PREVISÃO DO IMPACTO DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU NO DESEMPENHO MECÂNICO DO CONCRETO

https://doi.org/10.22533/at.ed.8192108111

MEDEIROS; VICTOR AMADEU SANT' ANNA[1]; CRUZ; BRUNA RAMOS DE SOUZA[2]; ALCAZAS; JULIANA CARRASCO[3]; MILANI; ANA PAULA DA SILVA[4]
[1]IFMS; [2]UFMS; [3]UFMS; [4]UFMS;
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: VICTOR.MEDEIROS@IFMS.EDU.BR

RESUMO: Por razões sustentáveis é importante avaliar a influência da inserção de resíduos de borracha de pneus inservíveis no desempenho mecânico de compósitos cimentícios. Diante disso, levantou-se um banco de dados contendo as características de concretos adicionados de resíduos de borracha e analisou-se o desempenho mecânico através de teste de outliers, de normalidade e de frequência. Por último, determinou-se um modelo de regressão com as variáveis tamanho da borracha, teor de borracha, relação água/cimento e resistência à compressão axial. Com os resultados foi possível apresentar a tendência do comportamento mecânico do compósito cimentício com resíduos de borracha.

PALAVRAS-CHAVES: Regressão linear múltipla, concreto, resistência à compressão simples, aplicação de resíduos.

ABSTRACT: For sustainable reason, it is important to evaluate the influence of rubber waste from worn out tires on the mechanical performance of cementitious composites. With this purpose, a database was created containing the characteristics of concrete added with rubber waste. So, the mechanical performance could be analyzed through outlier's tests, normality tests and frequency tests. After that, a model of regression was made with the variables: rubber size, rubber content, water/cement ratio and resistance to compression. With the results it was possible to present the tendency of the mechanical behavior of the cementitious composite with rubber residues.

KEYWORDS: Multiple linear regression, concrete, axial compressive strength, waste reuse.

1 | INTRODUÇÃO

Uma forma de uso das partículas de borracha de pneus é na matriz cimentícia, ou seja, em argamassas, concretos, e outros artefatos, criando um compósito cimentício com características vantajosas no que diz respeito ao melhoramento do desempenho térmico e acústico, ductibilidade e durabilidade desses materiais(1).

A melhora no desempenho térmico do concreto foi constatada por Shah et al.(2) que identificou o aumento da resistência térmica com aumento do teor de borracha no compósito. Nos estudos de Holmes et al.(3) e de Mohammed et al.(4) foi identificada a propriedade de melhor absorção sonora com a utilização de borracha de pneus. Além disso, a adição de fibras de borracha na mistura de concreto aumenta a resistência

à tração na flexão, bem como há a redução no módulo de elasticidade no concreto incorporado, o que indica maior ductibilidade[1],[5].

Outra propriedade relevante dos compósitos cimentícios com borracha é a durabilidade. No estudo de Yung et al.[6] com borracha de pneus inservíveis em pó, foi possível obter concretos com menores níveis de corrosão. Gupta et al. [1] verificaram que a profundidade do desgaste a abrasão nas condições mais adversas é inferior aos limites normativos, em misturas com inclusão de cinzas de borracha e fibras de borracha, o que demonstra melhora de resistência à abrasão. Entretanto, Torgal et al.[7] realizaram um levantamento de trabalhos científicos sobre o tema, e concluíram que a durabilidade ainda necessita de maiores investigações. Ainda devem ser abordadas questões como a influência dos resíduos nas diferentes propriedades do concreto e de como o processamento e a preparação das partículas de borracha de pneu inservível pode melhorar a durabilidade do concreto.

Assim, o presente trabalho, por meio da utilização de *database*, parametrizou as métricas tamanho e quantidade de borracha de pneus, relação água/cimentícios (a/c) e suas influências frente a propriedade mecânica do concreto para a estimativa de resistência à compressão dos compósitos de concreto adicionados de partículas de borracha de pneus inservíveis.

2 | MÉTODOS

Para correlacionar a incorporação da borracha de pneu nos compósitos cimentícios com parâmetros de desempenho foi utilizada a *database* de Alcazas[8], construída por meio do levantamento bibliométrico abrangendo o período de 1999 a 2017.

