

INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA VEGETAL NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE COMPÓSITOS DE PLA/PBAT/CASCA DE ARROZ

Isabela B. Matos^{1,2}, Nicole B. Agostini², Ruth M. C. Santana²

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil. (isabela.bemfica@ufrgs.br)

²Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

Resumo: Este trabalho avalia a influência do tamanho da fibra vegetal (casca de arroz) e o processo de injeção tipo pistão vertical em corpos de prova em matriz de PLA/PBAT. O foco principal consistiu na análise comparativa do Índice de Fluides (MFI) e do grau de inchamento obtidas no plastômetro de corpos de prova na parte superior (Parte A) e da parte inferior (Parte B). Avaliou-se como a granulometria e compatibilização afetam na dispersão da fibra. Os resultados demonstram que a posição no molde influencia na fluidez e na organização morfológica da fibra.

Palavras-chave: PLA/PBAT; Casca de arroz, dispersão, MFI, injeção tipo pistão.

INTRODUÇÃO

A transição para um modelo de desenvolvimento sustentável tem impulsionado a ciência de materiais a buscar alternativas aos polímeros convencionais, integrando resíduos agroindustriais em matrizes biodegradáveis (Yap *et al.*, 2020). Esse cenário é reflexo da atual "sociedade de risco", onde a incerteza sobre as consequências do desenvolvimento econômico exige novas posturas científicas. Nesse cenário, a blenda composta por Poli(ácido láctico) (PLA) e Poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) destaca-se por conciliar biodegradabilidade com propriedades mecânicas versáteis (Wang *et al.*, 2025).

Entre os resíduos agroindustriais disponíveis, a casca de arroz destaca-se como um reforço promissor devido à sua abundância, baixo custo e elevado teor de sílica, características que favorecem sua aplicação em compósitos poliméricos e contribuem para estratégias de economia circular (Pereira *et al.*, 2023).

O estado do Rio Grande do Sul consolida-se como o principal polo orizícola do Brasil, sendo responsável por aproximadamente 70% da produção nacional de arroz. Esse volume produtivo expressivo resulta na geração massiva de casca de arroz, um resíduo agroindustrial de baixa densidade volumétrica e lenta biodegradação (Mansaray e Ghaly, 1998), cujo descarte inadequado representa um desafio logístico e ambiental para a região (Pode, 2016). Historicamente subutilizada ou destinada apenas à queima para geração de energia, a casca de arroz possui um alto potencial como carga de reforço em matrizes poliméricas biodegradáveis (Faruk *et al.*, 2012). A

valorização desse subproduto no desenvolvimento de compósitos de PLA/PBAT não apenas mitiga passivos ambientais locais, mas também fortalece a bioeconomia gaúcha ao transformar um resíduo abundante em matéria-prima de alto valor agregado para a indústria de materiais sustentáveis (Nanda *et al.*, 2022).

Entretanto, a introdução de cargas lignocelulósicas em matrizes poliméricas impõe desafios complexos à processabilidade, especialmente durante a moldagem por injeção (Bledzki e Faruk, 2005). A interação entre a matriz e a fase dispersa é influenciada pela granulometria da carga e pela eficiência de agentes compatibilizantes, que buscam otimizar a interface química entre os componentes (Agüero *et al.*, 2020).

No processamento por injeção, o comportamento reológico do fundido determina a qualidade da peça, sendo o Índice de Fluides (MFI) e o grau de inchamento do extrudado parâmetros fundamentais para prever a recuperação elástica e a estabilidade dimensional.

