

Concreto com Agregados Reciclados de Borracha de Pneu - Resistência à Compressão a Altas Temperaturas

Santos, Cristina Calmeiro¹, Rodrigues, João Paulo C.²

1: Instituto Politécnico de Castelo Branco, ISISE

ccalmeiro@ipcb.pt

2: Universidade de Coimbra, ISISE

jpaulocr@dec.uc.pt

RESUMO

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. Assim, a utilização de agregados reciclados em substituição dos agregados naturais mostra-se benéfica ao minimizar os impactos ambientais, o consumo de recursos naturais e na redução de alguns problemas urbanos associados à acumulação de lixo. Neste contexto, o trabalho de investigação desenvolvido teve como objetivo o estudo da utilização de agregados reciclados de borracha de pneu na composição do concreto, contribuindo com uma alternativa sustentável para o problema do depósito de pneus após a sua vida útil. O trabalho laboratorial realizado compreendeu ensaios de resistência à compressão do concreto. Estudaram-se três composições de concreto, uma composição de referência, uma composição com uma taxa de substituição de 15% e outra com taxa de substituição de 30% de agregados naturais por agregados reciclados de borracha de pneu usados. Os diferentes provetes de concreto foram submetidos a vários níveis de carregamento ($0,15f_{cd}$; $0,3f_{cd}$ e $0,7f_{cd}$) e a diferentes níveis de temperatura (20, 300, 500 e 700°C). Os resultados obtidos permitiram verificar que o aumento da percentagem de agregados de borracha reciclados de pneu inserido no concreto conduz a um aumento do controlo de fendilhação e minimiza o surgimento de fissuração de origem térmica.

Palavras chave: concreto, agregados reciclados de borracha de pneu, temperatura, resistência à compressão.

ABSTRACT

Sustainability is a concern for the civil construction, since this industry is responsible for consuming a large amount of natural resources and for environmental impacts. Thus, the use of recycled aggregates to replace the natural ones prove beneficial to minimize environmental impacts, the consumption of natural resources and in the reduction of some urban problems associated with the accumulation of waste. In this context, the research performed had the target of study the use of recycled aggregates of tire rubber in the composition of the concrete, and in this way contribute to a sustainable alternative regarding to the problem of tire deposit after its life time. The experimental work performed includes tests of concrete compressive strength. It was considered three concrete compositions, a reference composition, a composition with a replacement rate of 15% and other with a replacement rate of 30% of natural aggregates by recycled tire rubber aggregates. The different concrete specimens were subjected to different loading levels ($0.15f_{cd}$; $0.3f_{cd}$ and $0.7f_{cd}$) and different temperature levels (20, 300, 500 and 700°C). The results achieved allow verify that increasing the percentage of recycled tire rubber aggregates in concrete leads to an increase of the cracking control and minimizes the occurrence of thermal cracking.

Keywords: concrete, tyre rubber recycled aggregates, temperature, compressive strength.

1. INTRODUÇÃO

Os agregados reciclados de borracha de pneu são um material com uma utilização cada vez maior na indústria da construção civil devido às características inerentes ao mesmo: mais leve, maior elasticidade, grande absorção de energia, propriedades térmicas e acústicas melhoradas.

Os primeiros trabalhos realizados para estudar as propriedades do concreto com agregados de borracha mostraram uma menor trabalhabilidade, menor resistência à compressão e à tração e menor tenacidade do concreto, atribuindo o decréscimo das propriedades mecânicas à falta de aderência entre a superfície da borracha e a matriz de cimento (Eldin e Senouci, 1993). Com o intuito de melhorar a aderência entre a borracha e a matriz de cimento e, conseqüentemente, aumentar a resistência à compressão de concreto com agregados de borracha, foram feitos diversos tratamentos superficiais, aplicados nas partículas de borracha (Rostami et al, 1993; Li et al, 1998; Segre, 1999; Albuquerque et al, 2004; Albano et al, 2005).

Outros estudos foram efetuados com o intuito de encontrar o método ideal de aplicação da borracha. As experiências realizadas permitiram observar uma redução da resistência à compressão de cerca de 50% para um volume de agregados de borracha reciclada de 15%. Além disso, a utilização de borracha de menor dimensão está associada a uma menor redução da resistência, verificando-se também que o processo de produção de borracha (mecânico ou criogénico) não influencia a resistência à compressão (Freitas et al, 2009; Valadares, 2009).

