# ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA EM COMPÓSITOS PARTICULADOS CIMENTÍCIOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE PLANEJAMENTO FATORIAL DE EXPERIMENTOS

T. H. Panzera [*], K. Strecker, A. L. R. Sabariz, M. A. O. de Assis,

[*] tuliopanzera@hotmail.com

Departamento de Engenharia Mecânica - DEMEC, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, Campus Sto Antônio, Praça Frei Orlando 170, São João del-Rei, 36.307-352, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

*A crescente demanda de pneus vem a cada ano agravando os problemas ambientais devido ao descarte indiscriminado na natureza, tornando um resíduo potencialmente danoso à saúde pública. Este trabalho tem como objetivo identificar o efeito da adição da borracha de pneus nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz cimentícia, promovendo a reutilização deste rejeito como um material sustentável. Um planejamento fatorial completo do tipo $2^2 3^1$ foi utilizado na realização do experimento e análise de resultados. Os fatores experimentais investigados foram: granulometria (20/30 US-Tyler e 50/80 US-Tyler) e fração em massa (5%, 15% e 30%) das partículas de borracha e teor de água (35% e 50%) no cimento. As variáveis-respostas investigadas neste experimento foram: densidade aparente, porosidade aparente e resistência à compressão. A interação dos fatores granulometria, fração de borracha e teor de água exibiu efeito significativo sobre a densidade aparente e resistência mecânica. O fator principal granulometria da borracha afetou significativamente a porosidade aparente dos compósitos.*

Palavras-chave: reciclagem, resíduo industrial, borracha de pneu, planejamento de experimento.

## INTRODUÇÃO

O crescente número de veículos que entram em circulação todos os dias promove o aumento acentuado 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 10 vezes superior, 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, acarretando uma série de problemas; 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 [2,3].

A necessidade de desenvolver concreto a partir de matérias-primas não convencionais é indispensável para o meio ambiente e também para o setor econômico na redução de custos [4,5]. Soluções inovadoras de reciclagem de pneus tem sido o foco de inúmeras pesquisas, entre elas: adição da borracha do pneu em misturas de concreto e asfálticas [6,7]; incineração dos pneus para a produção de vapor [8,9] e reutilização da borracha do pneu em um número de produtos plásticos e de borracha [9].

Artigos publicados [9] sobre reaproveitamento de borracha têm investigado a adição da borracha entre as faixas granulométricas de 8 a 35 US-Tyler. Neste trabalho, buscou-se investigar a adição da borracha utilizando partículas mais finas acima de 50 US-Tyler em compósitos cimentícios. Adotou-se o planejamento estatístico de experimento, *Design of Experiment (DOE)*, permitindo identificar os efeitos dos fatores experimentais sobre as variáveis-respostas de interesse, entre elas densidade aparente, resistência à compressão e porosidade aparente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os compósitos particulados de matriz cerâmica em estudo são constituídos de uma fase matriz cimentícia (cimento Portland) e uma fase dispersa polimérica elastômera (resíduo de borracha). A matriz do compósito de cimento Portland ARI PLUS tipo V (ASTM Tipo III) foi fornecida pela empresa Holcim S.A. do Brasil, fábrica de Pedro Leopoldo (MG) e a fase dispersa, de partículas de borracha de pneus, foi coletada na empresa Mantiqueira Recauchutadora de Pneus em São João del Rei (MG).

As variáveis respostas investigadas neste experimento foram três: densidade aparente, resistência à compressão e porosidade aparente.

Dentre os fatores de maior relevância e possíveis de serem controlados, escolheram-se três: faixa granulométrica da fase dispersa (20/30 e 50/80 US-Tyler), fração em massa da fase dispersa (5%, 15% e 30%) e teor de água (35%, 50%) no cimento. Os fatores mantidos constantes no experimento foram: tempo de mistura, tempo de cura (28 dias), temperatura ambiente de fabricação e tipo de matriz (cimento Portand). A Tabela 1 exibe os fatores e níveis experimentais investigados neste trabalho, estabelecendo um planejamento fatorial do tipo $2^2 3^1$, que fornece 12 combinações experimentais distintas (ver Tabela 1).