Um aspecto crítico, frequentemente negligenciado, é a homogeneidade das propriedades reológicas ao longo da peça injetada. Devido aos gradientes de pressão, temperatura e taxas de cisalhamento inerentes ao fluxo no interior do molde, além da direção do cilindro e molde de uma injetora tipo pistão; o material que preenche inicialmente a cavidade (base do molde) pode apresentar características distintas do material injetado por último (topo da cavidade) (AouraghHassani *et al.*, 2020). Essa heterogeneidade espacial pode ser acentuada pelo tamanho das

partículas de casca de arroz (0,15 mm; 0,25 mm e 1 mm) e pela presença do compatibilizante, afetando a uniformidade microestrutural e o desempenho do compósito.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da posição espacial no corpo de prova (Parte A versus Parte B) nas propriedades reológicas de compósitos de PLA/PBAT e casca de arroz. Busca-se investigar como a variação da granulometria da fibra de casca de arroz e a adição de compatibilizante impactam as diferenças de MFI e o grau de inchamento entre essas regiões, fornecendo subsídios para a otimização do processamento de materiais biodegradáveis reforçados.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho utilizamos como matrizes poliméricas o Poli(ácido lático) (PLA) e Poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT), processados na forma de blenda. A carga vegetal incorporada foi a casca de arroz, previamente preparada em três granulometrias distintas: > 0,15 mm, > 0,25 mm e > 1 mm assim como mostra a (Figura 1). Para avaliar a melhoria da interface entre a fase polimérica e a carga vegetal, utilizou-se um agente compatibilizante, Poli(acetato de vinila) (PVAC), em composições selecionadas apresentadas na Tabela 1, visando otimizar a dispersão e a adesão mecânica do sistema.



Figura 1. Imagem da granulometria das cascas de arroz.

○ Preparação dos compósitos

A etapa de mistura e homogeneização dos componentes foi realizada em uma câmara de mistura interna HAAKE Rheomix OS, da Thermo Scientific (Figura 2). O processo foi conduzido sob temperatura de 170 °C, com velocidade de rotação dos rotores mantida em 60 rpm durante um tempo total de processamento de 6 minutos. Estas condições foram estabelecidas para assegurar a incorporação uniforme da casca de arroz na matriz de PLA/PBAT, minimizando potenciais degradações térmicas dos materiais biodegradáveis durante a fusão.



Figura 2. Câmara de mistura Haake com os materiais misturados.

Tabela 1. Composição dos compósitos

Componentes	Compósitos	
	Com compatibilizante (C)	Sem compatibilizante (SC)
PLA	47,3	49,0
PBAT	20,3	21,0
Casca de arroz*	29,0	30,0
Compatibilizante	3,4	-

*Ambas as composições apresentadas da tabela foram repetidas com as três granulometrias de casca (> 0,15 mm, > 0,25 mm e > 1 mm).

○ Processamento dos corpos de prova

Após a preparação das misturas, os compósitos foram moldados por injeção para a obtenção de corpos de prova utilizando uma Mini Injetora Haake MiniJet II, da Thermo Scientific. O processamento foi executado com temperatura de cilindro de 170 °C e temperatura de molde de 50 °C. As amostras foram submetidas a um tempo de residência de 1 minuto e 15 segundos, seguido por uma pressão de injeção de 560 bar por 10 segundos e uma pressão de descarga de 450 bar por 15 segundos. Visando o objetivo central do trabalho, os corpos de prova foram segmentados manualmente em duas regiões apresentadas visualmente na Figura 3. A Parte A, correspondente ao material injetado por último (topo do molde), e a Parte B, referente ao material da base do corpo de prova (primeiro a preencher o molde).

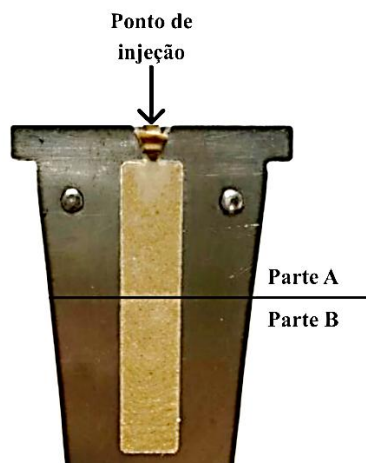


Figura 3. Partes do corpo de prova no molde da injetora tipo pistão.