Vieira et al (2010) realizaram um estudo sobre a influência do tipo e da percentagem de agregados reciclados de borracha inseridos no concreto, tendo analisado três tipos de agregados de borracha e três volumes de substituição (2,5%, 5% e 7,5%). Os autores verificaram uma melhor resistência à compressão no concreto com 2,5% de agregados reciclados de borracha com dimensão de 2,4 mm.

Marques et al (2013) avaliaram o efeito da incorporação de taxas variáveis (até 15%) de agregados de borracha como um substituto do agregado natural, no desempenho mecânico do concreto após submissão a altas temperaturas. Os provetes ensaiados neste estudo foram sujeitos a diferentes níveis de temperatura (400, 600 e 800°C), segundo a curva ISO 834, sendo depois mantidos a essa temperatura durante uma hora e posteriormente arrefecidos até à temperatura ambiente. Seguidamente foram realizados ensaios de resistência à compressão para as diferentes composições.

Os autores concluíram que embora as propriedades mecânicas do concreto com agregados de borracha sejam visivelmente mais afetadas do que as do concreto com agregados naturais, especialmente para as temperaturas mais elevadas, a redução relativa não impede que o concreto com agregados de borracha seja utilizado em aplicações estruturais (Marques et al, 2013).

Marques (2010) desenvolveu trabalhos experimentais para estudar o comportamento ao fogo de concreto com agregados reciclados de borracha proveniente de pneu. Neste estudo o autor utilizou provetes cúbicos (150x150x150mm) e diferentes composições de concreto (BR, B5AB, B10AB e B15AB) produzidos com diferentes taxas de substituição de agregados grossos e finos (0, 5, 10, 15%), testando diferentes níveis de temperatura máxima (20, 400, 600 e 800°C).

O autor verificou, relativamente à resistência à compressão sem exposição térmica, uma tendência de decréscimo linear nas misturas com adição de borracha, registrando a variação máxima de 55% em comparação com o concreto 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. No entanto, para a exposição de 800°C, ocorreu uma redução de resistência residual mais acentuada (Marques, 2010).

Gesoğlu e Güneyisi (2011) produziram concretos auto-adensáveis, 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 concreto 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, registou-se um aumento com o aumento de agregados de borracha podendo, no entanto, este efeito negativo ser melhorado com a adição de cinzas volantes.

Ho et al (2012) estudaram o efeito da adição de agregados de borracha (0 a 4mm) no concreto a temperaturas de 20, 40 e 70°C. Foram testadas quatro composições, uma de referência e três com agregados de borracha. Após a realização dos ensaios, os autores verificaram que os provetes com agregados de borracha têm um processo de rotura mais lento do que os provetes de concreto sem agregados de borracha. Verificou-se também que, para todas as temperaturas ensaiadas, as composições de concreto apresentam valores de resistência dentro dos limites usuais para este tipo de concretos. Através da técnica de emissão acústica aplicada verificou-se que antes da carga de pico há o aparecimento de microfissuras, sendo a diferença entre a composição de referência e as composições com agregados de borracha pouco significativa.

O estudo das propriedades do concreto normal a altas temperaturas tem um número considerável de investigações, o que não se verifica com os concretos com agregados de borracha. É neste contexto e atendendo à necessidade de gerir racionalmente os recursos naturais (Gesoğlu e Güneyisi, 2011; Olivares e Barluenga, 2004; Khaloo et al, 2008; Turki et al, 2009), que surge o presente trabalho de investigação, o qual pretende avaliar as propriedades mecânicas a altas temperaturas de concretos com agregados reciclados de borracha provenientes de pneu, incidindo especialmente na resistência à compressão a altas temperaturas. Para o efeito foram realizados ensaios de resistência à compressão a altas

temperaturas, no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

O concreto é um dos materiais responsáveis pelo aumento do consumo de cimento e agregados naturais na construção civil, levantando questões de sustentabilidade dos recursos naturais. Este facto, entre outros, confirma a necessidade de desenvolver tecnologias inovadoras e materiais alternativos para melhorar não só o nível de desempenho do concreto mas, acima de tudo, apoiar a política de proteção ambiental.