Tabela 1. Condições experimentais, planejamento fatorial completo ($2^2 3^1$).

| *Condições experimentais* | *Granulometria (US-TYLER)* | *Fração de borracha (%)* | *Teor de água (%)* |
|---|---|---|---|
| C1 | 20/30 | 5 | 35 |
| C2 | 20/30 | 5 | 50 |
| C3 | 20/30 | 15 | 35 |
| C4 | 20/30 | 15 | 50 |
| C5 | 20/30 | 30 | 35 |
| C6 | 20/30 | 30 | 50 |
| C7 | 50/80 | 5 | 35 |
| C8 | 50/80 | 5 | 50 |
| C9 | 50/80 | 15 | 35 |
| C10 | 50/80 | 15 | 50 |
| C11 | 50/80 | 30 | 35 |
| C12 | 50/80 | 30 | 50 |

O método de aleatorização foi adotado na etapa de preparação dos corpos de prova, como também na etapa de realização dos ensaios. Isto permitiu uma ordenação arbitrária das condições experimentais, evitando que efeitos de fatores não-controlados afetassem as variáveis-respostas [10,11].

Os corpos de prova foram fabricados utilizando moldes cilíndricos poliméricos de dimensão 29 mm de diâmetro e 42 mm de altura. Após o período de cura de 28 dias, eles foram sacados e cortados (ver Figura 1), garantindo o paralelismo necessário para execução do ensaio de resistência à compressão e para determinação da densidade aparente. Os ensaios de resistência à compressão e porosidade aparente seguiram as recomendações das normas BS EN 12390-3 [12] e BS 10545-3 [13], respectivamente.

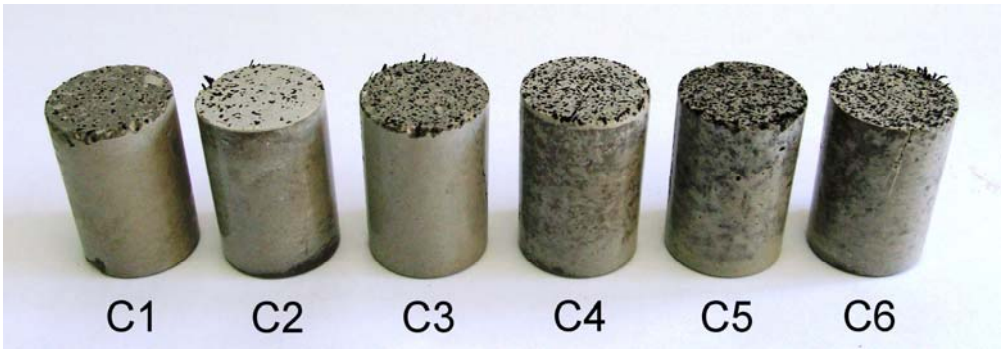

Figura 1. Corpos de prova e condições experimentais.

Cinco corpos de prova foram confeccionados para cada condição experimental. Considerando a adoção de duas réplicas e 12 condições experimentais, 120 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 [10,11].

O *software* estatístico Minitab versão 14 foi utilizado para o tratamento dos dados utilizando a ferramenta *Design of experiment* (DOE) e Análise de variância (ANOVA).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 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 [10,11].

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 [10,11].

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA).

| ANOVA | | P-valor ≤ 0,05 | | |
|---|---|---|---|---|
| | *Fatores experimentais* | Densidade aparente ($g/cm^3$) | Porosidade aparente (%) | Resistência à compressão (MPa) |
| *Fatores Principais* | *Granulometria da borracha* | 0,000 | <u>0,002</u> | 0,000 |
| | *Fração de borracha* | 0,000 | 0,099 | 0,000 |
| | *Teor de água* | 0,000 | 0,358 | 0,000 |
| *Interação de Fatores* | *Granulometria da borracha*Fração de borracha* | 0,246 | 0,242 | 0,001 |
| | *Granulometria da borracha*Teor de água* | 0,161 | 0,495 | 0,497 |
| | *Fração de borracha * Teor de água* | 0,004 | 0,283 | 0,000 |
| | *Granulometria da borracha*Fração de borracha*Teor de água* | <u>0,028</u> | 0,705 | <u>0,000</u> |
| | *$R^2$ (adjunto)* | 98,56% | 81,00% | 99,62% |

