

## **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A ALTAS TEMPERATURAS DO BETÃO COM AGREGADOS RECICLADOS DE BORRACHA DE PNEU**



**João Paulo C.  
Rodrigues\***  
Professor  
UC - Coimbra  
Portugal



**Cristina Calmeiro  
dos Santos**  
Professor Adjunto  
Instituto Politécnico  
de Castelo Branco  
Portugal

**Palavras-chave:** betão, agregados reciclados, borracha de pneu, temperatura, resistência à compressão.

### **1. INTRODUÇÃO**

A sustentabilidade é uma preocupação para a indústria da construção civil, uma vez que é responsável pelo consumo de uma grande quantidade de recursos naturais e por impactos ambientais. Por outro lado, o depósito de pneus usados é um dos problemas de maior impacto para a natureza, pelo que nos últimos anos se têm desenvolvido esforços para contornar esta situação.

O processo de reciclagem tem sido estudado como uma alternativa viável à eliminação dos pneus usados, reduzindo os problemas ambientais. Neste âmbito, uma das alternativas com maior potencial de atribuição de destino aos pneus usados, através da sua reciclagem, é a introdução deste tipo de material em projetos de engenharia civil. Além disso, o aumento do consumo de cimento e agregados naturais na construção civil levantou um problema de não sustentabilidade dos recursos naturais. Tais considerações confirmam a necessidade de individualizar tecnologias inovadoras e materiais alternativos para melhorar não só o nível de desempenho do betão mas, acima de tudo, apoiar a política de proteção ambiental.

---

\* Autor correspondente — Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Rua Luís Reis Santos. Polo II da Universidade. 3030-788 Coimbra. PORTUGAL. Telef.: +351 239 797237 Fax: +351 239 797242. e-mail: jpaulocr@dec.uc.pt

Os agregados reciclados de borracha de pneu são um material muito promissor na indústria da construção civil devido às características inerentes a este material: leveza, elasticidade, absorção de energia, propriedades térmicas e acústicas.

O betão é um material de elevada utilização na construção civil, em virtude de ser económico, fácil de obter, com boa durabilidade, bom desempenho à compressão e bom comportamento ao fogo, uma vez que é um material incombustível e apresenta uma baixa condutibilidade térmica. No entanto quando sujeito a temperaturas elevadas sofre transformações físicas e químicas que podem ser responsáveis pela redução da sua capacidade resistente. Um dos fatores responsáveis por estas transformações é a baixa permeabilidade do betão que resulta na acumulação de pressão nos poros existentes no interior, impedindo a fuga do vapor de água gerado durante o incêndio. Uma das soluções poderá ser a inserção de agregados de borracha no betão, uma vez que aos 300°C carbonizam, criando vazios no betão o que possibilita a fuga de vapor de água e reduz o risco de fendilhação que se desenvolve durante a fase de retração plástica do betão.

De entre os vários autores que se têm concentrado no estudo da utilização de diferentes quantidades, formas e tamanhos de agregados reciclados de borracha no betão, temos Olivares et al que realizaram vários ensaios destrutivos e não destrutivos de forma a obterem quantidades ótimas de agregados de borracha de pneus nas misturas de betão.

O trabalho desenvolvido por Olivares et al consistiu no estudo de um betão de alta resistência com sílica de fumo. Os agregados de borracha apresentavam uma temperatura de degradação de 175°C e uma temperatura de combustão a 200°C. Assim, realizaram 4 composições de betão, um betão de referência e três com agregados de borracha (3, 5 e 8%). Foram produzidos 6 provetes cúbicos de forma a determinar a resistência das várias composições à temperatura ambiente. A conclusão mais evidente é a diminuição da resistência do betão com o aumento da taxa de agregados de borracha inseridos [1].

Os autores estudaram também o comportamento ao fogo das referidas composições de betão. Para o efeito realizaram provetes prismáticos de cada composição, que posteriormente foram expostos a altas temperaturas segundo a curva ISO 834 até atingirem a temperatura de 1000°C. No betão de referência a curva relativa à temperatura na superfície externa sofreu um aumento acentuado porque, segundo os autores, ocorreu o fenómeno de spalling, no entanto nas composições com agregados de borracha o efeito de spalling não se verificou. Os autores concluíram ainda que a adição de agregados de borracha dificulta a trabalhabilidade do betão de alta resistência [1].