Em Portugal a RECIPNEU é uma das empresas que desde o ano 2000 se dedica à reciclagem de pneus, utilizando um processo de trituração criogénica na conceção dos agregados para aplicações como matéria-prima e como produto final. Com o apoio/parceria da RECIPNEU foi possível desenvolver o trabalho de investigação apresentado.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

2.1 Composição do concreto

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 deve-se ao facto de este ser um produto com boa trabalhabilidade, ter elevada resistência e um bom comportamento a elevadas temperaturas. Na Tabela 1 apresentam-se as massas volúmicas dos agregados utilizados, do cimento e da água.

Tabela 1: Massas volúmicas dos agregados, cimento e água.

Massa volúmica – ρ [kg/m ³]	
Areia Fina (AF)	2600
Brita Calcária (BC)	2700
Cimento (CEM)	3100
Água (A)	1000

Neste estudo utilizou-se ainda um agregado de borracha (AB), com dimensão nominal entre os valores 6,3 - 12mm e massa volúmica de 1100 kg/m³, para inserção no concreto (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 agregados naturais e a consequente baixa de resistência. Optou-se então por um relação A/C de 0,31.

As composições de concreto em estudo apenas diferiram na quantidade de agregados de borracha incorporadas nas composições. Estudaram-se três composições de concreto, 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 concreto são apresentadas na Tabela 2.

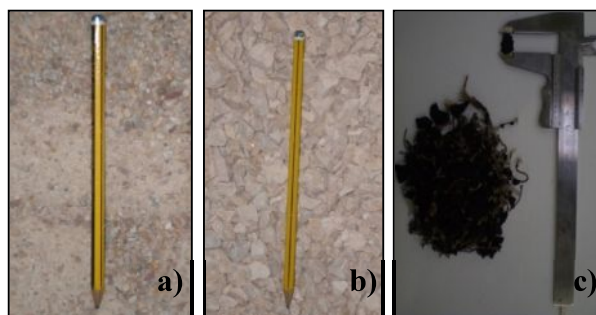


Figura 1: Tipos de agregado. a) Areia fina. b) Brita calcária. c) Agregado reciclado de borracha de pneu.

Tabela 2: Composição do concreto por m³.

	CEM [kg/m ³]	AF [kg/m ³]	BC [kg/m ³]	A [l/m ³]	A/C	AB [kg/m ³]
BR	400	567	959	122,5	0,31	-
BAB1	400	567	560	122,5	0,31	165
BAB2	400	567	161	122,5	0,31	330

Para cada composição de concreto foram realizados ensaios de resistência à compressão em provetes cúbicos (150x150x150mm), determinando a resistência à compressão do concreto à temperatura ambiente, aos 28 dias. Estes ensaios foram realizados seguindo a NP EN 206-1 (2007) e os seus resultados são apresentados na Tabela 3. Os provetes foram curados, durante 28 dias, numa sala com um ambiente de vapor saturado (humidade relativa > 98%) e temperatura de 20°C. Após o período de cura, foram removidos e colocados em ambiente de laboratório (temperatura entre 18 e 20°C) e humidade (entre 40 e 50%). Os provetes foram ensaiados com pelo menos três meses de idade.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de compressão do concreto.

Tipo de concreto	f_{cm} (MPa)	Classe de resistência
BR	63,68	C50/60
BAB1	24,63	C16/20
BAB2	10,60	C8/10

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 (2005) (Figura 2).

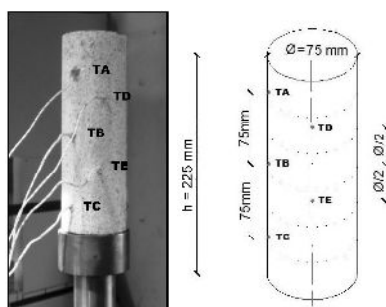


Figura 2: Provetes e localização dos termopares.

2.3 Plano de ensaios

O trabalho experimental realizou-se em três fases: na primeira fase procedeu-se à preparação de todo o material necessário para a realização dos ensaios, obtenção de agregados a serem incorporados, bem como areia e cimento. A segunda fase experimental teve por objetivo avaliar os diferentes tipos de concretos fabricados sob o ponto de vista do desempenho mecânico e da deformabilidade à temperatura ambiente. A última fase do trabalho experimental foi reservada à avaliação do comportamento do concreto quando exposto a diferentes níveis de temperatura máxima (20, 300, 500, 700°C) e a vários níveis de carregamento (0,15; 0,3 e 0,5 f_{cd} sendo f_{cd} o valor de cálculo da resistência à compressão do concreto à temperatura ambiente). Para cada combinação de parâmetros foram realizados três ensaios. Na Tabela 4 apresenta-se resumidamente o plano de ensaios para cada composição de concreto.