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 [10,11]. O gráfico

de resíduo para distribuição normal das variáveis-respostas investigadas neste trabalho apresentaram média próxima de zero, atendendo as condições de normalidade exigidas para validação do modelo da ANOVA.

a) Densidade aparente

Os valores de densidade aparente dos compósitos variaram de 1,54 a 1,91g/cm$^3$. O P-valor (0,028) sublinhado na Tabela 2 mostra que o efeito da interação de terceira ordem "granulometria da borracha, fração de borracha e teor de água" é significativo. O valor de $R^2$ ajustado foi de 98,56%, indicando que a qualidade de ajuste do modelo foi satisfatória.

A Figura 2 exibe o gráfico de interação dos fatores significativos para a variável-resposta densidade aparente.

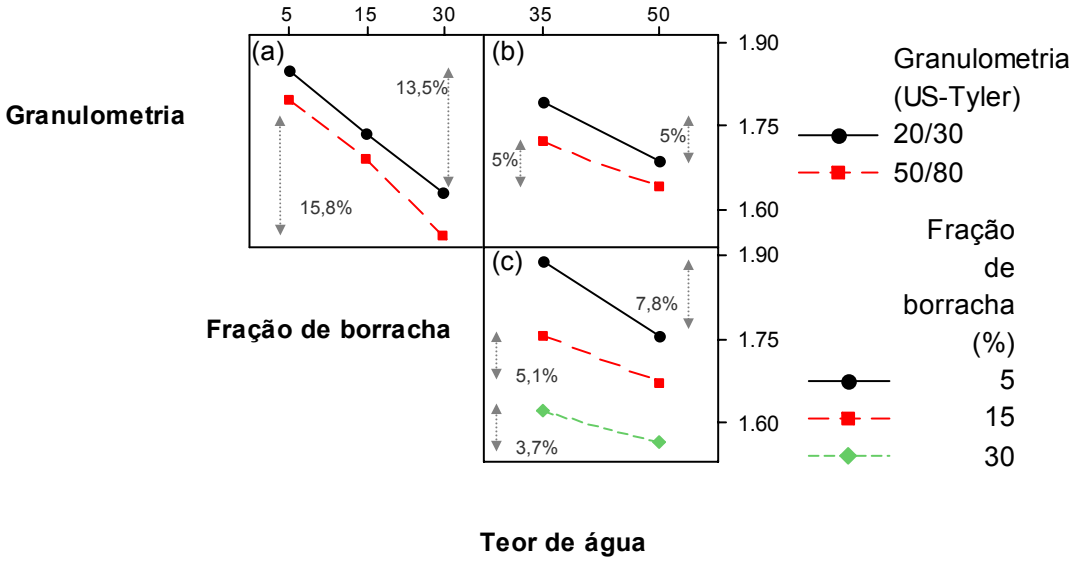


Figura 2. Efeito da interação granulometria, fração de borracha e teor de água sobre a média da densidade aparente dos compósitos.

A Figura 2a exibe o efeito da interação dos fatores "granulometria e fração da borracha" sobre a densidade aparente. Observa-se que a faixa granulométrica de 20/30 US-Tyler de borracha promove uma densidade aparente superior à faixa de 50/80 US-Tyler em todas as frações de borracha investigadas. O fator de empacotamento das partículas de borracha de granulometria 20/30 US-Tyler é superior às partículas mais finas (50/80 US-Tyler), justificando o aumento da densidade. Nota-se também que, quanto maior a fração de borracha, menor é a

densidade aparente do compósito, devido a densidade da borracha ser inferior à matriz cimentícia.