Para a seleção dos artigos científicos foi aplicado a medida de aderência ao tema concreto com borracha de pneu, sendo descartados os dados de artigos que continham cinza de borracha, resíduos de pneus de origem polimérica e outros compósitos - como argamassa.

Com o montante de 45 pesquisas selecionadas, foi realizada a extração de diversos dados, como: tipo de aplicação do concreto; origem, tamanho e quantidade da borracha; consumo de cimento; relação água/cimento; tipos de ensaios realizados nas pesquisas. Para a extração de dados dos gráficos desses artigos foi utilizado o software livre *WebPlotDigitalizer*.

Em todas as publicações selecionadas foram realizados ensaios mecânicos de compressão axial, sendo que na maioria dos estudos (~85%) não foi feito nenhum tratamento no resíduo da borracha de pneu. A forma de aplicação do resíduo de borracha nas misturas cimentícias foi feita por substituição na maior parte da bibliografia, sendo que em 62% dos estudos foi feita a substituição como agregado miúdo.

Para isolar ao máximo a diversidade da composição do concreto foi utilizado um critério de amortização nomeado aspecto de relação (A.R.) para o conjunto de dados de cada artigo analisado. Este indicador é a resultante da relação entre os dados encontrados para o valor de resistência à compressão simples do concreto com a porcentagem X% de borracha incorporada (V.S.X%) e o valor, do concreto sem borracha (V.S.0%), Equação (1).

$$A.R. = \frac{V.S_{x\%}}{V.S_{0\%}} \quad (1)$$

2.1 Avaliação do comportamento mecânico

Esta análise da *database* partiu da reunião das pesquisas selecionadas em agrupamentos com características similares de tamanho da borracha e de relação a/c para a verificação da influência destas variáveis na A.R resistência à compressão simples do concreto conforme o aumento do teor da borracha adicionado no compósito cimentício. Esses agrupamentos, ou grupos, estão destacadas na Tabela 1.

Grupos	Limites (mm)			Grupos	Relação a/c
	Mínimo	Máximo	Denominação		
I1		<0,6	Finos	A2	0,55<A2≤0,60
I2	≥0,6	<4,75	Fragmentada	A3	0,45<A2≤0,55
I3	≥4,75	<12,5	Granulada	A4	A2≤0,45
I4	≥12,5	<50	Pedaços		

Tabela 1 – Agrupamentos adotados para tamanho dos resíduos de borracha de pneus (esq.) e para agrupamentos da relação a/c (dir.).

Fonte: Autores (2021).

Nesta etapa, os resultados encontrados das correlações existentes da *database* foram analisados estatisticamente pela aplicação do teste de *outilers*, teste de normalidade e de frequência. Para a análise dos valores amostrais discrepantes foi utilizado o Critério de Chauvenet aplicado aos erros entre o A.R. real e o estimado. O teste de Chauvenet foi realizado segundo as instruções e especificações de Holman[9], e os pontos discrepantes foram retirados, sendo geradas novas correlações com melhor coeficiente de determinação (R-quadrado).

No teste de normalidade foi utilizado o programa *Rstudio*, sendo adotado o teste Shapiro-Wilk em um valor amostral de 3 a 5.000 amostras, e o nível de significância considerado normal *p-value* maior que 0,05. Se F<0,05, a hipótese nula é descartada e a variável aleatória adere a distribuição Normal.

2.2 Equação de regressão linear múltipla

O A.R resistência à compressão simples do concreto com adição de borracha de pneus inservíveis (σ_{AR}) foi definida como a variável dependente, enquanto as variáveis independentes definidas foram: tamanho da borracha ($T_{borracha}$) em mm; o percentual de borracha ($B_{\%}$); e a relação a/c ($R_{a/c}$).

Após a obtenção dos parâmetros que definem a equação de regressão linear múltipla (RLM), foi realizada a análise dos dados gerados utilizando o software *Excel* para determinar se as variáveis independentes utilizadas realmente são capazes de ajudar na previsão da variável dependente e se o modelo é adequado ou deve ser descartado. Para tanto foram analisados: F de significância global (ANOVA), p-valor de cada variável

independente, R-quadrado e R-quadrado ajustado.