Tabela 4: Plano de ensaios.

Composição do concreto	Temperatura (°C)	Nível de carregamento
BR	20, 300, 500, 700	0,5 f_{cd}
BAB1	20, 300, 500	0,15 f_{cd} ; 0,3 f_{cd} ; 0,5 f_{cd}
BAB2	20, 300, 500	0,15 f_{cd} ; 0,3 f_{cd} ; 0,5 f_{cd}

2.4 Sistema e metodologia de ensaio

Do sistema de ensaio fizeram parte uma máquina universal de tração/compressão Servosis 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).



Figura 3: Sistema de ensaio.

O procedimento de ensaio adotado respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 HTC (2005). O provete foi submetido a diferentes níveis de carregamento $0,15; 0,3$ e $0,5f_{cd}$, o qual foi mantido constante durante o processo de aquecimento. Após se ter atingido o nível de carregamento, o provete foi aquecido a uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até ao nível de temperatura desejado. Vários níveis de temperatura máxima foram testados ($300, 500$ e 700°C). Para controlo do concreto foram também ensaiados provetes à temperatura ambiente. O nível de temperatura era considerado atingido quando a temperatura média nos três termopares superficiais do provete em estudo igualava a temperatura ambiente interna 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 era mantido a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura era realizado o ensaio de compressão. A carga foi incrementada a uma taxa de $0,25\text{kN/s}$ até se atingir a rotura do provete.

3. RESULTADOS

3.1 Evolução da temperatura

As Figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam, a título de exemplo, a evolução da temperatura no interior do forno e na secção transversal do provete de concreto de referência, do provete de concreto BAB1 e do provete de concreto BAB2 para o nível de temperatura de 500°C .

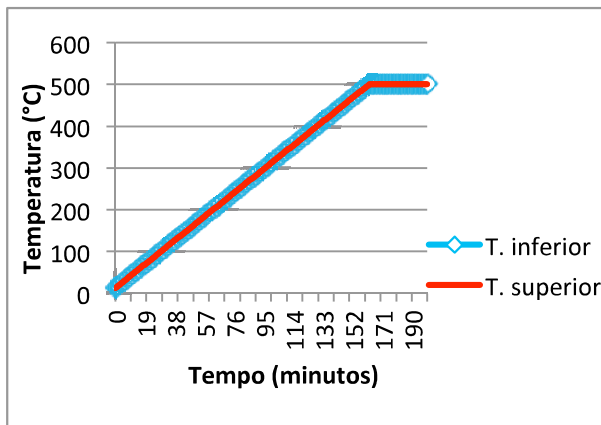


Figura 4: Evolução da temperatura no forno - série de 500°C.

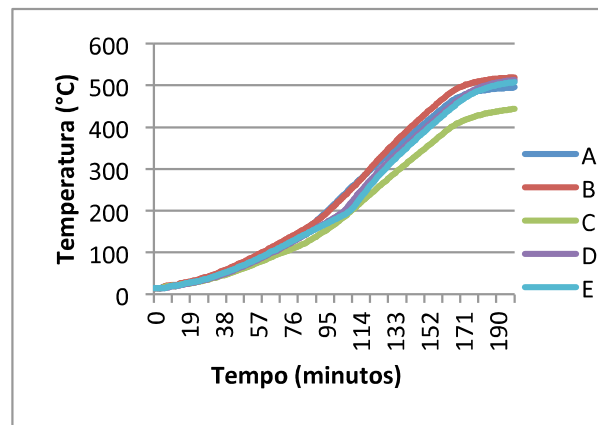


Figura 5: Evolução da temperatura na secção transversal do provete BR - série de 500°C.

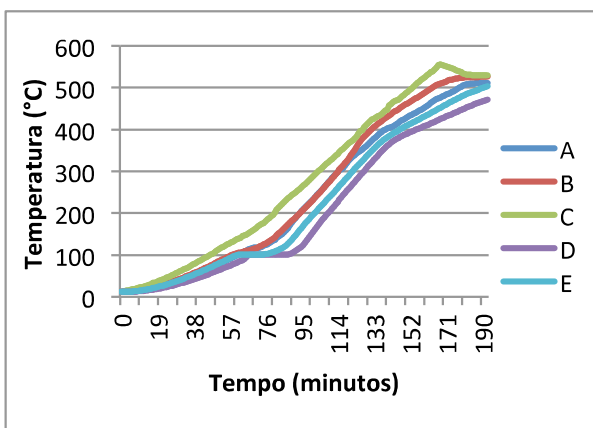


Figura 6: Evolução da temperatura na secção transversal do provete BAB1 - série de 500°C.