○ Ensaio de Índice de Fluidez

A caracterização reológica foi realizada através do ensaio de Índice de Fluidez (MFI) em um plastômetro de extrusão da marca CEAST, seguindo as diretrizes da norma ASTM D1238. O ensaio foi conduzido separadamente para amostras coletadas das Partes A e B de cada compósito para identificar variações espaciais de fluidez. Durante a análise, mediu-se o diâmetro dos filamentos extrudado para o cálculo do razão de inchamento (β), determinado pela razão entre o diâmetro médio do filamento resfriado (D_s) e o diâmetro nominal da matriz (D_i) do equipamento, de 2,019 mm, conforme a Equação 1:

$$\beta = \frac{D_s}{D_i} \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

○ Índice de Fluidez (IF)

Os resultados obtidos para o Índice de Fluidez (MFI) das amostras de blenda pura e dos compósitos reforçados com casca de arroz mostram padrões distintos de processabilidade e distribuição de carga ao longo do corpo de prova injetado. Para a blenda pura de PLA/PBAT, observou-se uma alta fluidez com valores de 14,56 g/10min na Parte A e 14,53 g/10min na Parte B, quando comparado aos compósitos, indicando uma matriz homogênea e estável sob as condições de processamento adotadas, o que é característico de biopolímeros versáteis em aplicações industriais. Entretanto, a incorporação da casca de arroz promoveu uma redução nos valores de MFI em todos os compósitos como pode-se observar na Figura 4, podendo verificar que a presença da carga vegetal impõe uma maior resistência ao fluxo do fundido, aumentando a viscosidade do sistema.

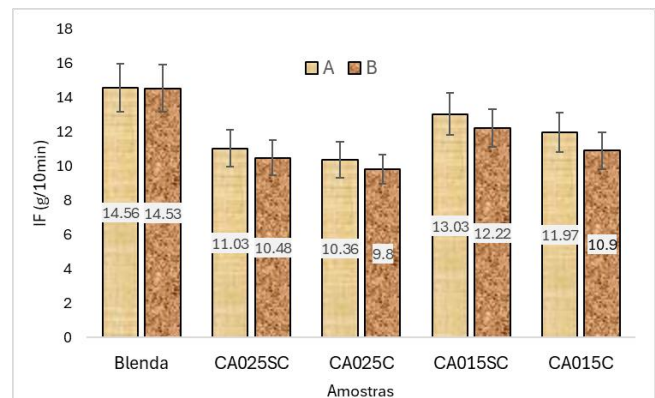


Figura 4. Índice de Fluidez da blenda e dos compósitos.

A análise de MFI apontou para uma tendência consistente, influenciada pela distribuição espacial heterogênea da casca de arroz em todas as formulações dos compósitos, em que a parte A apresentou fluidez superior à parte B. No compósito CA025SC (0,25 mm sem compatibilizante), a fluidez na Parte A foi de 11,03 g/10min contra 10,48 g/10min na Parte B, comprovado visualmente pela Figura 6. Esse fenômeno sugere que a dinâmica de preenchimento, sob a pressão de injeção de 560 bar, promove uma maior compactação ou concentração de partículas de casca de arroz na base do molde, tornando o material nesta região mais viscoso em comparação ao material injetado por último, que permanece no topo da cavidade. Tal comportamento válida a tese de que gradientes de pressão e cisalhamento inerentes ao processo de moldagem geram peças com propriedades reológicas não isotrópicas.

Adicionalmente, devido às características operacionais da injetora por pistão, a ação gravitacional durante o período de fusão do material promove a sedimentação das fibras na região inferior da câmara de injeção.



Figura 5. Filamento extrudado da amostra CA025SC.

