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

Planejamento experimental aplicado à formulação de borrachas de ligação com menor teor de cobalto para adesão em superfícies zincadas

Pedro H. B. da Silva[1]; Hayalla V. Oliveira[1]; Samuel M. Toffoli[1], Ticiane S. Valera[1] *
1. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo *tsvalera@usp.br

Introdução e Objetivos

Relevância: A adesão entre borracha natural (BN) e zinco (Zn) é fundamental no desempenho de compósitos reforçados, como correias transportadoras[1]

Problema: O uso de promotores de adesão à base de cobalto (Co) oferece riscos ocupacionais e ambientais.

Objetivo: Estudar e otimizar a adesão BN/Zn por modificações no sistema de vulcanização, sem alterar as quantidades de Co.



Figura 1. Neodecanoato borato de Co(II) (NBC)

Metodologia

Planejamento fracionado 2^{4-1} IV [2]
4 variáveis, 8 formulações (E1 – E8)

	Quant. (phr)
BN	100
ZnO	Z = 5 (-), 10 (+)
Ác. esteárico	1
6PPD	1
NBC	2
Resorcinol	3,2
SiO_2	10
HMMM	3,2
A = TBBS (-), DCBS (+)	1
S_8	S = 2,5 (-), 5 (+)



Masterbatch



Misturador aberto (moinho 2 rolos)

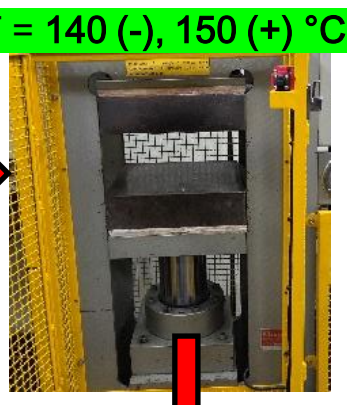


Composto acelerado



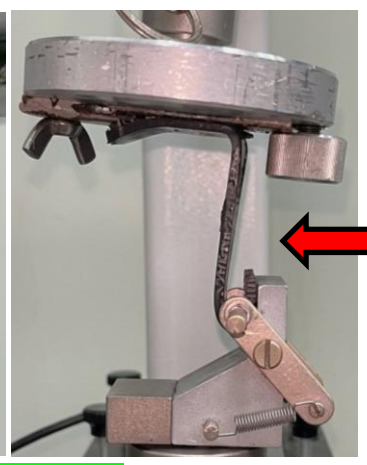
Zn

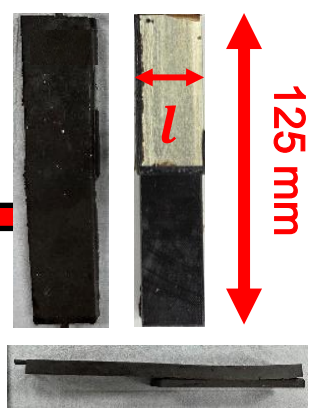
Vulcanização,
T = 140 (-), 150 (+) °C



Reometria (ASTM D5289)







ISO 813 - Adesão inicial (destacamento a 90°) $\rightarrow F_a = \frac{F_{max}}{l}$; $\overline{F_{a_i}} = \frac{\sum F_a}{n_i}$

Resultados e Discussão

Observa-se que a formação de ligações cruzadas (ΔM) é relevante para a ligação ao Zn[3] (Figura 2)

