

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA EM COMPÓSITOS PARTICULADOS POLIMÉRICOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE PLANEJAMENTO FATORIAL DE EXPERIMENTOS ¹

Túlio Hallak Panzera²

Antonio Luiz Ribeiro Sabariz,²

Kurt Strecker²

Thiago Henrique da Silva Mendonça³

Resumo

A dificuldade de degradação e armazenamento de rejeitos de pneus vem a cada ano intensificando os problemas ambientais, além da proliferação de insetos e roedores, tornando um resíduo danoso a saúde pública. Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito da incorporação de resíduos de borracha de pneus nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de matriz polimérica, visando à reutilização do resíduo industrial e a obtenção de produtos que atendam aos padrões e normas técnicas da indústria Brasileira. Um planejamento fatorial completo de experimentos do tipo 2^13^1 foi utilizado na análise dos resultados. Os fatores experimentais investigados neste trabalho foram: granulometria (20/30 e 50/80 US-Tyler) e fração em massa (10, 25 e 50%) das partículas de borracha. As variáveis respostas investigadas neste experimento foram: densidade volumétrica, resistência à compressão e porosidade aparente. O compósito fabricado com 25% de fração de borracha e faixa granulométrica 50/80 US-Tyler apresentou propriedades relevantes para aplicações de engenharia.

Palavras-chaves: Compósito polimérico; Resíduo de borracha; Planejamento de experimentos.

STUDY OF THE INCORPORATION OF RUBBER WASTES IN POLYMERIC COMPOSITES THROUGH THE METHOD OF FULL FACTORIAL DESIGN

Abstract

The difficulty of degradation and storage of rejects of tires has increased the environmental problems, besides the proliferation of insects and rodents, becoming a harmful residue to the public health. This work investigates the effect of the incorporation of tyre rubber wastes in the physical and mechanical properties of polymeric composites, aiming to the reuse of this industrial waste and the attainment of products which are in accordance with Brazilian industry standards. A full factorial design of experiments of type 2^13^1 was used in the analysis of the results. The experimental factors investigated in this work were: particle size (20/30 and 50/80 US-Tyler) and fraction in mass (10, 25 and 50%) of rubber particles. The responses investigated in this experiment were: bulk density, compressive strength and apparent porosity. The composite manufactured with 25% of fraction of rubber and particle size of 50/80 US-Tyler exhibited significant properties for engineering applications.

Key words: Polymeric composite; Rubber waste; Full design of experiments.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Doutor. Depto de Eng. Mecânica (DEMEC), Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Campus Sto Antônio, Praça Frei Orlando 170, 36.307-352, S. J. del-Rei, MG.

³ Graduando Eng. Mecânica, DEMEC/UFSJ.

1 INTRODUÇÃO

O aumento do número de veículos que entram em circulação todos os dias favorece o crescimento da quantidade de sucata de pneus. Dados estatísticos mostram que no Brasil são geradas 300 mil toneladas de sucata de borracha por ano, das quais apenas 10% são reciclados. Nos Estados Unidos, onde a população não chega a ser o dobro da brasileira, os níveis de sucata de borracha por ano é dez vezes maior, sendo que somente 5% são reciclados. Atualmente, mais de 300 milhões de pneus são armazenados nos Estados Unidos.⁽¹⁾

Pneus constituem-se em um dos grandes problemas ambientais modernos, quando se tornam inservíveis as necessidades da sociedade, são objetos perceptíveis e incomodamente volumosos que precisam ser armazenadas em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de mosquitos e roedores. A disposição em aterros torna-se inviável, já que apresentam baixa compressibilidade e degradação muito lenta. Além disso, quando enterrados, tendem a subir e sair para a superfície. Considerando a dificuldade para a disposição de carcaças de pneus em aterros sanitários e a falta de uma legislação para controle da destinação adequada desses resíduos, existe uma tendência da população em abandonar os pneus em cursos de água, terrenos baldios e beiras de estradas, que agravam ainda mais o problema.⁽²⁻⁵⁾

Soluções inovadoras de reciclagem de pneus têm sido o foco de inúmeras pesquisas, entre elas: adição da borracha do pneu em misturas de concreto e asfálticas;⁽⁶⁻⁹⁾ incineração dos pneus para a produção de vapor^(10,11) e reutilização da borracha do pneu em um número de produtos plásticos e de borracha.⁽¹¹⁾

A maioria dos trabalhos publicados sobre o reaproveitamento da borracha de pneus foca no estudo de partículas de borracha de granulometria mais grossa até 30 US-Tyler em matrizes cimentícias.⁽⁶⁻¹¹⁾ O presente trabalho representa o início de uma série de experimentos que irão investigar o efeito da adição de frações granulométricas mais finas de borracha em matrizes poliméricas.