A influência da granulometria e da compatibilização também modulou essa diferença espacial. As amostras com menor granulometria (0,15 mm) apresentaram uma fluidez maior em comparação às de 0,25 mm, como observado na amostra CA015SC (Figura 6), que atingiu 13,03 g/10min na Parte A. Este aumento de fluidez com a redução do tamanho da partícula está

associado a uma melhor distribuição da fase dispersa e menor interferência nas linhas de fluxo da matriz polimérica. Adicionalmente, a presença do agente compatibilizante resultou em reduções adicionais no MFI. Essa queda na fluidez é um indicativo de uma interação interfacial mais robusta entre a blenda e a casca de arroz, restringindo a mobilidade das cadeias macromoleculares e confirmando a eficácia do aditivo na otimização da interface química.



Figura 6. Extrudado da amostra CA015SC.



Figura 7. Extrudado da amostra CA025C.

Estes dados preliminares de MFI serão correlacionados com os resultados do grau de inchamento do extrudado.

○ Grau de inchamento

A análise da razão de inchamento complementa os achados do Índice de Fluidez ao fornecer um indicativo direto da recuperação elástica das cadeias poliméricas após o cisalhamento sofrido no plastômero. Conforme observado no gráfico de Razão de Inchamento versus Amostra, a blenda pura de PLA/PBAT apresentou os maiores valores de expansão, com a Parte A atingindo aproximadamente 2,4 e a Parte B 2,2. Esse comportamento evidencia a alta memória elástica da matriz polimérica sem reforços, que armazena energia durante o fluxo e a libera em forma de expansão volumétrica na saída da matriz. A discreta diferença entre as regiões A e B na blenda pura pode estar associada a pequenas variações térmicas ou de histórico de cisalhamento durante o processamento por injeção.

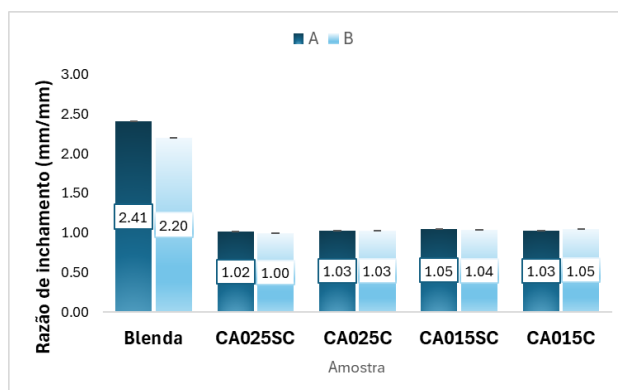


Figura 8. Grau de inchamento das amostras após extrusão do plastomêro.

Em contrapartida, a incorporação da casca de arroz impediu o inchamento do extrudado, com todos os compósitos apresentando valores próximos a 1,0, independente da granulometria ou da adição de compatibilizante (Figura 8). Essa queda acentuada indica que a carga vegetal atua como um agente de restrição física, impedindo o rearranjo elástico das macromoléculas de PLA e PBAT. A presença das partículas de casca de arroz dissipa a energia elástica que seria convertida em inchamento, resultando em um material com estabilidade dimensional superior para aplicações de moldagem.



Figura 9. Diferença do inchamento entre a matriz e o compósito.

Notavelmente, ao contrário do que foi observado no MFI, onde a Parte A apresentou fluidez consistentemente superior à Parte B, o grau de inchamento nos compósitos mostrou-se altamente homogêneo entre as duas extremidades. Isso sugere que, embora a dinâmica de preenchimento do molde cause variações na facilidade de fluxo (possivelmente por segregação devido à gravidade ou compactação da carga), a quantidade de carga presente em ambas as partes é suficiente para "anular" o efeito de inchamento característico da matriz polimérica. Assim, a heterogeneidade da dispersão da fibra espacial do corpo de prova injetado manifesta-se predominantemente na viscosidade do fundido (MFI) do que na razão de inchamento (β), garantindo que a



peça final mantenha dimensões uniformes apesar das variações de fluxo interno.