A Figura 2b apresenta o efeito da interação “teor de água e granulometria da borracha”, mostrando um aumento percentual médio de 5% da densidade aparente entre os teores de água 35 e 50%, em ambos os níveis de granulometria. A diminuição de água em compósitos cimentícios promove o aumento da densidade do material devido a menor formação de poros internos ocupados pelo excesso de água no sistema. Verifica-se que a adição de borracha de granulometria 20/30 US-Tyler exibiu valores de densidade aparente superiores à granulometria mais fina (50/80 US-Tyler) nos dois níveis de teores de água.

A Figura 2c exibe o efeito de interação da “fração de borracha e teor de água”, demonstrando que o aumento do teor de água promove a diminuição da densidade aparente em todas as frações granulométricas. Observou-se que quanto maior a adição de borracha, menor foi a variação de densidade entre os níveis de teor de água. O aumento da fase dispersa de borracha no compósito reduz a fração da fase matriz cimentícia, consequentemente, o efeito da água na formação de poros no cimento é menor.

b) Porosidade aparente

Os valores de porosidade aparente variaram de 3,84% a 9,02%. O P-valor (0,002) sublinhado na Tabela 2 mostra que o fator principal “granulometria da borracha” afetou significativamente a variável-resposta. O valor de $R^2$ ajustado de 81% indica o ajuste do modelo adotado aos resultados de porosidade aparente obtidos.

A Figura 3 exibe o gráfico de efeito principal “granulometria da borracha”, para a variável resposta porosidade aparente. Os compósitos fabricados com granulometria de borracha de 20/30 US-Tyler apresentaram uma porosidade aparente superior àqueles de 50/80 US-Tyler, exibindo uma variação percentual de 81% entre os níveis experimentais. Este comportamento pode ser atribuído ao maior fator de empacotamento exibido pelas partículas mais grossas (20/30 US-Tyler), acarretando numa maior quantidade de matriz cimentícia por volume, consequentemente aumentando a porosidade do compósito.

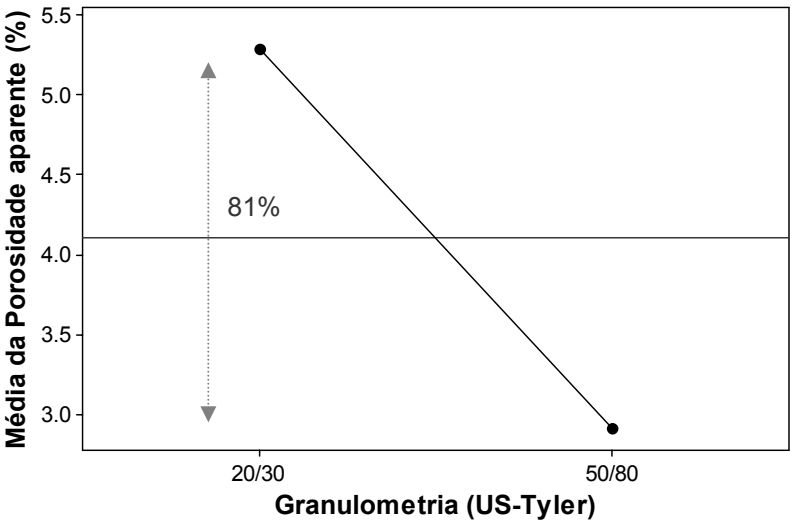


Figura 3. Efeito principal da granulometria de borracha sobre as médias da porosidade aparente dos compósitos.

c) Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão dos compósitos variaram de 6,19MPa a 43,78MPa. A interação de terceira ordem “granulometria da borracha, fração de borracha e teor de água” foi significativa, exibindo um P-valor de 0,000 (ver Tabela 2). O valor de $R^2$ ajustado de 99,62% indica que o modelo se ajustou adequadamente aos resultados de resistência à compressão obtidos.