Além das propriedades estruturais desejadas, outros fatores como absorção de impacto e vibrações mecânicas são de grande interesse no projeto de engrenagens e bases de máquinas de precisão, podendo estas ser alcançadas através do efeito da fase polimérica tipo elastômero adicionada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os compósitos particulados podem ser classificados como sendo um material contendo duas fases principais, a fase dispersa composta por partículas e a fase matriz, contínua e responsável pela adesão da mesma. A fase matriz utilizada neste experimento foi a resina polimérica do tipo termorrígida fenólica, sendo fornecida pelo fabricante Foseco SA (São Paulo-SP). A fase dispersa constituiu-se de partículas de borracha de pneus coletadas da empresa Mantiqueira Recauchutadora de Pneus (São João del Rei-MG).

Os fatores experimentais investigados foram: granulometria e fração em massa das partículas de borracha de pneus. As partículas de borracha foram classificadas nas faixas granulométricas 20/30 US-Tyler e 50/80 US-Tyler utilizando-se um peneirador mecânico. Os fatores mantidos constantes no experimento foram: tipo de matriz (resina fenólica), tempo de mistura (5 min) e tempo de cura (7 dias). Os níveis experimentais dos fatores investigados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Fatores e níveis do experimento

<i>Fatores do experimento</i>	<i>Níveis</i>
Faixa granulométrica (diâmetro da partícula)	1. 20 / 30 US-Tyler ~ (0,84 / 0,59mm) 2. 50 / 80 US-Tyler ~ (0,297 / 0,177mm)
Fração de borracha	1. 10% 2. 25% 3. 50%

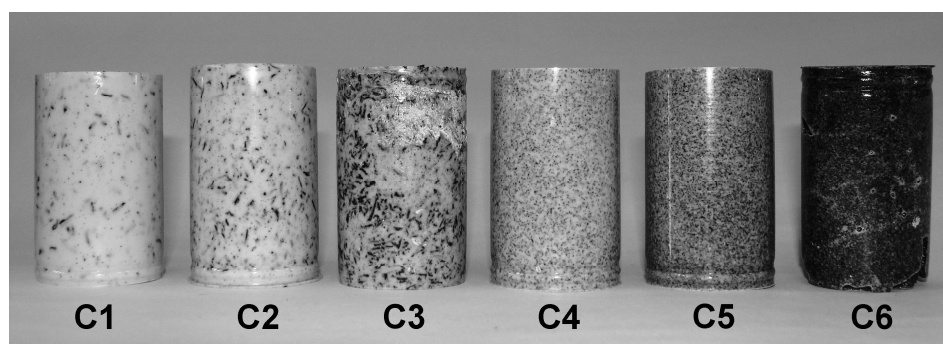
O planejamento fatorial completo do tipo n^k consiste em investigar todas as possíveis combinações dos fatores experimentais (k) e seus respectivos níveis (n). O resultado do fatorial n^k corresponde ao número de condições experimentais analisadas.^(12,13) A partir dos fatores e níveis apresentados na Tabela 1 obtêm-se o planejamento fatorial do tipo 2^13^1 , correspondendo às seis condições experimentais analisadas (Tabela 2).

Tabela 2. Condições experimentais, planejamento fatorial completo (2^13^1).

<i>Condições experimentais</i>	<i>Granulometria (US-TYLER)</i>	<i>Fração de borracha (%)</i>
C1	20/30	10
C2	20/30	25
C3	20/30	50
C4	50/80	10
C5	50/80	25
C6	50/80	50

O método de aleatorização foi adotado na etapa de preparação dos corpos de prova, como também na etapa de realização dos ensaios, permitindo uma ordenação arbitrária das condições experimentais, evitando que efeitos de fatores não-controlados afetassem as variáveis-respostas.^(12,13)

Os corpos de prova foram fabricados utilizando moldes cilíndricos poliméricos de dimensão 29,88 mm de diâmetro e 42 mm de altura. Após o período de cura de sete dias, eles foram sacados e cortados, garantindo o paralelismo necessário para execução do ensaio de resistência à compressão e para determinação da densidade volumétrica. Os ensaios de resistência à compressão e porosidade aparente seguiram as recomendações das normas BS EN 12390-3⁽¹⁴⁾ e BS 10545-3,⁽¹⁵⁾ respectivamente.