Khaloo et al também estudaram o comportamento do betão após a substituição de agregados minerais por agregados de borracha. Os autores verificaram que o material tornou-se mais dúctil que o material sem agregados de borracha, a rotura ocorreu de uma forma mais gradual e uniforme e que a largura das fendas foi menor que no betão de referência. Os autores concluíram ainda que para concentrações superiores a 25% não era recomendável a substituição do agregado mineral por agregados de borracha uma vez que a diminuição na resistência final era muito significativa [2].

Turki et al estudaram a influência da adição de agregados de borracha na microestrutura da matriz num composto de betão. A adição de agregados de borracha variou entre os 0 e os 50%. Seguidamente os autores observaram as microestruturas das composições de forma a caracterizar as propriedades dos materiais. As misturas foram analisadas através de SEM (Scanning Electron Microscopy). A aplicação deste método permitiu verificar o surgimento de dois tipos de porosidade na matriz de cimento. Sendo a porosidade um fator bastante importante no comportamento químico e físico do betão deve ser um parâmetro devidamente estudado quando é adicionado este tipo de material a compostos cimentícios [3].

Valadares realizou um estudo para avaliar o efeito da utilização de granulados de borracha proveniente de pneus. As proporções dos granulados variaram até 15% em volume. A resistência à compressão sofreu um decréscimo acentuado quando foram incorporados os granulados de borracha. No entanto, quando se optou por substituir apenas os agregados minerais grossos os resultados foram favoráveis. Diferentemente, quando se procedeu à substituição dos agregados finos a resistência sofreu decréscimos significativos, sendo os resultados intermédios quando a substituição foi simultânea. Nesta investigação observou-se também que os métodos de transformação da borracha (trituração mecânica ou processo criogénico) não afetam de forma significativa a resistência à compressão [4].

Marques estudou também o comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha proveniente de pneu, mais especificamente a determinação da degradação das propriedades mecânicas residuais de betões produzidos com diferentes taxas de substituição de agregados grossos e finos (0, 5, 10, 15%) após serem submetidos a temperaturas de 20, 400, 600 e 800°C. Relativamente à resistência à compressão sem exposição térmica, verificou-se uma tendência de decréscimo linear nas misturas com adição de borracha, onde foi registada a variação máxima de 55% em comparação com o betão com maior taxa de adição de granulados de borracha. Esta tendência foi verificada para todas as temperaturas ensaiadas observando-se uma diferença pouco significativa para as temperaturas de 400°C e 600°C [5].

Gesoğlu et al produziram betões auto-compactáveis, substituindo os agregados finos por agregados de borracha (0, 5, 15 e 25% em volume) e substituindo cimento por cinzas volantes. O principal objetivo desta investigação foi estudar a permeabilidade deste tipo de betão e a sua resistência. Relativamente à resistência verificou-se uma redução acentuada nas composições com maior taxa de agregados de borracha. Quanto à absorção de água, aumentou com o aumento de agregados de borracha podendo, no entanto, este efeito negativo ser melhorado com a adição de cinzas volantes [6].

Ho et al estudaram o efeito da adição de agregados de borracha (0 a 4mm) no betão a temperaturas de 20, 40 e 70°C. Foram testadas quatro misturas, uma de referência e três com agregados de borracha. Após a realização dos ensaios verificaram que os provetes com agregados de borracha têm um processo de rotura mais lento do que os provetes de betão sem agregados de borracha. Verificou-se que, para todas as temperaturas ensaiadas, as composições de betão apresentam valores de resistência dentro dos limites usuais para este tipo de betões. Através do método acústico aplicado verificou-se que antes da carga de pico há o aparecimento de microfissuras, sendo a diferença entre a mistura de referência e as misturas com agregados de borracha pouco significativa. Por outro lado, como era expectável, as

misturas com os agregados de borracha tiveram um aumento na qualidade elástica do material [7].

Neste contexto, este trabalho de investigação pretende avaliar as propriedades mecânicas de betões com agregados reciclados de borracha de pneu, submetidos a temperaturas elevadas, estudando especialmente a resistência à compressão do betão. O trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Composição do betão

Os materiais utilizados neste estudo foram cimento Portland (CEM) tipo II/A-L 42.5R, dois tipos de agregados: areia fina (AF) e brita calcária (BC) (6,3 - 16mm) (Figura 1a e 1b). A escolha do cimento deveu-se ao facto de este ser um produto de grande versatilidade, conjugando uma boa trabalhabilidade, elevadas resistências a todas as idades e um bom comportamento ao fogo. A utilização deste cimento também permitia obter um betão de alta resistência.

