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

Substituição de óxido de zinco por óxido de magnésio e incorporação de borracha de pneu moída em compósitos de SBR visando formulações elastoméricas sustentáveis

Samara Araújo Kawall[1]; Dener da Silva Souza[1]; Ricardo Henrique dos Santos[1]; Leandro Ferreira Pinto[1]; Carlos Toshiyuki Hiranobe[1] e Renivaldo José dos Santos[1]
1.Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Rosana

Introdução

A busca por materiais elastoméricos mais sustentáveis tem impulsionado a substituição de matérias-primas convencionais por alternativas ambientalmente adequadas. Nesse contexto, destacam-se a redução do uso de óxido de zinco (ZnO), devido aos impactos associados à liberação de íons zinco, e a reutilização de resíduos de pneus na forma de borracha moída (GTR), contribuindo para a valorização de resíduos e a redução dos impactos ambientais da indústria da borracha.

Objetivos

Avaliar a substituição parcial e total do ZnO por MgO em compósitos de SBR, bem como o efeito da incorporação de GTR sobre suas propriedades tecnológicas.

Metodologia

Foram preparadas dez formulações de SBR com diferentes proporções de ZnO/MgO (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100 phr – per hindred rubber), com e sem 20 phr de GTR. Os compostos foram caracterizados quanto às propriedades reométricas, densidade, densidade de ligações cruzadas, dureza Shore A, resistência à abrasão e propriedades mecânicas sob tração.

Resultados e Discussão

Os resultados indicaram que a substituição parcial de ZnO por MgO promoveu redução do tempo ótimo de vulcanização (t_{90}) em algumas formulações, enquanto a substituição total resultou em aumento significativo desse parâmetro na ausência de GTR. A incorporação de 20 phr de GTR elevou o torque mínimo dos compósitos, indicando maior viscosidade e contribuição da fase reciclada para a estrutura do material. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros reométricos.

Tabela 1. Parâmetros reométricos.

Compósitos	M_L (dN·m)	M_H (dN·m)	t_s (min)	t_{90} (min)
F1	7.01 ± 0.2	35.52 ± 0.75	1.93 ± 0.1	3.61 ± 0.24
F2	8.51 ± 0.13	33.86 ± 1.22	1.14 ± 0.03	2.18 ± 0.45
F3	9.19 ± 0.07	35.06 ± 0.96	1.03 ± 0.02	2.03 ± 0.5
F4	9.64 ± 0.07	35.78 ± 1.4	1.16 ± 0.02	2.13 ± 0.29
F5	8.89 ± 1.73	33.44 ± 0.49	2.2 ± 0.07	8.21 ± 0.75
F6	8.78 ± 0.53	28.47 ± 6.44	1.62 ± 0.05	3.03 ± 0.11
F7	10.81 ± 0.13	35.29 ± 1.9	0.98 ± 0.03	2.01 ± 0.39
F8	11.94 ± 0.24	39.47 ± 1.65	0.92 ± 0.02	2.02 ± 0.6
F9	12.24 ± 0.13	37.96 ± 1.33	1.04 ± 0.03	2.39 ± 0.88
F10	12.39 ± 0.17	35.63 ± 1.73	1.25 ± 0.02	2.88 ± 0.69

A incorporação de 20 phr de GTR aumentou a densidade dos compósitos. A densidade de ligações cruzadas variou entre 1,36 e 2,35 ×10 mol·cm-³, com valores mais elevados observados nas formulações contendo GTR.

A dureza manteve-se relativamente constante (55–59 Shore A), demonstrando que a substituição do ativador não comprometeu significativamente essa propriedade. Nos ensaios de abrasão, observou-se redução do volume perdido em algumas formulações com GTR, alcançando valores próximos de 115 mm³/40 m. A Tabel 2 apresenta os resultados das densidades, dureza e resistência à abrasão.

Tabela 2. Densidade, densidade de lig. cruzadas, dureza e resistência à abrasão.