**Figura 1.** Corpos de prova / condições experimentais.

Seis corpos de prova foram fabricados para cada condição experimental. Considerando a adoção de duas réplicas e seis condições experimentais, 72 corpos de prova foram fabricados. A réplica consiste na repetição da condição experimental, proporcionando a estimativa do erro experimental de uma resposta individual. A extensão desse erro é importante para decidirmos se existem ou não efeitos significativos que possamos atribuir à ação dos fatores. ^(12,13)

3 RESULTADOS

A técnica estatística DOE (*Design of Experiment*) somada a ferramenta Anova (*Analysis of Variance*) fornece a significância de cada fator experimental sobre as variáveis respostas investigadas no trabalho. Levando em consideração a complexidade dos cálculos envolvidos neste tipo de planejamento, o programa computacional estatístico, *Minitab versão 14* foi utilizado para a manipulação dos dados e análise dos resultados.

A Tabela 3 apresenta os resultados da Análise de Variância (Anova) para as médias das variáveis respostas investigadas. Os fatores relacionados a P-valor menor ou igual a 0,05 (95% de confiabilidade) são considerados significativos, estando estes sublinhados. O efeito principal de um fator deve ser interpretado individualmente apenas se não há evidência de que o fator não interage com outros fatores. Quando um ou mais efeitos de interação de ordem superior são significativos, os fatores que interagem devem ser considerados conjuntamente. ^(12,13)

O valor de R^2 adjunto exibido na Anova mede a proporção da variabilidade presente nas observações da variável resposta y que é explicada pelas variáveis preditoras presentes na equação de regressão. Quanto mais próximo de 1 (ou de 100%) for R^2 , melhor a qualidade da equação ajustada aos dados. ^(12,13)

Tabela 3. Análise de variância (Anova)

ANOVA		P-valor $\leq 0,05$		
	Fatores experimentais	Densidade Volumétrica (g/cm ³)	Resistência à compressão (MPa)	Porosidade aparente (%)
Fatores Principais	Granulometria da borracha	<u>0,000</u>	0,148	0,802
	Fração de borracha	<u>0,001</u>	<u>0,000</u>	0,000
Interação de	Granulometria da borracha* Fração de borracha	0,067	0,402	<u>0,013</u>
	R^2 (adjunto)	95,39%	95,78%	99,01%

Os resultados obtidos na Anova são mostrados nos gráficos de “efeitos principais” e de “interações”. Os gráficos de “efeitos principais” são usados para comparar as variações no nível da média, investigando quais fatores possuem efeito significativo sobre a variável-resposta. Gráficos de interações são usados para visualização do efeito de interação de dois ou mais fatores experimentais sobre a variável resposta e comparar a significância relativa entre os efeitos. ⁽¹³⁾

3.1 Densidade Volumétrica

Os valores de densidade volumétrica variaram de 0,84 g/cm³ a 1,06 g/cm³. Os P-valores (0,000 e 0,001) sublinhados na Tabela 3 mostram que os fatores principais “granulometria” e “fração de borracha” afetaram significativamente a variável-resposta. O valor do R² ajustado foi de 95,39%, indicando que a qualidade de ajuste do modelo foi satisfatória. O gráfico de probabilidade normal exibido na Figura 2 valida o modelo da ANOVA adotado neste trabalho, mostrando uma distribuição de pontos próximos a reta.

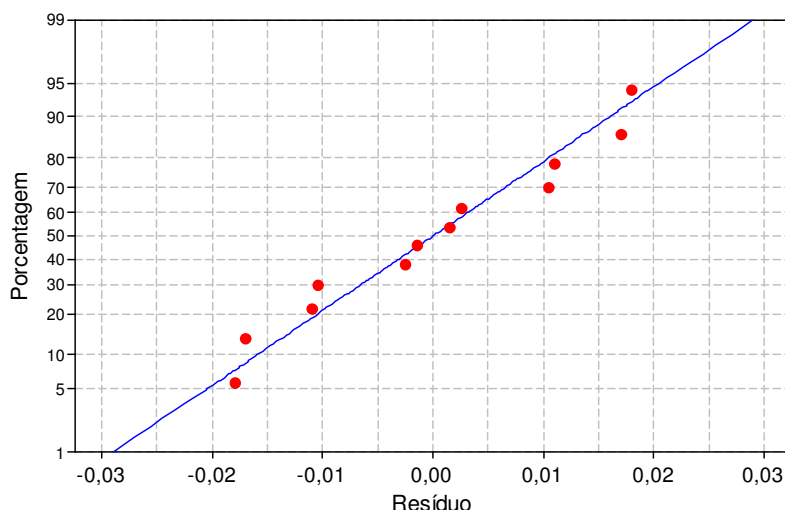


Figura 2. Gráfico de probabilidade normal para a variável resposta densidade volumétrica.