Neste estudo utilizou-se ainda um agregado de borracha (AB) com dimensão nominal entre os valores 6,3 - 12mm para inserção no betão (Figura 1c). Na determinação da relação água/cimento, teve-se em conta a escassa absorção de água por parte dos agregados de borracha, de modo a evitar a saturação dos outros agregados e a consequente baixa de resistência. Optou-se então por um relação W/C de 0,31.

As composições de betão em estudo apenas diferiram na quantidade de agregados de borracha incorporadas nas misturas. Estudaram-se três composições de betão, uma composição de referência (BR), uma composição com taxa de substituição de 15% (BAB1) e outra com taxa de substituição de 30% (BAB2) de agregados naturais por agregados reciclados de borracha de pneu usados. As diferentes composições de betão são apresentadas no Quadro 1.



Figura 1: Tipos de agregado. a) Areia fina. b) Brita calcária. c) Agregado reciclado de borracha de pneu

Quadro 1: Composição do betão por m<sup>3</sup>

	AB	BC	AF	CEM	W	W/C
	%	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	
BR	0	959,00				
BAB1	15	560,00	567,00	400,00	122,50	0,31
BAB2	30	161,00				

## 2.2 Provetes

Os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos com 75mm de diâmetro e 225mm de altura, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. Os provetes foram providos com cinco termopares tipo K com a finalidade de controlar a evolução da temperatura no seu interior. A localização dos termopares nos provetes foi definida tendo por base as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [8] (Figura 2).

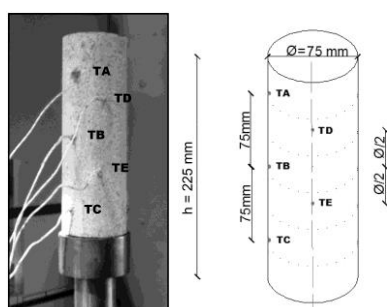


Figura 2: Provetes e localização dos termopares

## 2.3 Plano de ensaios

O trabalho laboratorial realizado compreendeu ensaios de resistência à compressão do betão. Os diferentes provetes de betão foram submetidos a vários níveis de carregamento (0,15; 0,3 e 0,5f<sub>cd</sub>) e a diferentes níveis de temperatura (20, 300, 500 e 700°C).

No Quadro 2 apresenta-se resumidamente o plano de ensaios para cada composição de betão.

Quadro 2. Plano de ensaios

Composição de betão	Temperatura (°C)	Nível de carregamento
BR	20, 300, 500, 700	0,5f <sub>cd</sub>
BAB1	20, 300, 500	0,15f <sub>cd</sub> ; 0,3f <sub>cd</sub> ; 0,5f <sub>cd</sub>
BAB2	20, 300, 500	0,15f <sub>cd</sub> ; 0,3f <sub>cd</sub> ; 0,5f <sub>cd</sub>

## 2.4 Metodologia de ensaio

Do sistema de ensaio fizeram parte uma máquina universal de tração/compressão Servovis com capacidade de carga até 600kN (a), um controlador da máquina de ensaios tração/compressão (d), um forno cilíndrico com uma câmara de aquecimento de 90mm de diâmetro e 300mm de altura (temperatura máxima de 1200°C) (b) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-601 (c). Nos ensaios foram registadas as forças, os deslocamentos e as temperaturas nos provetes e no forno (Figura 3).

O procedimento de ensaio adotado respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [8]. O provete foi submetido a diferentes níveis de carregamento (0,15; 0,3 e 0,5 $f_{cd}$  sendo  $f_{cd}$  o valor de cálculo da resistência à compressão do betão à temperatura ambiente). Foram realizados três ensaios para cada combinação de parâmetros.



Figura 3: Sistema de ensaio

Após ser atingido o nível de carregamento, o provete foi aquecido a uma taxa de 3°C/min, até ao nível de temperatura desejado. Vários níveis de temperatura máxima foram testados (300, 500 e 700°C). Foram também testados provetes à temperatura ambiente para controlo do betão. O nível de temperatura foi considerado atingido quando a temperatura média nos três termopares superficiais do provete em estudo igualava a temperatura do forno. A máxima diferença da temperatura axial entre cada uma das três leituras da temperatura superficial não podia exceder 1°C a 20°C, 5°C a 100°C e 20°C a 700°C. O provete foi mantido a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura, foi realizado o ensaio de compressão. A carga foi incrementada a uma taxa de 0,25kN/s até se atingir a rotura do provete.