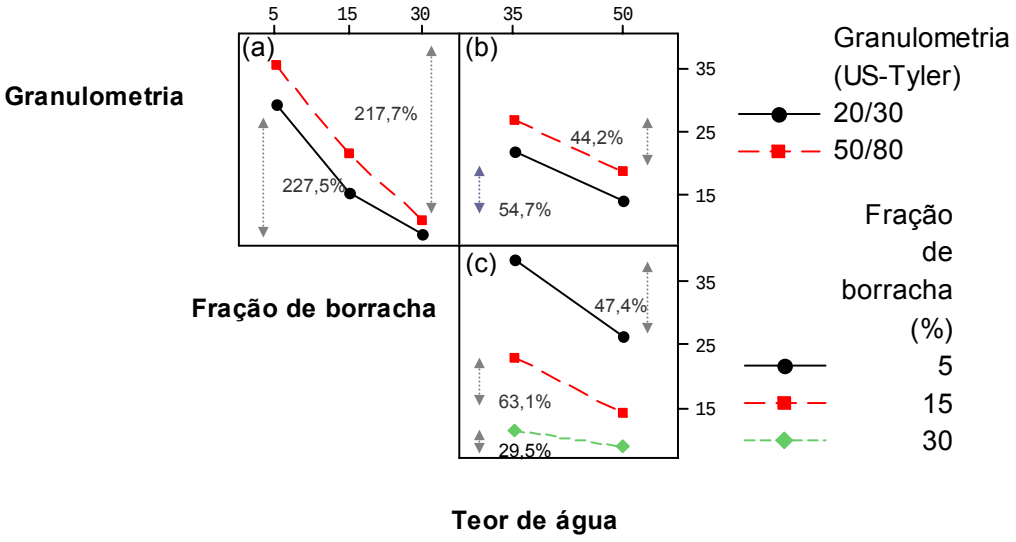


Figura 4. Efeito da interação granulometria, fração de borracha e teor de água sobre a média da resistência à compressão dos compósitos.

A Figura 4a exibe o efeito da interação dos fatores “granulometria e fração de borracha”, observando uma resistência à compressão superior para os compósitos

fabricados com granulometria 50/80 US-Tyler de borracha. Isto pode ser atribuído à maior formação da fase não hidratada C-S na matriz cimentícia devido à ausência de água, promovendo um aumento da resistência mecânica. As partículas mais finas apresentam não somente uma área superficial superior às partículas de tamanhos maiores, como também um menor fator de empacotamento, promovendo a diminuição de água do sistema, consequentemente, gerando uma maior quantidade de produtos não hidratados na fase matriz.

A variação percentual de 217,7% entre o menor (5%) e o maior (30%) nível de fração de borracha pode ser observada (ver Figura 4a). 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.

A Figura 4b apresenta o efeito da interação “teor de água e granulometria”. A faixa granulométrica de borracha de 50/80 US-Tyler apresentou uma resistência à compressão superior à granulometria de 20/30 US-Tyler em ambos os níveis de teor de água. O aumento do teor de água de 35% para 50% resulta em uma diminuição da resistência à compressão de (54,7%) para granulometria 20/30 US-Tyler, e (44,2%) para a granulometria 50/80 US-Tyler. Isto pode ser explicado pelo aumento de porosidade da fase cimentícia em função do aumento do teor de água, diminuindo a resistência mecânica do compósito.

A Figura 4c exibe o efeito da interação da “fração de borracha e o teor de água”, verificando que o aumento do teor de água acarreta na diminuição da resistência à compressão em todas as frações de borracha. Assim como observado no gráfico da Figura 2c, a adição de borracha promove a redução do efeito da água na formação de poros da matriz de cimento e por sua vez na resistência mecânica e densidade.

A Figura 5 exibe o comportamento mecânico de três compósitos durante o ensaio de compressão, sendo fabricados com frações de borracha 5%, 15% e 30% e granulometria (50/80 US-Tyler) e teor de água (35%) constantes. Nota-se duas inclinações distintas nas curvas apresentadas, mostrando um comportamento mecânico inicial bastante similar entre os compósitos. Após a deformação de aproximadamente 0,008 verifica-se uma diminuição do módulo de elasticidade dos compósitos e a queda de resistência em função do aumento da adição de borracha.