Compósitos	Densidade ($g \cdot cm^{-3}$)	Lig. Cruzadas $x\,10^{-4}$ ($mol \cdot cm^{-3}$)	Dureza (Shore A)	Abrasão (mm^3 / 4 0m)
F1	1.05 ± 0	1.88 ± 0.0209	56 ± 0	168,57 ± 43,50
F2	1.05 ± 0	1.65 ± 0.0107	57 ± 1	139,93 ± 23,45
F3	1.05 ± 0	1.69 ± 0.0762	58 ± 1	153,98 ± 20,38
F4	1.04 ± 0	1.69 ± 0.0144	58± 0	128,11 ± 10,31
F5	1.04 ± 0	1.36 ± 0.0587	55 ± 0	133,34 ± 12,15
F6	1.07 ± 0	2.35 ± 0.012	57 ± 1	115,01 ± 6,83
F7	1.07 ± 0	1.72 ± 0.0308	59 ± 1	150,34 ± 16,15
F8	1.07 ± 0	1.9 ± 0.037	58± 1	122,60 ± 6,63
F9	1.07 ± 0	1.9 ± 0.0729	57 ± 1	141,87 ± 7,57
F10	1.07 ± 0	1.71 ± 0.0211	56 ± 1	131,99 ± 11,96

As propriedades de tração apresentaram resistência entre 0,79 e 1,67 MPa, com melhor desempenho para formulações contendo substituição parcial de ZnO por MgO, conforme mostrado na Tabela 3 apresenta e representado na Figura 1.

Tabela 3. Resistência à tração.

Compósitos	Tensão na ruptura (MPa)	Alongamento na ruptura (%)
F1	0.97 ± 0.16	72.76 ± 15.23
F2	1.06 ± 0.27	54.6 ± 17.07
F3	1.36 ± 0.18	53.44 ± 14.88
F4	1.67 ± 0.38	69.65 ± 11.13
F5	1.06 ± 0.43	52.78 ± 20.88
F6	0.79 ± 0.19	44.26 ± 12.06
F7	1.16 ± 0.2	56.33 ± 12.61
F8	1.31 ± 0.25	66.15 ± 16.56
F9	1.45 ± 0.39	61.1 ± 8.75
F10	1.26 ± 0.28	57.42 ± 4.99

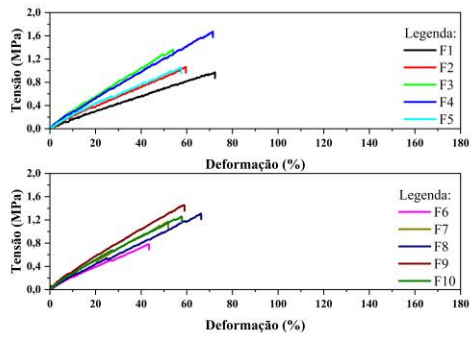


Figura 1. Resistência à tração.

Conclusões

Os resultados demonstram que a substituição parcial de ZnO por MgO associada à incorporação de GTR constitui uma alternativa viável para o desenvolvimento de compósitos elastoméricos mais sustentáveis.

Referências e Agradecimentos

1. P. Wiśniewska, J. W. Stand, M. Mathers, A. S. Bannister, and H. Willcock, "Towards Developing Fully Sustainable Elastomers: The Role of Chemistry," Green Chem. 2025, https://doi.org/10.1039/D4GC03802A.
2. W. Wang, M. Liao, and L. Wang, "The Transition Mechanism of Dynamic Mechanical Loss Peaks and Phase Analysis in Binary Block Copolymers of Styrene/Butadiene Rubber," J. Polym. Res. 2024, 31(6), 167, https://doi.org/10.1007/s10965-024-04011-6.
3. M. N. Alam, V. Kumar, D. J. Lee, and S. S. Park, "Boosting Mechanical and Aging Resistance Performances of Filled-Rubber With MgO and ZnO Co-Cure Activators in Diverse Vulcanization Systems," J. Ind. Eng. Chem. 2024, 137, 387–401, https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.03.024.