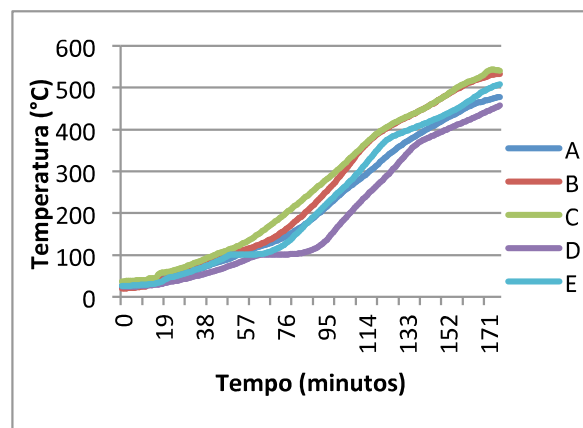


Figura 7: Evolução da temperatura na secção transversal do provete BAB2 - série de 500°C.

A análise da Figura 4 permite verificar que a temperatura no interior do forno se manteve uniforme durante os ensaios, pois as curvas de temperatura inferior e superior foram praticamente coincidentes ao longo do ensaio. Este facto traduziu-se numa boa exposição térmica a que o provete esteve sujeito no forno cilíndrico. Nas curvas de temperatura registadas através dos termopares (Figuras 5, 6 e 7), pode observar-se igualmente uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete durante o aquecimento e na fase de estabilização da temperatura.

A Figura 5 mostra a evolução da temperatura nos termopares, localizados nos provetes, durante os ensaios do concreto de referência da série de 500°C. Da análise das curvas de

temperatura registadas através dos termopares pode observar-se que a temperatura pretendida nos provetes foi atingida ao fim de 180-200 minutos, cerca de 20 minutos depois do forno ter atingido a mesma. Verifica-se ainda que não houve gradientes significativos de temperatura, tendo-se verificado uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete. Este facto pode dever-se à boa exposição térmica a que o provete esteve sujeito no forno cilíndrico e ao facto da taxa de aquecimento ser somente de 3°C/minuto.

Na Figura 6 apresentam-se os resultados da evolução da temperatura nos termopares, localizados nos provetes, durante os ensaios do concreto com 15% de agregados de borracha (BAB1) da série de 500°C. Constatou-se que a temperatura pretendida nos provetes foi atingida ao fim de 170-180 minutos, cerca de 10 minutos depois do forno ter atingido a mesma.

A Figura 7 apresenta a evolução da temperatura nos provetes ao longo da secção vertical, durante os ensaios do concreto com 30% de agregados de borracha (BAB2) para a série de ensaios de 500°C. Verifica-se que o provete em termos de altura não apresenta grandes variações térmicas e a temperatura pretendida nos provetes foi atingida ao fim de 160 minutos, sensivelmente o tempo que o forno demorou a atingir a mesma. Este facto pode dever-se à porosidade do provete em virtude da maior percentagem de borracha na composição do concreto e ao facto da taxa de aquecimento ser somente 3°C/minuto.

A comparação dos resultados obtidos, mostra que o concreto BR (Figura 5) apresenta uma evolução da temperatura mais homogénea que os concretos BAB1 e BAB2 (Figuras 6 e 7), tal facto explica-se pela carbonização dos agregados de borracha ao atingirem os 300°C, tornando o concreto menos homogéneo.

3.2 Resistência à compressão

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais para a resistência à compressão são visíveis nas Figuras 8, 9 e 10. A Figura 8 apresenta a variação da resistência à compressão em função da temperatura máxima de exposição na série de ensaios com carregamento de $0,15f_{cd}$ do concreto com 15% (BAB1) e do concreto com 30% (BAB2) de agregados de borracha.

A análise da Figura 8 permite constatar que a resistência à compressão diminui à medida que a temperatura aumenta. Aos 500°C, houve um decréscimo da resistência à compressão de cerca de 78% para o concreto BAB1, obtendo uma resistência à compressão de cerca de 22% da resistência à temperatura ambiente. Para o nível de temperatura de 500°C e para o concreto BAB2 não são apresentados resultados, uma vez que todos os provetes sofreram rotura antes de atingir este nível de temperatura, impossibilitando que os mesmos fossem ensaiados à compressão.