As Figuras 3 e 4 exibem os gráficos de efeitos principais “granulometria” e “fração de borracha”, respectivamente, para a variável resposta densidade volumétrica. Os compósitos fabricados com granulometria de borracha de 20/30 US-Tyler apresentaram uma densidade volumétrica superior àqueles de nível 50/80 US-Tyler, exibindo uma variação percentual de 7,4% entre os níveis experimentais (Figura 3). Este comportamento pode ser explicado pela capacidade das partículas de tamanhos maiores exibirem uma maior densidade volumétrica, fato decorrente da diferença de empacotamento alcançada pelos diferentes tamanhos de partículas. Os compósitos C1, C2 e C3 foram fabricados com o tamanho de borracha 20/30 US-Tyler, apresentando maiores valores de densidade volumétrica.

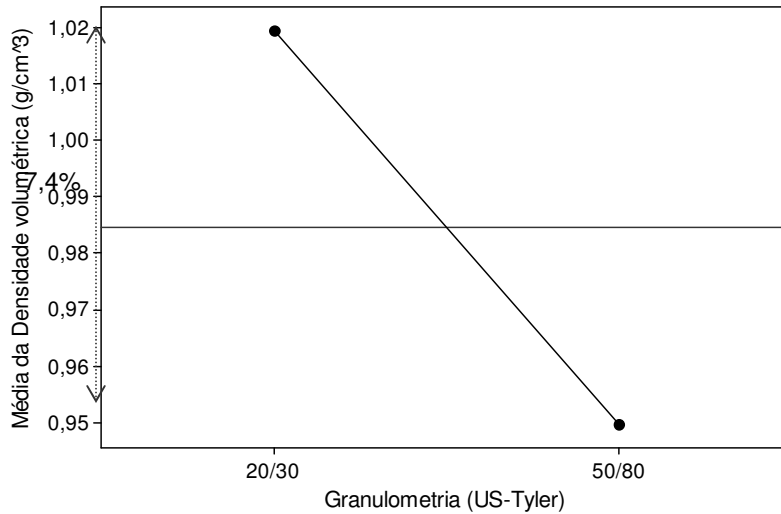


Figura 3. Efeito principal da granulometria de borracha sobre as médias da densidade volumétrica dos compósitos.

O aumento da fração de borracha promoveu uma diminuição percentual da densidade volumétrica dos compósitos de 9,70%. Este comportamento pode ser explicado pela diferença de densidades entre as fases presentes, ou seja, a densidade da matriz polimérica (1,02 g/cm³) ser superior ao das partículas de borracha (0,27 g/cm³ ~ 0,34 g/cm³). Os compósitos C3 e C6 são constituídos de 50% de borracha, exibindo os menores valores de densidade volumétrica.

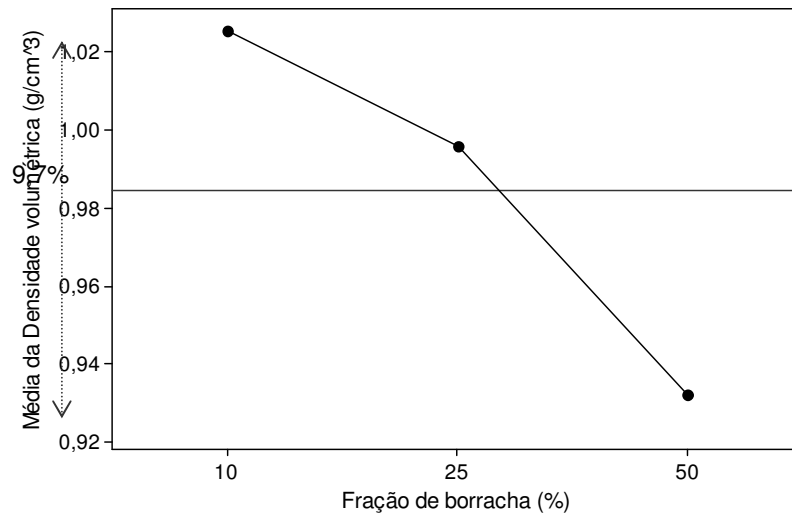


Figura 4. Efeito principal da fração de borracha sobre as médias da densidade volumétrica dos compósitos.