O teste ANOVA serviu de parâmetro de confirmação das variáveis no modelo, com nível de confiança considerado foi de 95% e hipótese nula de que os coeficientes da regressão são nulos. Assim, quando o valor-p do F de significação global do modelo é menor que 0,05 rejeita-se a hipótese nula e se confirma que ao menos uma das variáveis são significativas para o modelo. A seleção das variáveis da regressão foi realizada manualmente pelo método de eliminação para trás – *stepwise* - com critério de saída de uma variável quando p-valor>0,05. O R-quadrado ajustado foi escolhido como indicador do grau de ajustamento do modelo quando comparamos regressões com diferentes quantidades de variáveis porque o R-quadrado aumenta com o acréscimo de variáveis ao modelo[10].

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Avaliação do comportamento mecânico

Analisando o comportamento mecânico do concreto com resíduos de borracha de pneus inservíveis (Figura 2) observa-se que houve a diminuição do A.R. resistência à compressão simples tanto quanto foi o aumento da substituição dos agregados graúdos e/ou miúdos pelo resíduo de borracha, independentemente do tamanho da borracha e da relação água/cimento - corroborando relatos de Gupta et al.[11] e Girskas e Nagrockiene[12].

A principal razão da redução das resistências mecânicas deve-se a macroporosidade do concreto com borracha que possui maior teor de ar, atribuído as características da borracha de repelir a água (hidrofóbica) e atrair o ar, diferentemente das características de um agregado natural[13].

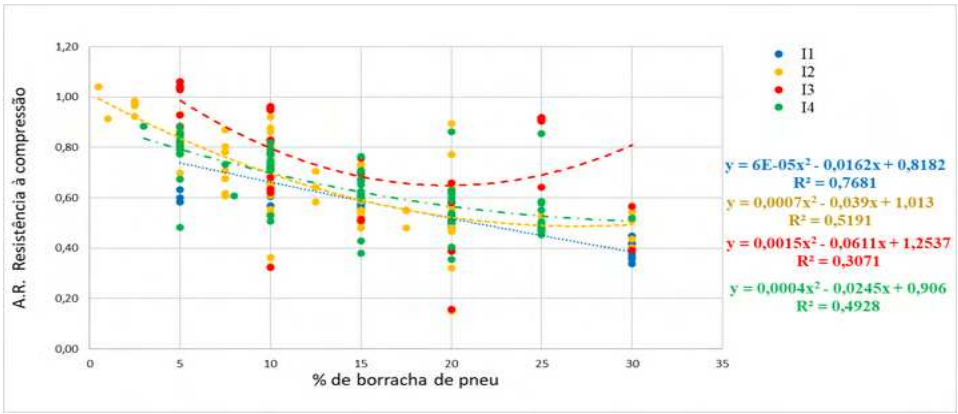


Figura 2 – A.R. da resistência à compressão em relação a quantidade (%) de borracha de pneus inseridas no concreto para agrupamentos de tamanho.

Fonte: Autores (2021).

Pelos valores de R-quadrado da Figura 2, verificou-se que a curva de tendência mais significativa foi a obtida pelo Grupo I1 (Finos), isto porque a maioria dos resultados deste grupo foi proveniente do trabalho de Mohammed e Azmi[13]. Mesmo grupo que teve a queda de resistência a compressão mais acentuada com o aumento da quantidade de borracha.

O Grupo I3 apresentou maior alcance do A.R. resistência à compressão, presumindo que os resíduos de borracha granulares têm menor influência no comportamento mecânico do concreto. Porém, este melhor comportamento foi interferido pelo aumento significativo da curva de tendência a partir da adição da borracha no teor de 25%. Este ponto foi uma exceção, refletindo no menor valor de R-quadrado e teste de normalidade negativo para curva de tendência Grupo I3. O que é condizente aos trabalhos de Gesoğlu et al.[14], que verificou que a perda de compressão é maior nos conteúdos em que a borracha tem tamanho maior (Grupo I4) quando comparada ao I3.