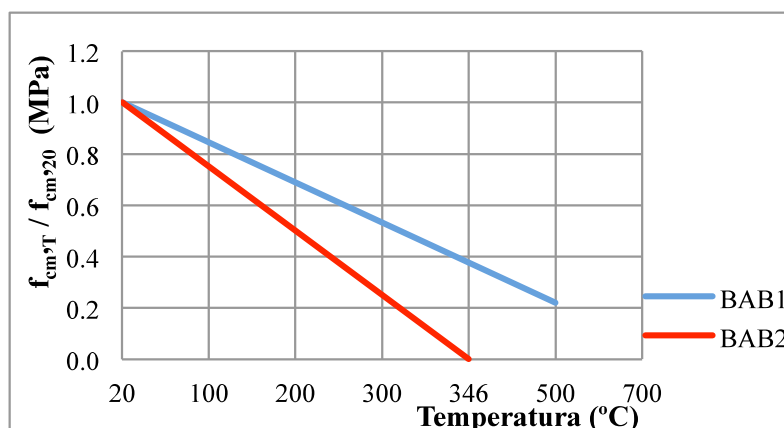


Figura 8: Resistência à compressão dos concretos com 15 e 30% de agregados de borracha (BAB1 e BAB2) em função da temperatura - nível de carregamento de $0,15f_{cd}$.

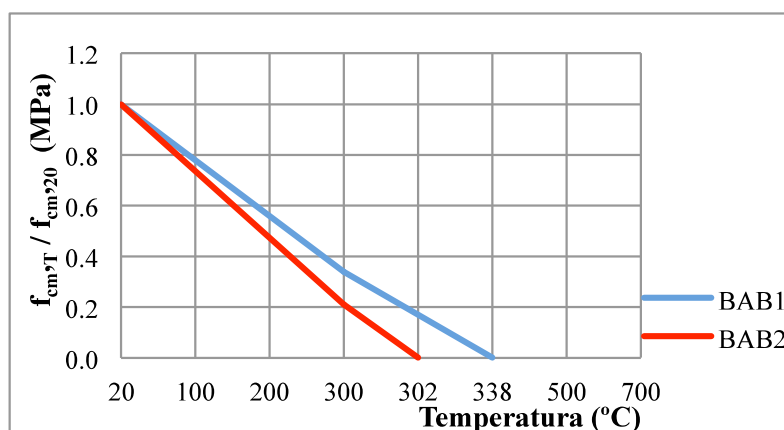


Figura 9: Resistência à compressão dos concretos com 15 e 30% de agregados de borracha (BAB1 e BAB2) em função da temperatura - nível de carregamento de $0,3f_{cd}$.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com carregamento de $0,3f_{cd}$, para as diferentes composições de concreto (BAB1 e BAB2) e para o nível de temperatura máxima de exposição.

Como se observa na Figura 9, os resultados obtidos para as diferentes composições de concreto apresentam um decréscimo de resistência à compressão, sendo a redução para o concreto com 30% de agregados de borracha maior do que para o concreto com 15% de agregados de borracha.

Aos 300°C e para as composições de concreto 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 10 apresenta os resultados obtidos na série de ensaios com carregamento de $0,5f_{cd}$, para as diferentes composições de concreto e para o nível de temperatura máxima de exposição. Da análise da Figura 10 verifica-se que aos 300°C verificou-se que a resistência à compressão do concreto de referência aumentou cerca de 50% relativamente à resistência à compressão à temperatura ambiente. Esta situação não se verificou para o concreto com 15% de agregados de borracha, tendo a resistência à compressão diminuído cerca de 24% quando comparada com a resistência à compressão à temperatura ambiente.