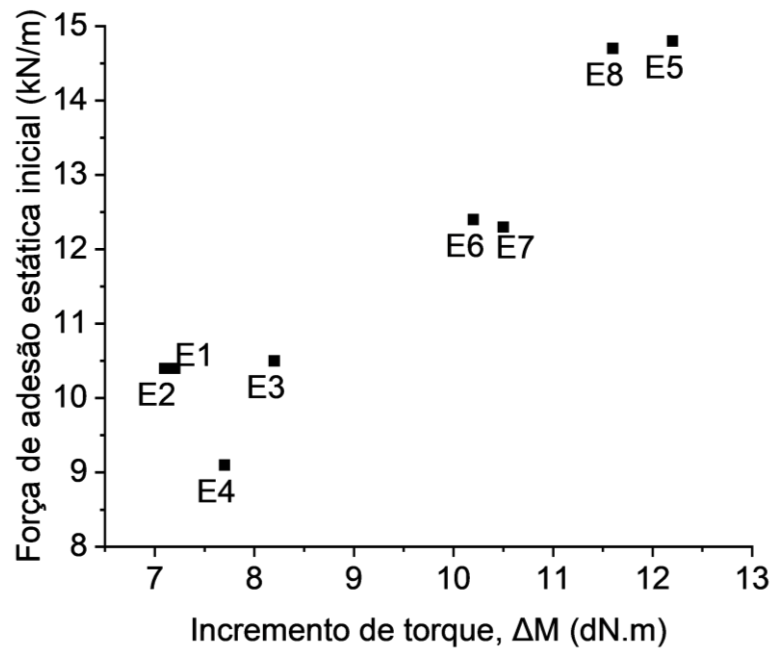


Figura 2. Aumento simultâneo de $\bar{F}_a$ e ΔM, na avalição dessas duas propriedades para as formulações E1 – E8.

De acordo com o teste de significância de efeitos ε_j (Tabela 1), o aumento de enxofre e a utilização de DCBS favorecem a adesão, o que dialoga com a literatura [1,3].

$$\varepsilon_j = \frac{\sum_i \bar{F}_{a_{i_j^+}}}{4} - \frac{\sum_i \bar{F}_{a_{i_j^-}}}{4} \qquad s_{\varepsilon_j} = \frac{1}{4} \times \sqrt{\frac{\sum_i (gl_i \times s_i^2)}{\sum_i gl_i} \sum_i \frac{1}{n_i}}$$ [2]

	Fatores				Interações		
	T = ZSA	Z = TSA	S = ATZ	A = TZS	AS = TZ	ZA = TS	ZS= TA
E1	-	-	-	-	+	+	+
E2	+	-	-	+	-	-	+
E3	-	+	-	+	-	+	-
E4	+	+	-	-	+	-	-
E5	-	-	+	+	+	-	-
E6	+	-	+	-	-	+	-
E7	-	+	+	-	-	-	+
E8	+	+	+	+	+	+	+
Efeito ε_j	-0,35	-0,34	3,46	1,53	0,85	0,37	0,24
Erro s_{ε_j}	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$t_j = \varepsilon_j / s_{\varepsilon_j}$	1,00	0,97	9,89	4,37	2,43	1,07	0,69
$\lvert t_j \rvert > t_{crit}$	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não

Tabela 1. Descrição das formulações e teste t de significância dos efeitos, com $t_{crit}(\alpha = 5\%) = 2,03$

Conclusões

O planejamento fatorial evidenciou a viabiliadade de se otimizar a adesão BN/Zn estritamente por alterações na formulação, sem a necessidade de se aumentar o teor de Co. Além de aprofundar a compreensão sobre esse fenômeno de adesão, este estudo contribuiu para dar visibilidade ao tema dentro da comunidade científica.

Referências e Agradecimentos

1. SHI XIAODONG *et al.* Studies on Adhesion of Zinc to Rubber, Part I: Direct Adhesion between Zinc Plated Steel Cord and Rubber During Vulcanization. **Journal of the Society of Rubber Industry**, Japan, v. 74, n. 5, pp. 196-201, 2001.
2. BOX, George E. P.; HUNTER, J. Stuart; HUNTER, William G. **Statistics for experimenters**: design, innovation, and discovery. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 672 p.
3. VAN OOIJ, W. J. Rubber-brass bonding. In: **Handbook of Rubber Bonding**. Rapra Technology Limited, 2003. pp. 163-195.

CAPES
VALE