## 2.5 Resultados

A Figura 4 apresenta a variação da resistência à compressão com o nível de temperatura máxima de exposição na série de ensaios com carregamento de 0,15 $f_{cd}$  e para as diferentes composições de betão.

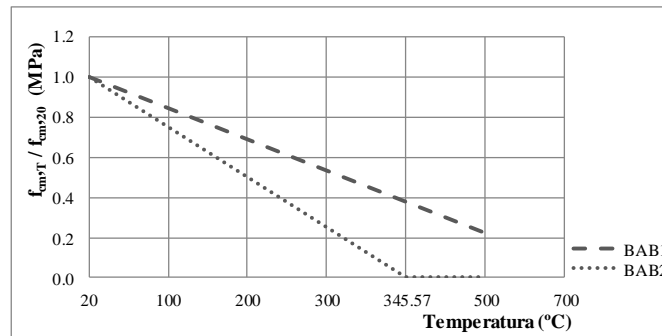


Figura 4: Resistência à compressão dos betões com 15 e 30% de agregados de borracha (BAB 1 e BAB2) em função da temperatura - nível de carregamento de  $0,15f_{cd}$

Da análise da Figura 4 constata-se que a resistência à compressão diminui à medida que a temperatura aumenta. Aos 500°C e para a composição do betão com 15% de agregados de borracha, verificou-se um decréscimo da resistência na ordem dos 78%, obtendo uma resistência de cerca de 22% da resistência à temperatura ambiente. Aos 500°C e para o betão com 30% de agregados de borracha, o procedimento considerado nos ensaios não foi concluído, porque ocorreu rotura antes de terem atingido a temperatura pretendida para a execução dos ensaios.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com carregamento de  $0,3f_{cd}$ , para as diferentes composições de betão e para o nível de temperatura máxima de exposição.

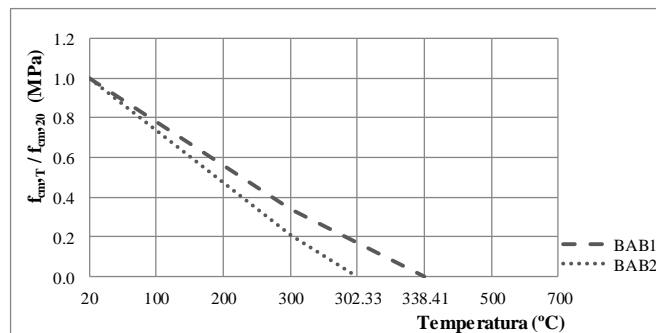


Figura 5: Resistência à compressão dos betões com 15 e 30% de agregados de borracha (BAB1 e BAB2) em função da temperatura - nível de carregamento de  $0,3f_{cd}$

Como se observa na Figura 5, os resultados obtidos para as diferentes composições de betão apresentam um decréscimo de resistência à compressão, sendo a redução para o betão com 30% de agregados de borracha maior do que para o betão com 15% de agregados de borracha.

Aos 300°C e para as composições de betão de 15 e 30% de agregados de borracha, verifica-se uma redução da resistência à compressão de cerca de 66% e 79% respetivamente quando comparada com a resistência à compressão à temperatura ambiente. Aos 500°C e para o carregamento de  $0,3f_{cd}$ , os provetes sofreram rotura antes de se atingir a temperatura desejada não sendo possível ensaiá-los à compressão.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com carregamento de  $0,5f_{cd}$ , para as diferentes composições de betão e para o nível de temperatura máxima de exposição. Da análise da Figura 6 verifica-se que para níveis de temperatura de 300°C apenas foi possível realizar ensaios com o betão de referência e com o betão com 30% de agregados de borracha, uma vez que os ensaios com o betão com 15% de agregados de borracha sofreram rotura antes de os provetes atingirem a temperatura desejada. Aos 300°C verificou-se que a resistência à compressão do betão de referência aumentou cerca de 50% relativamente à resistência à compressão à temperatura ambiente. Esta situação não se verificou para o betão com 30% de agregados de borracha, tendo a resistência à compressão diminuído cerca de 24% quando comparada com a resistência à compressão à temperatura ambiente.

