cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Análises Reológicas em Nanocompósitos de *iPP*/Nb_2O_5

Malagrino, T.R.S.[12];Zarur, G.D.[12]; Maddalozzo, A.E.D.[3]; Hemkemaier, M.C.[1]; Cruz, M.O.[4]; Agostini, J.F.T.[12]; Miranda, G.V.[1]; Neto, J.B.R.[1]; Merlini, C.[1]; Rocha, L.S.R.[4]

1.Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); 2. NIONE LTDA.; 3. Universidade de Caxias do Sul (UCS); 4. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Introdução

Nanopartículas de óxidos metálicos podem alterar o comportamento viscoelástico de polímeros fundidos em função da concentração, da dispersão e da interação com a matriz. Em sistemas ultradiluídos, abaixo de 0,1% m/m, a contribuição volumétrica direta das partículas é limitada, de modo que alterações reológicas mensuráveis tendem a refletir o estado de dispersão e as interações entre a superfície das partículas e as cadeias poliméricas. No polipropileno isotático (*iPP*), esses efeitos podem modificar a resposta elástica e viscosa do fundido. A funcionalização superficial constitui estratégia para alterar a afinidade com a matriz e a área interfacial disponível. Neste trabalho, avaliou-se o efeito de nanopartículas de Nb_2O_5 puras e funcionalizadas com anidrido maleico sobre o comportamento reológico do *iPP* em regimes oscilatório e capilar.

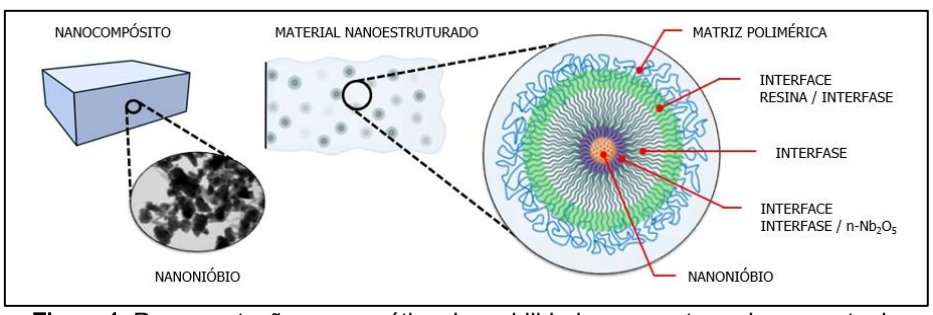


Figura 1. Representação esquemática da mobilidade segmentar e do aumento da conectividade interfacial promovidos pela incorporação de nanopartículas à matriz polimérica

Objetivos

Geral: avaliar o efeito de nanopartículas de Nb_2O_5 puras e funcionalizadas com anidrido maleico sobre a resposta reológica do *iPP* em regimes oscilatório e capilar.

Específicos:

• Comparar G′, G″, tan δ e a frequência de cruzamento entre o *iPP* e os nanocompósitos.

• Quantificar a alteração da contribuição elástica em baixa frequência para partículas puras e funcionalizadas.

• Verificar indícios reológicos de formação de rede pela inclinação de G′ em baixa frequência.

• Comparar a viscosidade capilar em taxas de cisalhamento relevantes ao processamento.

Metodologia

1. Preparação

- *iPP* + Nb_2O_5 (puras ou Nb-f-AM)
- Haake 180 °C, 80 rpm → extrusão monorrosca 205–220 °C

2. Reometria oscilatória

- MCR 102, placas 25 mm, 200 °C
- RVL + varredura 0,01–100 Hz
- G′, G″, tan δ, η*, f cruz.

3. Reometria capilar

- SR20, 230 °C, capilar L/D = 30
- 150 – 10.000 s^{-1}
- Correção Weissenberg-Rabinowitsch

Resultados e Discussão

Tabela 1. Parâmetros viscoelásticos a 0,1 Hz; ΔG' relativo ao *iPP*.

Formulação	G' (Pa)	ΔG' (%)	tan δ	f cruz. (Hz)
iPP H301	130	—	6,37	20,0
0,004%v NP Pura	140	+7,2	6,22	19,6
0,011%v NP Pura	138	+5,5	6,28	20,7
0,022%v NP Pura	175	+33,8	5,58	17,6
0,004%v NP-f-AM	223	+70,6	5,09	16,3
0,011%v NP-f-AM	176	+34,7	5,49	17,3
0,022%v NP-f-AM	169	+29,9	5,58	18,7

Resultados e Discussão (Cont.)

Resposta elástica em baixa frequência (0,1 Hz)

- *iPP*: G′ = 130 Pa e tan δ = 6,37 (referência).
- Nb_2O_5 pura: máximo de 175 Pa (tan δ = 5,58).
- Funcionalizada 0,004%v: 223 Pa e tan δ = 5,09, cerca de 71% acima do *iPP* (maior valor da série; Figura 2; demais composições na Tabela 1).

Frequência de cruzamento G′/G″

- Recuo de 20,0 Hz (*iPP*) para 16,3 Hz na formulação funcionalizada de 0,004%v.
- Demais composições entre 17,3 e 20,7 Hz, sem tendência monotônica com o teor.

Ausência de rede percolada

- Inclinação de G′ em baixa frequência entre 1,34 e 1,47, sem platô evidente.
- Não há evidência reológica de rede percolada na janela investigada.