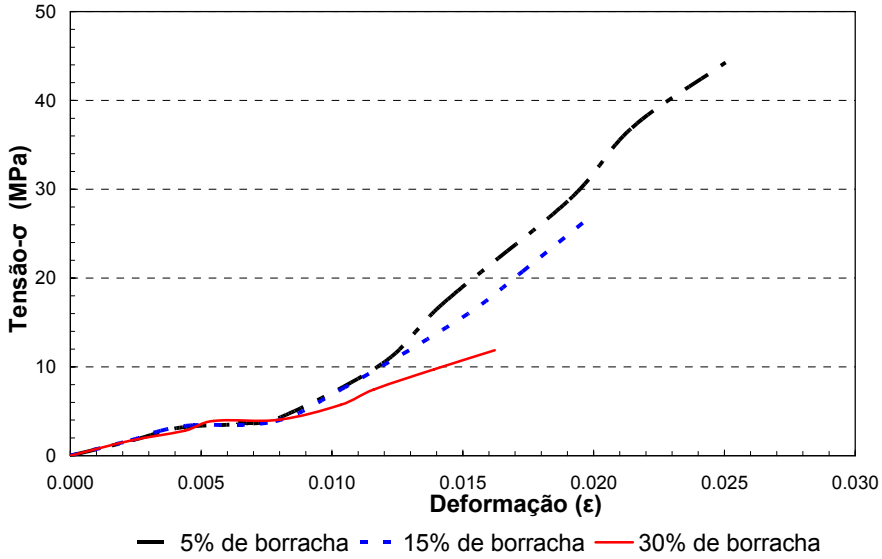


Figura 5. Comportamento mecânico dos compósitos em ensaio de compressão para diferentes frações de borracha.

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados verificou-se que a adição de borracha em compósitos cimentícios é bastante promissora. O fator granulometria da borracha exibiu efeito significativo sobre todas as propriedades investigadas neste trabalho, destacando relevante comportamento para a faixa granulométrica de 50/80 US-Tyler; promovendo menor densidade e porosidade aparente e maior resistência mecânica do compósito. Isto pode ser atribuído ao processo de hidratação do cimento que não será investigado neste trabalho. O aumento do fator fração de borracha promoveu a diminuição da densidade e resistência dos compósitos, contudo as propriedades apresentadas são satisfatórias para várias aplicações da engenharia, possibilitando o reuso deste resíduo industrial como carga em um material compósito sustentável.

## AGRADECIMENTOS

À empresa Holcim S.A. do Brasil, pela concessão do cimento utilizado 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.; 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.

(4) KHALOO, A.R. Crushed tile coarse aggregate concrete. ***Cem Concr Aggreg***, v.17, p.119-125, 1995.

(5) MODESTO, C.; BRISTOT, V.; MENEGALI, G.; BRIDA, M.; MAZZUCO, M.; MAZON, A.; BORBA, G.; VIRTUOSO, J.; GASTALDON, M.; NOVAES DE OLIVEIRA, A.P. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. ***Ceram Industr***, v.8, n.4, p.14-18, 2003

(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) 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.

(8) 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.

(9) SIDDIQUE, R., NAIK, T.R. Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview, ***Waste Management***, v. 24, p. 563–569, 2004.

(10) MONTGOMERY, D. C. ***Introduction to statistical quality control***. USA: John Wiley & Sons, 1997.

(11) 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.

(12) BRITISH STANDARD. ***BS EN 12390-3***: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, 2002.
(13) BRITISH STANDARD. ***BS 10545-3***: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density, 1997.

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

## ABSTRACT

The difficulty of degradation and storage of rejected tires has led to increasing environmental problems, beyond the proliferation of insects and rodents, and is becoming a harmful residue to the public health. This work investigates the physical and mechanical properties of cementitious composites based on tyre rubber wastes in order to achieve a sustainable material. A full factorial design has been conducted to assess the influence of: rubber particle size (20/30 US-Tyler and 50/80 US-Tyler); rubber mass fraction (5%, 25% and 50%); and, water content (35% and 50%) on performance of composite. The material characteristics investigated in this experiment were density, compressive strength and apparent porosity. The interaction factors fraction and particle size of rubber and water content showed significant effect on the apparent density and mechanical strength. The main factor particle size of rubber significantly affected the apparent porosity of the composites.

Keywords: Recycling, industrial waste, rubber of tire, design of experiment.