3.2 Resistência à Compressão

Os valores de resistência à compressão dos compósitos variaram de 3,43 MPa a 26,12 MPa. O efeito principal “fração de borracha” foi significativo exibindo uma P-valor de 0,000 (Tabela 3). O valor de R² ajustado de 95,78% indica que o modelo se ajustou adequadamente aos resultados de resistência à

compressão obtidos. O gráfico de probabilidade normal exibido na Figura 5 indica que os dados atendem as condições de normalidade exigidas para validação da Anova.

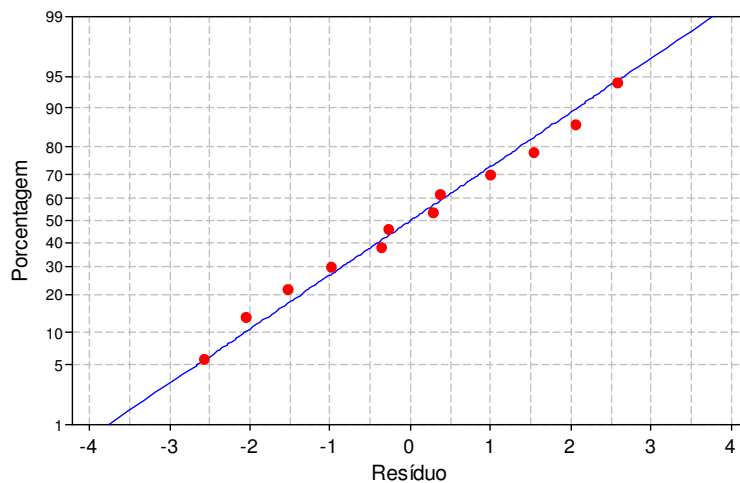


Figura 5. Gráfico de probabilidade normal para a variável resposta resistência a compressão.

A Figura 6 exhibe o efeito principal “fração de borracha” sobre a resistência mecânica dos compósitos. Nota-se uma variação percentual expressiva de 263% entre o menor (10%) e o maior (50%) nível experimental. A diminuição de resistência em função do aumento da fase dispersa de borracha já era esperada, devido à diferença significativa entre as propriedades das fases presentes, ou seja, quanto maior a fase de borracha menor seria a resistência mecânica do compósito. Cabe ressaltar que este comportamento pode ter sido acentuado devido à maior formação de poros apresentado pelos compósitos fabricados com 50% de borracha. A fração de borracha de 25% (C2 e C5) exibiu uma resistência à compressão média de 18,98 MPa, podendo este ser considerado um nível satisfatório, no que diz respeito à considerável quantidade de borracha reaproveitada e a obtenção de um comportamento mecânico aceitável.

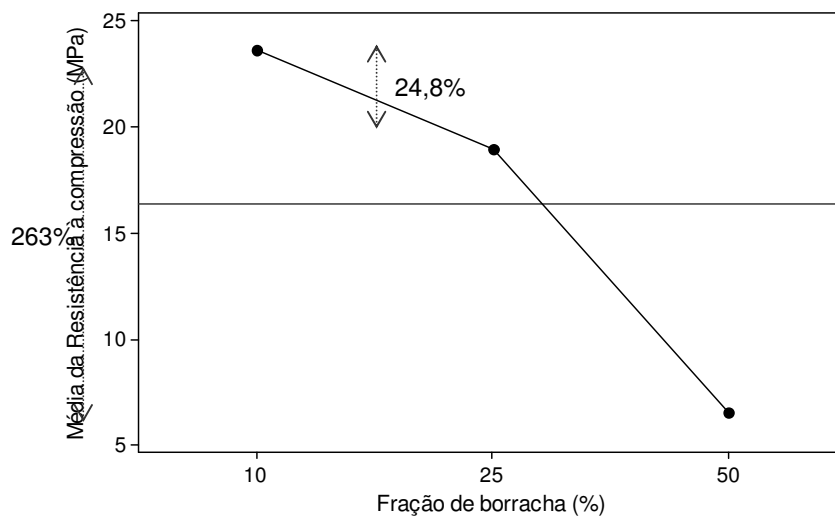


Figura 6. Efeito principal da fração de borracha sobre as médias de resistência a compressão dos compósitos.