Papel da dispersão e da interface

- O maior efeito na menor concentração funcionalizada é compatível com variações da área interfacial e do estado de dispersão, e não com o teor nominal.

Processabilidade (regime capilar)

- Todas as formulações pseudoplásticas, com índice de 0,32 a 0,34.
- Viscosidade corrigida de 216 Pa·s a 200 s^{-1} e 29 Pa·s a 5000 s^{-1}.
- Diferenças frente ao *iPP* inferiores a 7%: baixo impacto sobre o escoamento.

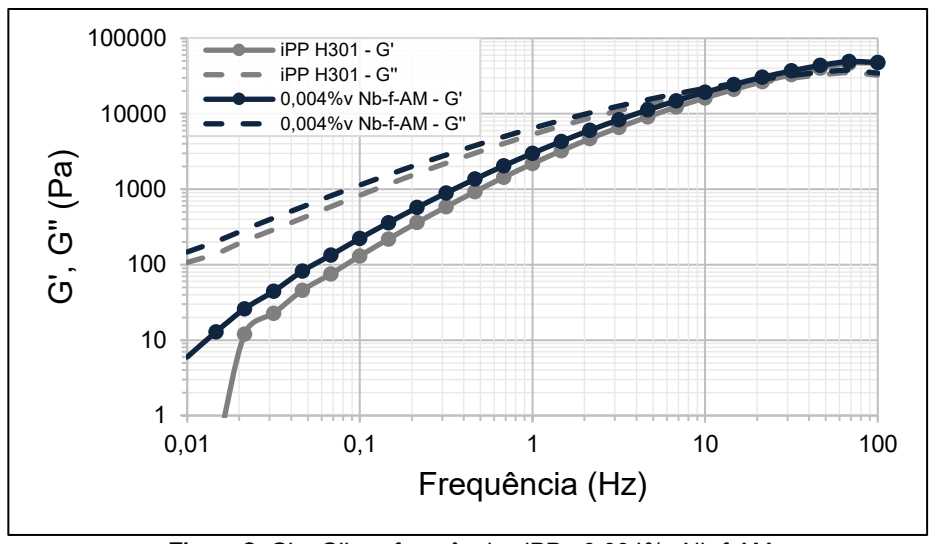


Figura 2. G' e G'' vs. frequência: *iPP* e 0,004%v Nb-f-AM

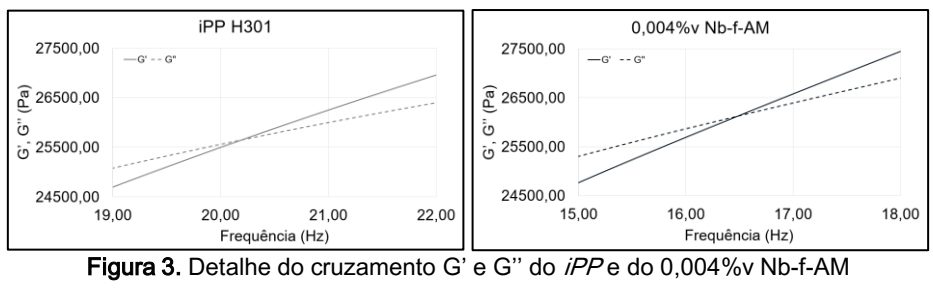


Figura 3. Detalhe do cruzamento G' e G'' do *iPP* e do 0,004%v Nb-f-AM

Conclusões

A incorporação de nanopartículas de Nb_2O_5 aumentou a contribuição elástica do *iPP* fundido em baixa frequência. O efeito mais intenso ocorreu na formulação funcionalizada com 0,004%: cerca de 71% em G′ a 0,1 Hz, tan δ de 6,37 para 5,09 e cruzamento de 20,0 para 16,3 Hz.

A inclinação de G′ manteve-se entre 1,34 e 1,47, sem platô, o que não sustenta a formação de rede percolada. A resposta não monotônica indica dependência do tratamento superficial e do estado de dispersão, e não do teor nominal.

Em regime capilar, as diferenças frente ao *iPP* foram inferiores a 7%: o ganho elástico não comprometeu o escoamento em altas taxas. O mecanismo é compatível com interação partícula-matriz, que a reometria isolada não determina.

Referências

1. NADIV, R. et al. Polymer, v. 153, 2018.
2. YUAN, W. et al. Polym. J., v. 42, 2010.
3. JARKA, P. et al. Polymers, v. 17, 2025.
4. HUANG, J. et al. JACS Au, v. 2, 2022.
5. JANCAR, J. et al. Polymer, v. 51, 2010.
6. PAUL, D. R.; ROBESON, L. M. Polymer, v. 49, 2008.
7. LIU, J.; LIANG, H. Polym. Bull., 2021.
8. BAEZA, G. P. et al. Nat. Commun., v. 7, 2016.
9. HASSANABADI, H. M. et al. Rheol. Acta, 2014.
10. ARRIGO, R.; MALUCELLI, G. Materials, v. 13, 2020.
11. YOUNG, W. W.; KATSUMATA, R. ACS Polym. Au, 2023.
12. TARIQ, A. et al. Polymers, v. 13, 2021.
13. OROMIEHIE, A. et al. Int. J. Chem. Eng. Appl., 2014.