



USO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS PARA AVALIAR PARÂMETROS NA VULCANIZAÇÃO DA BORRACHA

Amanda Faria Baruel, Sergio Luis Graciano Petroni, Sandra Aparecida Coelho de Mello e
Silvana Navarro Cassu¹

Abstract: Design of Experiments (DoE) is a crucial tool for optimizing processes and improving product quality. This study employs DoE to assess the effects of adding Chlorobutyl Rubber (CIIR) and organophilic clay to a Natural Rubber (NR) mixture. The properties analyzed were scorch time (ts1), reversion (R), and modulus at 100%. A factorial design was applied to investigate the effect of the proportions of NR, CIIR, and clay in these properties using a 2² factorial system. Results indicated that both CIIR and clay significantly impact ts1 and R, while only the clay affects the modulus. These findings are essential for optimizing rubber formulations, enhancing both the process and material resistance.

Keywords: (3-4) Factorial Design, Chlorobutyl Rubber, Organoclay

1. INTRODUÇÃO

O planejamento de experimentos (DoE) é uma poderosa ferramenta de pesquisa científica e industrial para otimizar processos, melhorar a qualidade do produto e obter *insights* sobre sistemas complexos. Essa ferramenta fornece modelos preditivos para estimar os principais efeitos de diferentes fatores com o menor número de experimentos possíveis (BERGER, 2002; DEMING, 1988).

Este trabalho tem como objetivo utilizar o DoE em uma blenda de Borracha Natural (NR) e Borracha Butílica Clorada (CIIR) contendo uma argila organofílica comercial em diferentes teores, para verificar quais fatores, adição de CIIR ou de argila, tem maior interferência nas propriedades de tempo de processamento (ts1), reversão (R) e módulo a 100%. Um delineamento experimental (Tabela I) foi utilizado para investigar as proporções de NR, CIIR e argila, visando uma formulação otimizada por meio de um número reduzido de experimentos. Dada a interdependência entre os valores de NR e CIIR, os experimentos foram planejados considerando esta restrição. A argila utilizada foi a Claytone HY da empresa BYK Additives & Instruments. Os cálculos foram realizados utilizando o planejamento fatorial 2².

Tabela I – Planejamento Fatorial para otimização das proporções de formulação da Borracha.

Variável	Nível (-)	Nível (+)
Proporção NR/CIIR (NC)	100phr/0phr	50phr/50phr
Claytone HY (HY)	0 phr	8phr
Variáveis		
Experimento	NC	HY
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

¹ Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) / Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)



2. RESULTADOS

Os resultados obtidos para as propriedades estudadas são mostrados na Tabela II. A partir desses resultados calcularam-se os principais efeitos e os efeitos secundários dos fatores estudados (Tabela III). Para verificar se os efeitos são significativos, utilizou-se um teste estatístico de hipótese (NETO, 2003), onde o valor de t_4 correspondente a 4 graus de liberdade é 2,776. É considerado estatisticamente significativo o efeito que é maior do que o produto entre t_4 e o erro experimental (MARINHO, 2005). Dessa forma é possível observar que para o ts_1 , os efeitos tanto de NC quanto HY são significativos. Sendo que quando o NC quando varia do nível (-) para o (+) aumenta o ts_1 em 1,345 min apresentando um efeito retardante do CIIR, e o HY diminui em 3,605 o ts_1 apresentando um efeito acelerador da argila. Pode-se observar que existe uma pequena interação NCxHY causando uma diminuição ainda maior do ts_1 quando ambos produtos, CIIR e HY, são adicionados.

Tabela II – Dados obtidos por meio de análises reométricas e mecânicas.

Experimento	NC	HY	ts_1 (min)	R (%)	Módulo a 100% (MPa)
1	-	-	4,50	5,4	0,75
2	+	-	6,71	4,9	0,85
3	-	+	1,76	0,3	1,08
4	+	+	2,24	0,4	1,01

Tabela III – Efeitos principais (NC e HY) e de 2ª ordem (NC*HY) para as propriedades estudadas.

	NC	HY	NC x HY	t_4 x erro
ts_1 (min)	1,345	-3,605	-0,865	0,564
R (%)	-0,200	-4,800	0,300	0,014
Módulo a 100% (Mpa)	0,015	0,245	-0,085	0,014

Para a propriedade de reversão a HY tem o efeito mais significativo diminuindo a reversão em 4,8 %, o NC quando varia do nível (-) para o (+) também diminui a reversão em 0,2 %. Porém o efeito da interação NCxHY aumenta a reversão.

Por fim, para o módulo o efeito do NC não foi considerado significativo, já a adição de argila aumenta o módulo do material, e existe também uma interação NCxHY que apresenta o efeito oposto, diminuindo o módulo.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proporção NR/CIIR e a argila Claytone HY tem efeitos significativos no tempo de processamento e na reversão da borracha. Porém a proporção NR/CIIR não tem efeito significativo no módulo a 100% da borracha. Já que essas propriedades são importantes no preparo e na resistência de borrachas, esses parâmetros auxiliam a encontrar a melhor proporção para otimização do processo.



AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Agência Espacial Brasileira (AEB).

REFERÊNCIAS

BERGER, Paul D. et al. **Experimental design**. CA (USA): Wadsworth Group Belmont, Springer, 2002.

DEMING, S. N. et al. **Chemometrics: A textbook**. Amsterdam: Elsevier, 1988.

MARINHO, M. R. M.; CASTRO, W. B. Planejamento fatorial: uma ferramenta poderosa para os pesquisadores. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2005. Campina Grande. Anais. p. 12-15.

NETO, B. Barros. et al. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**, 2^a ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.