CONCLUSÃO

O presente estudo permitiu avaliar a influência da dinâmica de preenchimento do molde nas propriedades reológicas de compósitos de PLA/PBAT reforçados com casca de arroz. A caracterização segmentada evidenciou que o processo de moldagem por injeção induz uma variação reológica espacial mensurável no corpo de prova final.

Os resultados de Índice de Fluidadez (MFI) demonstraram que a Parte B (base do molde) apresenta consistentemente uma maior viscosidade (menor MFI) em comparação à Parte A (topo do molde) em todos os cenários de compósitos avaliados. Esse comportamento indica que o material injetado inicialmente sofre uma maior compactação ou segregação da carga vegetal no fundo da cavidade, resultando em propriedades de fluxo não isotrópicas ao longo da peça. Observou-se que a redução da granulometria e a aditivação com compatibilizante modulam a magnitude da fluidez, mas a tendência de distribuição heterogênea permanece intrínseca ao processo de preenchimento.

Em relação à razão de inchamento (β), conclui-se que a incorporação da casca de arroz, independentemente do tamanho da partícula, atua como um agente de restrição física altamente eficaz, estabilizando a expansão volumétrica em valores próximos a 1,0. Diferente da fluidez, a estabilidade dimensional mostrou-se homogênea entre as regiões A e B, indicando que a presença da biomassa é suficiente para suprimir a memória elástica característica da blenda pura em ambas as extremidades do corpo de prova.

Em suma, o trabalho mostra a importância de considerar a localização espacial na análise de propriedades de peças injetadas com cargas vegetais. O controle rigoroso das variáveis de processo é fundamental para assegurar a uniformidade microestrutural e a integridade de componentes produzidos com polímeros biodegradáveis reforçados, visando aplicações sustentáveis em escala industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências financiadoras UFRGS, BIC e CNPQ pelo apoio. Também ao Laboratório de Materiais Poliméricos (LAPOL) e ao Núcleo de Sustentabilidade (NS) pela estrutura disponível para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÜERO, Á. *et al.* Evaluation of Different Compatibilization Strategies to Improve the Performance of Injection-Molded Green Composite

Pieces Made of Polylactide Reinforced with Short Flaxseed Fibers. **Polymers**, v. 12, 2020.

AOURAGHHASSANI, F.-Z. S. *et al.* Injection molding of short fiber thermoplastic bio-composites: Prediction of the fiber orientation. **Journal of Composite Materials**, v. 54, p. 4787–4797, 2020.

BLEDZKI, A.; FARUK, O. Effects of the chemical foaming agents, injection parameters, and melt-flow index on the microstructure and mechanical properties of microcellular injection-molded wood-fiber/polypropylene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 97, p. 1090–1096, 2005.

FARUK, O. *et al.* Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in Polymer Science**, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 1 nov. 2012.

MANSARAY, K. G.; GHALLY, A. E. Thermal degradation of rice husks in nitrogen atmosphere. **Bioresource Technology**, v. 65, n. 1–2, p. 13–20, 1 jul. 1998.

NANDA, S. *et al.* **Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: a review** *Environmental Chemistry Letters* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, , 1 fev. 2022.

PEREIRA, D. *et al.* Development of Composites of PLA Filled with Different Amounts of Rice Husk Fibers for Fused Deposition Modeling. **Journal of Natural Fibers**, v. 20, 2023.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 83, n. 1 SUPPL., p. 98–112, 1 abr. 2016.

PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1468–1485, 1 jan. 2016.

TIWARI, A.; HIHARA, L. H. Deciphering the inert atmosphere degradation patterns in hybrid silicones. **Polymer Degradation and Stability**, v. 97, n. 9, p. 1633–1643, 1 set. 2012.

WANG, LEI *et al.* Degradation Behavior of Rice Husk Fiber-Reinforced PLA/PBAT Composites in Short-Term Hydrothermal Environment. **Journal of Applied Polymer Science**, 2025.



YAP, S. Y. *et al.* Characterization and Biodegradability of Rice Husk-Filled Polymer Composites. **Polymers**, v. 13, 2020.