Pelos valores de significância baixos dos R-quadrados indicados, e a diversificação dos estudos quanto ao modo de inserir a borracha e os seus tamanhos, é possível inferir que os tamanhos têm influência diferente em cada grupo. O que afirma que o tamanho da borracha é algo que precisa ser aprimorado, devido a forma variada como os autores dos artigos os apresentam.

A Figura 3 mostrar que a adoção de uma a/c no grupo A3 ($0,45 < a/c \leq 0,55$) promove um maior impacto no comportamento mecânico dos concretos adicionados de borracha em relação ao uso de uma a/c no grupo A4 ($a/c \leq 0,45$). Isto, porque os valores de a/c menores que 0,45 resultam na maior significância da matriz cimentante no comportamento mecânico do concreto convencional do que outros materiais da composição.

O teste de normalidade mostrou resultado negativo para a maioria das regressões e constatou normalidade apenas para o Grupo I1 (finos), o qual é um grupo caracterizado pela composição da maioria dos dados de um único pesquisador. Em regressões a falta de normalidade indica baixa validade dos intervalos de confiança das equações e de testes de hipóteses[15]. Assim, os gráficos analisados servem sobretudo como parâmetro de tendência do comportamento mecânico, mas sem previsibilidade de confiança baseadas na suposição de normalidade.

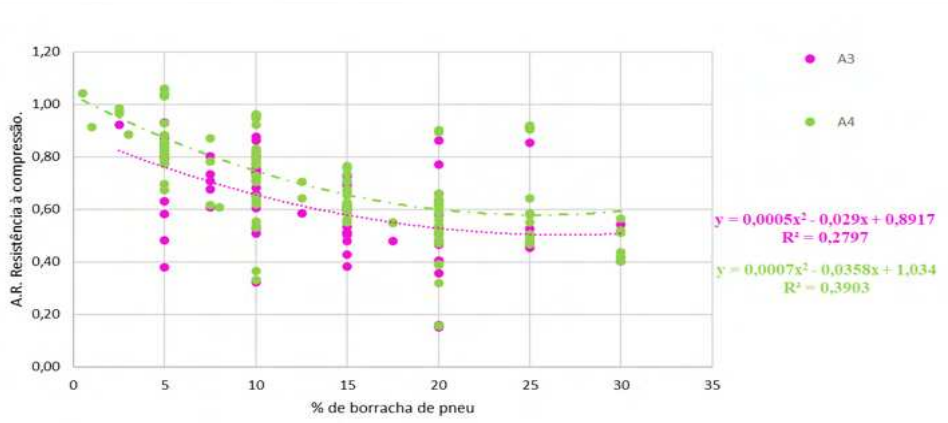


Figura 3 – A.R. da resistência à compressão em relação a quantidade (%) de borracha de pneus inseridas no concreto para agrupamentos de relação a/c.

Fonte: Autores (2021).

3.2 Equação de regressão linear múltipla

Na análise estatística da regressão com três variáveis, o valor obtido para o R-Quadrado foi de 0,457, indicando que a regressão explica 45,7% da variabilidade da resistência à compressão. Como o F de significância global foi menor que 0,05, pode-se concluir que pelo menos uma variável no modelo está relacionada com a variável dependente.

3 variáveis e amostra de 348 dados			2 variáveis e amostra de 169 dados		
	Coeficientes	valor-P		Coeficientes	valor-P
Interseção	1,168	0,000	Interseção	1,168	0,000
$T_{borracha}$	0,000	0,892	$B_{\%}$	-0,016	0,000
$B_{\%}$	-0,016	0,000	$R_{a/c}$	-0,496	0,000
$R_{a/c}$	-0,496	0,000		Coeficientes	valor-P

Tabela 2 – Teste F para significância da regressão com 3 variáveis (à esq.) e 2 variáveis (à dir.).

Fonte: Autores (2021).

Conforme tabela 02, apenas a porcentagem de borracha ($B_{\%}$) e a relação a/c ($R_{a/c}$) estão relacionadas com a variável dependente (valor-p<0,05). Desse modo, a regressão linear com os dados do tamanho da borracha ($T_{borracha}$) selecionados não foi validada pelo teste de valor-p e, portanto, foi retirada pelo critério de saída adotado. Isso se explica pela falta de homogeneidade dos critérios de tamanhos da borracha entre as pesquisas analisadas, que podem ter influência diferente a depender do agrupamento de tamanho a que pertence.