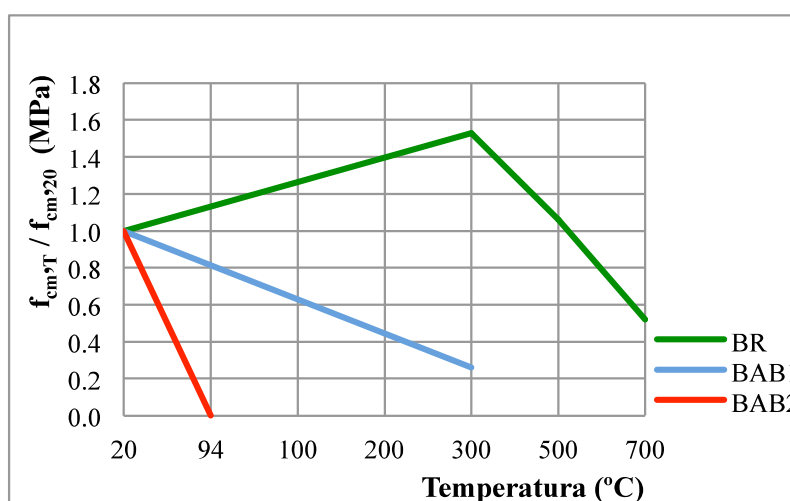


Figura 10: Resistência à compressão do concreto de referência (BR) e dos concretos com 15 e 30% de agregados de borracha (BAB1 e BAB2) em função da temperatura - nível de carregamento de $0,5f_{cd}$

Os resultados obtidos permitem concluir que o aumento da percentagem de agregados de borracha reciclados de pneu inserido no concreto 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 (Li et al, 1998; Albano et al, 2005; Eldin e Senouci, 1993; Cairns et al, 2004).

A Figura 11 apresenta o registo fotográfico da rotura sofrida pelos provetes após a realização do ensaio de resistência à compressão para a série de 500°C. Verifica-se uma rotura menos explosiva nos provetes com maior quantidade de borracha (BAB2), atestando a eficácia dos agregados de borracha no controlo da fendilhação.

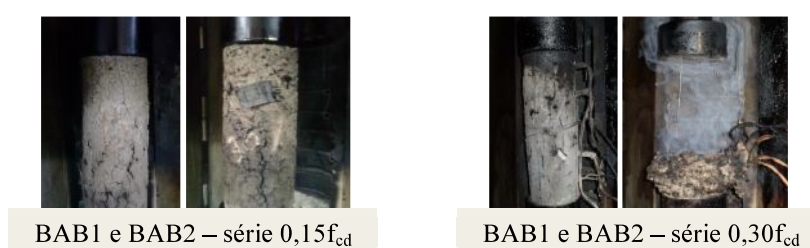


Figura 11: Provetes após o ensaio de resistência à compressão – série 500°C.

4. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido permitiu extrair as seguintes conclusões:

- Para níveis de exposição térmica de 300°C e 500°C, observa-se que a perda de resistência à compressão do concreto com 15% de agregados borracha, aumenta em função do aumento dos níveis de carregamento;
- Para os carregamentos de 0,15 e 0,3 f_{cd} a 300°C, verifica-se que a redução da resistência à compressão do concreto com 30% de agregados de borracha é menor no maior carregamento, devido ao fenómeno de compactação que a força exercida provoca no concreto, reduzindo o desenvolvimento de fissuras no seu interior. Este fenómeno deve-se ao facto do carregamento ter um efeito benéfico no controlo da fendilhação;
- Para o nível de temperatura máxima de 500°C, verifica-se que a perda de resistência à compressão aumenta à medida que a taxa de inserção de agregados de borracha no concreto também aumenta, para os diferentes níveis de carregamento;
- O nível de carregamento de 0,3 f_{cd} caracteriza-se por registar, para as composições de concreto com agregados de borracha, uma perda de resistência à compressão mais acentuada com o aumento da taxa de incorporação de agregados de borracha.
- Para um nível de exposição até 500°C de temperatura máxima, verifica-se que a perda de resistência à compressão aumenta em função do aumento da taxa de inserção de agregados de borracha no concreto, para um nível de carregamento de 0,15 f_{cd} ;
- Para o concreto com 15% de agregados de borracha, nas mesmas condições de ensaio, nível de carregamento de 0,15 f_{cd} e nível de temperatura de 500°C, verifica-se um melhor desempenho de resistência à compressão que para o concreto com 30% de agregados de borracha.

Deste modo, pode concluir-se que o concreto com melhor comportamento relativamente à resistência à compressão a altas temperaturas é o concreto com taxa de substituição de 15% de agregados naturais por agregados reciclados de borracha de pneu.

Relativamente aos provetes após ensaio, verificou-se que a percentagem de vazios nos provetes com agregados de borracha aumenta com o acréscimo de temperatura. Este facto ocorre devido ao aumento de carbonização nos agregados de borracha com o aumento da temperatura.