3.3 Porosidade Aparente

Os valores de porosidade aparente variaram de 0,38% a 2,89%. A interação de segunda ordem “granulometria e fração de borracha” é significativa exibindo um P-valor de 0,013 (Tabela 4). O valor de R^2 ajustado de 99,01% indica o ajustamento do modelo aos resultados de porosidade aparente obtidos. A Figura 7 exibe o gráfico de resíduos de probabilidade normal para a variável resposta porosidade aparente. Observa-se uma distribuição normal com média próxima de zero, atendendo as condições de normalidade exigidas para validação do modelo da Anova.

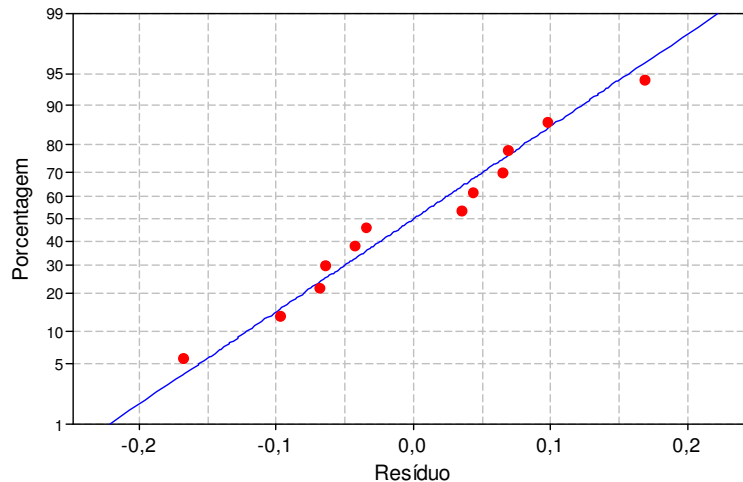


Figura 7. Gráfico de probabilidade normal para a variável resposta porosidade aparente.

A Figura 8 exibe o efeito da interação dos fatores “fração e granulometria de borracha”, observando um aumento expressivo da porosidade aparente em função do aumento da fração de borracha nos compósitos para ambas as frações granulométricas investigadas. A fração granulométrica 20/30 US-Tyler exibiu um aumento médio percentual de 290% entre as frações de borracha de 10% e 50%; por sua vez, uma variação percentual média de 729% foi observada para a granulometria de 50/80 US-Tyler.

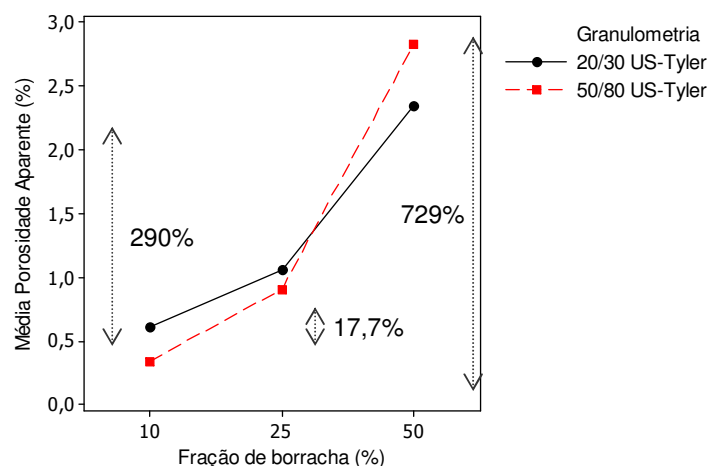


Figura 8. Efeito da interação fração e granulometria de borracha sobre as médias da porosidade aparente dos compósitos.

O fator granulometria exibiu um menor efeito sobre a porosidade aparente comparado com o fator fração de borracha. É possível observar a diminuição da porosidade do compósito quando a fração granulométrica é de 50/80 US-Tyler, ou seja, partículas menores de diâmetros 0,297 mm a 0,177 mm. Nota-se que a maior porosidade aparente ocorreu quando o compósito foi fabricado com 50% de borracha de granulometria 50/80 US-Tyler (C6), tornando esta condição menos indicada na obtenção de compósitos estruturais, assim como observado na análise de resistência mecânica realizada anteriormente. Para a fração de borracha de 25%, os níveis de granulometria exibiram uma diferença percentual média de 17,7% sobre a porosidade aparente, portanto, conclui-se que a condição experimental que melhor atende a quesitos como: percentual de reutilização do resíduo industrial e a obtenção de propriedades para aplicações de engenharia é o compósito C5, fabricado com partículas de borracha entre 50 US-Tyler a 80 US-Tyler.