Com duas variáveis, a análise estatística de regressão das variáveis $B_{\%}$ e ($R_{a/c}$) explicaram ~57% da variabilidade de resistência à compressão, para amostra com 348 dados. O R-Quadrado ajustado teve valor semelhante de ~57%, maior que o obtido no modelo com 3 variáveis.

Conforme Tabela 2, pode-se concluir que as duas variáveis independentes do modelo estão relacionadas com a variável dependente, de modo a satisfazerem a escolha delas para a regressão. Assim, a equação de regressão com duas variáveis obtida é dada pela Equação 2:

$$\sigma_{AR} = 1{,}168 - 0{,}016B_{\%} - 0{,}496R_{a/c} \quad (2)$$

A regressão testou negativo para a normalidade, de modo similar as análises bidimensionais. Por isso, como parâmetro de tendência, a análise de regressão múltipla corroborou a influência inversa que a quantidade de borracha e a relação a/c têm sobre a resistência.

4 | CONCLUSÕES

A inserção da borracha de pneu nos concretos diminui a resistência à compressão, de modo que se deve ter atenção para que os traços de concretos com borracha tenham baixa relação a/c para diminuição da porosidade e melhora do desempenho mecânico.

Apesar da adoção das classes de agrupamento e do fator de ponderação entre propriedades físico-mecânicas do concreto com e sem borracha, a influência dos tipos de concretos necessita ser abordada de forma ampliada para a diminuição da variabilidade dos dados. No entanto, foi possível traçar a tendência do comportamento físico-mecânico do compósito cimentício com borracha.

Assim, as correlações encontradas mostraram a influência da inserção da borracha de pneu inservível no compósito cimentício, bem como a potencialidade de uso de uma *database* como ferramenta para a previsibilidade da resistência à compressão do concreto com inserção de materiais reutilizáveis.

REFERÊNCIAS

1. GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**., 73, p. 562–574, 2014.

2. SHAH, S. F. A.; NASEER, A.; SHAH, A. A.; ASHRAF, M. **Evaluation of Thermal and Structural Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate** © King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia. 2014.

3. HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. **Construction and Building Materials** 73, p. 195–204, 2014.

4. MOHAMMED, B. S.; HOSSAIN, K. M. A.; SWEE, J. T. E.; WONG, G. Properties of crumb rubber hollow concrete block. **Journal of Cleaner Production** 23, p. 57-67, 2012.

5. FARHAD, A. Mechanical Properties of Waste Tire Rubber Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28. 2016. p. 040151521-0401515214.

6. YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 665–672, 2013.

7. TORGAL, F. P.; DING, Y.; JALALI, S. Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): an overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p.714, 2012.

8. ALCAZAS, J. C. **Durabilidade dos compósitos cimentícios adicionados de borracha de pneus inservíveis**. 2018. Trabalho de Conclusão Final de Curso (Mestrado em Eficiência Energética e Sustentabilidade) - Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2018.

9. HOLMAN, J. P. Capítulo 3: Análise de Experimental Dados. Subitem: 3.8 The Gaussian or Normal Error Distribution. **Experimental Methods for Engineers**. 8ª edição. New York. The McGraw-Hill Companies, 2012.

10. RODRIGUES, S. C. **Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática), Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

11. GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. **Journal of Cleaner Production** 112, p. 702-711, 2016.

12. GIRSKAS, G.; NAGROCKIENĖ, D. Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. **Construction and Building Materials**, v.140, p. 36-42, 2017.

13. MOHAMMED, B. S.; AZMI, N. J. Strength reduction factors for structural rubbercrete. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v.8, p. 270-281, 2014

14. GESOĞLU, M.; GÜNEYISI, E.; HANSU, O.; İPEK, S.; ASAAD, D. S. Influence of waste rubber utilization on the fracture and steel–concrete bond strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p.1113–1121, 2015.

15. PINO, F. A. A questão da não normalidade: uma revisão. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 61, n. 2, 2014. p. 17-33.