No presente trabalho de pesquisa observou-se uma rotura menos explosiva nos provetes constituídos por concreto com 30% de agregados de borracha, confirmando a eficácia dos agregados de borracha na obtenção de concretos mais dúcteis e no controlo da fendilhação.

O concreto quando contém uma quantidade de humidade elevada e é sujeito a um regime de aquecimento rápido pode sofrer um aumento muito elevado da pressão do vapor de água no seu interior podendo provocar o desprendimento do mesmo do elemento. Este fenómeno é designado por spalling. A inserção de agregados reciclados de borracha de pneu pode ser um dos métodos utilizados para reduzir o risco de spalling. Estes agregados carbonizam, abrindo caminhos para a libertação do vapor de água e assim reduzindo a pressão interna.

Deste modo, conclui-se que o uso de concretos com agregados reciclados de borracha de pneu pode ser uma alternativa para minimizar o risco fissuração de origem térmica, quando comparados com um concreto ordinário sem agregados de borracha, trazendo ganhos económicos e ambientais. A incorporação de agregados de borracha tende a diminuir a resistência à compressão do concreto. Apesar disto, é possível produzir concretos estruturalmente eficientes com adição de agregados de borracha de pneu.

O concreto com agregados reciclados de borracha de pneu prevê-se ter também um comportamento sísmico melhorado devido à maior resiliência deste material.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

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, p. 439-446, 2005.

ALBUQUERQUE, A. C.; HASPARYN, N. P.; ANDRADE, M. A. S.; CORREA, M. I. F.; NETO, M. M.; MACEDO, D. C. B.; CARDOSO, C. G.. Investigation of different treatments in tire rubber with a view to concrete application. **Conference on Use of the Recycled Materials in Building and Structures**, RILEM, Barcelona, 2004.

CAIRNS, R.; KENNY, M.; KEW, H.. The use of recycled rubber tyres in concrete construction. **The University of Strathclyde**, Glasgow, p. 91, 2004.

ELDIN, N.; SENOUCI, A. B.. Observations on rubberized concrete behavior. **Cement, Concrete and Aggregates**, 15 (1), p. 74-84, 1993.

FREITAS, C.; GALVÃO, L.; PORTELLA, K.; JOUKOSKI, A.; FILHO, C.. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, vol. 32, p. 913-918, 2009.

- GESOĞLU, M.; GÜNEYİSİ, E.. Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. **Construction and Building Materials**, vol. 25, p. 3319-3326, 2011.
- 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, p. 209-215, 2012.
- KHALOO, A. R.; DEHESTANI, M.; RAHMATABADI, P.. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire - rubber particles, **Waste Management Journal**, vol. 28, p. 2472-2482, 2008.
- LI, Z.; LI, F.; LI, J. S. L.. Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. **Magazine of Concrete Research**, vol. 50 (4), p. 297-304, 1998.
- MARQUES, A.M.; CORREIA, J. R.; BRITO, J.. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled rubber aggregate. **Fire Safety Journal**, vol. 58, p. 49-57, 2013.
- MARQUES, A.. Comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil**, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 195 p., 2010.
- NP EN 206-1: 2007, Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, IPQ, 84 p., 2007.
- OLIVARES, F. H.; BARLUENGA, G.. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 34, p. 109-117, 2004.
- RECOMENDAÇÕES DO RILEM TC 200-HTC. Mechanical concrete properties at high temperature – modelling and applications. **Materials and Structures**, vol. 38, p. 913-919, 2005.
- TURKI, M.; BRETAGNE, E.; ROUIS, M. J.; QUÉNEUDEDEC, M.. Microstructure, physical and mechanical properties of mortar – rubber aggregates mixtures. **Construction and Building Materials**, vol. 23, p. 2715-2722, 2009.
- SEGRE, N.. Reutilização de borrachas de pneus usados como adição em pasta de cimento. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual de Campinas, 104 p., 1999.
- VALADARES, F.. Desempenho mecânico de betões com a incorporação de borracha proveniente de pneus usados. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil**, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 249 p., 2009.
- VIEIRA, R.; SOARES, R.; PINEIRO, S.; PAIVA, O.; ELEUTÉRIO, J.; VASCONSELOS, R.. Completely random experimental design with mixture and process variables for optimization of rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 24(9), p. 1754-1760, 2010.