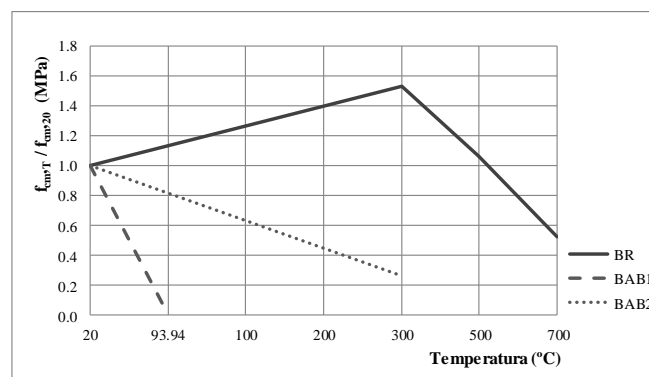


Figura 6: Resistência à compressão do betão de referência (BR) e dos betões com 15 e 30% de agregados de borracha (BAB1 e BAB2) em função da temperatura - nível de carregamento de  $0,5f_{cd}$

Os resultados obtidos permitem concluir que o aumento da percentagem de agregados de borracha reciclados de pneu inserido no betão conduz a um aumento do controlo de fendilhação. Estes estão em concordância com os resultados obtidos por outros autores, os quais constataram também que a utilização de agregados reciclados de borracha de pneu minimiza o surgimento de fissuração de origem térmica [9-12].

### 3. CONCLUSÕES

O trabalho de investigação experimental desenvolvido permitiu extrair as seguintes conclusões:

- os resultados obtidos demonstraram que há um decréscimo na resistência à compressão do betão com a incorporação de agregados de borracha;

- aos 300°C verifica-se que a redução da resistência à compressão do betão com 30% de agregados de borracha é menor quanto maior for o nível de carregamento, devido ao fenómeno de compactação que a força exercida provoca no betão, reduzindo o desenvolvimento de fissuras no seu interior;
- os níveis de carregamento de 0,15 e 0,3 $f_{cd}$  caracterizam-se por registar, uma perda de resistência à compressão mais acentuada em função do aumento da taxa de inserção de agregados de borracha no betão;
- para o nível de carregamento de 0,5 $f_{cd}$ , a resistência à compressão registou a mesma tendência de diminuição, no entanto as composições com maior taxa de inserção de agregados de borracha evidenciaram uma perda mais acentuada de resistência;
- até temperaturas de 300°C e nível de carregamento de 0,5 $f_{cd}$ , os resultados demonstraram que o betão de referência aumentou a sua resistência à compressão em cerca de 50% da resistência à temperatura ambiente, tendência inversa dos betões com agregados de borracha que perderam resistência à compressão. Esta perda é tão mais evidente quanto maior a taxa de incorporação de agregados de borracha.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa RECIPNEU SA a oferta de agregados reciclados de borracha de pneu utilizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] Olivares, F.H., Barluenga, G. - *Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 34, 2004, p. 109-117.
- [2] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. - *Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles*. Waste Management, vol. 28, 2008, p. 2472-2482.
- [3] Turki, M., Bretagne, E., Rouis, M.J., Quéneudec, M. - *Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures*. Construction and Building Materials, vol. 23, 2009, p. 2715-2722.
- [4] Valadares, F.V.S. - *Desempenho Mecânico de Betões com a Incorporação de Borracha Proveniente de Pneus Usados*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009, 249 p.
- [5] Marques, A.F.M. - *Comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010, 195 p.
- [6] Gesoğlu, M., Güneyisi, E. - *Permeability properties of self-compacting rubberized concretes*. Construction and Building Materials, vol. 25, 2011, p. 3319-3326.

- [7] Ho, A.C., Turatsinze, A., Hameed, R., Vu, D.C. - *Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking*. Journal of Cleaner Production, vol. 23, 2012, p. 209-215.
- [8] RILEM TC - 200 HTC - *Mechanical Concrete Properties at High Temperature – Modeling and Applications*. Materials and Structures, vol. 38, 2005, p. 913-919.
- [9] Eldin, N., Senouci, A.B. - *Observations on rubberized concrete behaviour*. Cement, Concrete and Aggregates, vol. 15, 1993, p. 74-84.
- [10] Li, Z., Li, F., Li, J.S.L. - *Properties of concrete incorporating rubber tyre particles*. Magazine of Concrete Research, vol. 50, 1998, p. 297-304.
- [11] Cairns, R., Kenny, M., Kew, H. - *The use of recycled rubber tyres in concrete construction*. The University of Strathclyde, Glasgow, 2004, 91 p.
- [12] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J. L., Hernández, M. - *Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: destructive and non-destructive testing*. Composites Structures, vol. 71, 2005, p. 439-446.