, p. 110138-110148, 2019. https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110138

SOUSA, J.C.; COSTA, A.R.M.; LIMA, J.C.; ARRUDA, S.A.; ALMEIDA, Y.M.B.; CANEDO, E.L. Polycaprolactone (PCL)/alumina and PCL/niobium pentoxide composites: Rheology, crystallization, and mechanical properties. **Polymer Composites**, v. 41, n. 4, p. 1265–1276, 2020. https://doi.org/10.1002/pc.25452

WANG, Q.; ZHU, G.; WANG, Q.; ZHAO, W.; LI, Y.; SHAKOOR, N.; TAN, Z.; WANG, F.; ZHANG, P.; RUI, Y. The fate and impact of Co_3O_4 nanoparticles in the soil environment: Observing the dose effect of nanoparticles on soybeans. **Journal of Environmental Management**, v. 368, p. 122186-122198, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122186

WOUTERS, R.D.; DA SILVA, M.D.C.R.; DRUZIAN, D.M.; DOS SANTOS, C.; RUIZ, Y.P.M.; GALEMBECK, A.; PAVOSKI, G.; ESPINOSA, D.C.R.; BONAZZA, G.K.C.; MACHADO, A.K.; DA SILVA, W.L. Development of novel green tricobalt tetroxide nanoparticles: Photocatalytic activity and *in vitro* safety profile. **Separation and Purification Technology**, v. 366, p. 132732-132742, 2025. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132732

ZIA, M.K.; AKDAG, Z.; ASGHAR, A.; CELIK, S.; DUMAN, K.; BARI, T.; ULAG, S.; DOGAN, C.; GUNDUZ, O.; IKRAM, F. Caffeic acid encapsulated 3D printed polycaprolactone/polyvinylpyrrolidone scaffolds for wound healing applications. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 107, p. 106826-106839, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2025.106826

ZIELIŃSKA, A.; COSTA, B.; FERREIRA, M.V.; MIGUÉIS, D.; LOUROS, J.M.S.; DURAZZO, A.; LUCARINI, M.; EDER, P.; CHAUD, M.V.; MORSINK, M.; WILLEMEN, N.; SEVERINO, P.; SANTINI, A.; SOUTO, E.B. Nanotoxicology and Nanosafety: Safety-by-Design and Testing at a Glance. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 13, p. 4657-46579, 2020. https://doi.org/10.3390/ijerph17134657

Este trabalho de acesso aberto está licenciado sob Creative Commons - Atribuição (CC BY 4.0).