4 CONCLUSÃO

As propriedades efetivas exibidas pelos compósitos investigados podem revelar-se bastante promissoras em várias áreas da engenharia, como por exemplo, na fabricação de engrenagens poliméricas e estruturas de máquinas de corte, cujas exigências de projeto como elevada resistência mecânica, baixa porosidade aparente devem ser atendidas, permitindo menor desgaste do equipamento e melhores acabamentos das peças no processo de usinagem. Os fatores granulometria e fração de borracha afetaram significativamente as propriedades físicas densidade volumétrica e porosidade aparente, mostrando que o aumento da fração de borracha promoveu a diminuição da densidade e aumento da porosidade; enquanto que a diminuição dos diâmetros das partículas acarretou na diminuição da densidade volumétrica e porosidade aparente. O fator principal fração de borracha exibiu efeito significativo sobre a resistência à compressão, mostrando que o aumento da fração de borracha diminui a resistência mecânica dos compósitos. A condição experimental C5, fabricada com 25% de borracha de granulometria 50/80 US-Tyler, apresenta resultados de resistência mecânica, densidade e porosidade aceitáveis para aplicações de engenharia.

Agradecimentos

À Fapemig pela concessão de bolsa de Pós-doutorado Junior (CEX 00221/06), à empresa Foseco SA pela concessão da resina utilizada como fase matriz e à empresa Mantiqueira Recauchutadora de Pneus pela concessão dos resíduos de pneus utilizados como fase dispersa dos compósitos investigados.

REFERÊNCIAS

- 1 FROZZA, A.A.; CASAROTTO FILHO, N. Uma proposta de rede relacional de empresas: cooperativa de abastecimento para uma usina de reciclagem de borracha, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1999_A0042.PDF Acesso em: 10 out. 2008.
- 2 SINGH, S.S. Innovative applications of scrap-tires. Wisconsin Professional Engineer, p. 14–17, 1993.
- 3 NAIK, T.R.; SINGH, S.S. Utilization of discarded tires as construction materials for transportation facilities. Report No. CBU-1991-02, UWM Center for By-products Utilization. University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, p. 16, 1991.

- 4 NAIK, T.R.; SINGH, S.S. Effects of scrap-tire rubber on properties of hot-mix asphaltic concrete – a laboratory investigation. Report No. CBU-1995-02, UWM Center for By-products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, p. 93, 1995.
- 5 NAIK, T.R.; SINGH, S.S.; WENDORF, R.B. Applications of scrap tire rubber in asphaltic materials: state of the art assessment. Report No. CBU-1995-02, UWM Center for By-products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, p. 49, 1995.
- 6 BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; MEZREB, K.; QUE'NEUDEC, M. Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste, *Cement & Concrete Composites*, v. 28, p. 650–657, 2006.
- 7 HUANG, B.; LI, G.; PANG, S.S.; EGGERS, J. Investigation into Waste Tire Rubber-Filled Concrete, *Journal of Materials In Civil Engineering*, May/June, p.187-194, 2004.
- 8 FATTUHI, N.I., CLARK, L. A. Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber, *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 4, p. 229-236, 1996.
- 9 CHOU, L. H., LU, C.K., CHANG, J.R., LEE, M.T. Use of waste rubber as concrete additive, *Waste Management Research*; v. 25; p. 68-76, 2007.
- 10 BENAZZOUK, A., DOUZANE, O., MEZREB, K., LAIDOUDI, B., QUE'NEUDEC, M. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling, *Construction and Building Materials*, v. 22, p. 573–579, 2008.
- 11 SIDDIQUE, R., NAIK, T.R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview, *Waste Management*, v. 24, p. 563–569, 2004.
- 12 MONTGOMERY, D. C. Introduction to statistical quality control. USA: John Wiley & Sons, 1997.
- 13 WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.
- 14 BRITISH STANDARD. BS EN 12390-3: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 2002.
- 15 BRITISH STANDARD. BS 10545-3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density, 1997.