

## O EFEITO DAS ALTAS TEMPERATURAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DO BETÃO



**Cristina Calmeiro dos Santos**

Eq. Prof. Adjunto  
Instituto Politécnico  
de Castelo Branco,  
Portugal.  
ccalmeiro@ipcb.pt



**João Paulo C. Rodrigues**

Professor,  
Universidade de  
Coimbra, Portugal.  
jpaulocr@dec.uc.pt

### SUMÁRIO

Este artigo apresenta os resultados dum estudo experimental para determinação das propriedades mecânicas residuais após incêndio de betões de agregados calcários e graníticos. Para cada composição de betão foram testados dois níveis de carregamento ( $0,3f_{cd}$  e  $0,7f_{cd}$ ), dois tipos de arrefecimento (arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água) e vários níveis de temperatura ( $20^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  e  $700^{\circ}\text{C}$ ). Os provetes foram submetidos a ciclos de aquecimento/arrefecimento para analisar as alterações das propriedades mecânicas residuais do betão.

**Palavras-chave:** betão; incêndio; propriedades mecânicas; residual.

### 1. INTRODUÇÃO

O betão é um dos materiais de construção mais amplamente utilizado, pelo que o estudo das suas propriedades quando exposto a altas temperaturas, nomeadamente em situação de incêndio, é fundamental [1-7]. As propriedades mecânicas como resistência à compressão, resistência à tracção, resistência à flexão, módulo de elasticidade entre outras, são consideravelmente afectadas durante esta exposição, podendo provocar deficiências estruturais significativas [4-11].

O aumento da temperatura provoca alterações na composição química e na estrutura física do betão conduzindo ao aparecimento de microfissuras principalmente quando a temperatura atinge os  $300^{\circ}\text{C}$  [12]. O hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , um dos compostos mais importantes da pasta de cimento, dissocia-se entre os  $400^{\circ}\text{C}$  e os  $600^{\circ}\text{C}$ , provocando contracção no betão [5, 6, 13, 14, 15]. O silicato de cálcio hidratado gel (CSH), componente responsável pela resistência mecânica dos cimentos utilizados na construção civil, decompõe-se acima dos  $600^{\circ}\text{C}$ . Para temperaturas próximas dos  $800^{\circ}\text{C}$ , o betão apresenta indícios de desagregação.

Sob o efeito de temperaturas muito elevadas, o betão é um material que pode fundir. A fusão da pasta de cimento depende essencialmente da composição química do cimento utilizado. No entanto, para uma composição normal de cimento (60%  $\text{C}_3\text{S}$ , 20%  $\text{C}_2\text{S}$ ) a temperatura de fusão da pasta de cimento ronda os  $1200^{\circ}\text{C}$  [16, 17]. Por sua vez, a fusão dos agregados depende da sua natureza. As rochas basálticas fundem a

temperaturas de 1060°C, as rochas graníticas a 1210°C e o quartzito a 1700°C [17]. Ainda que certos materiais sejam menos sensíveis a temperaturas elevadas, acima dos 1300°C a generalidade dos componentes do betão sofrem fusão causando a destruição completa do material [18].

Vários estudos mostram que alterações macroestruturais sofridas pelo betão devido ao aumento da temperatura conduzem a perdas significativas de resistência e durabilidade, cujas consequências se traduzem em danos funcionais e estéticos nos edifícios. A reabilitação dos danos estéticos é um trabalho simples, enquanto os danos funcionais exigem um estudo rigoroso, atendendo ao grau de severidade atingido [8, 19]. Os trabalhos de investigação experimental realizados permitiram estudar os efeitos residuais das temperaturas elevadas sobre as propriedades mecânicas do betão - tarefa fundamental quando se pretende reabilitar uma estrutura parcial ou totalmente danificada pelo incêndio.

Estudaram-se duas composições de betão ordinário, uma constituída por agregados calcários e outra constituída por agregados graníticos, tendo-se realizado os seguintes ensaios: resistência à compressão; resistência à tracção directa; resistência à tracção com compressão diametral; resistência à flexão e módulo de elasticidade.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Composição do betão

Os materiais utilizados neste estudo foram cimento Portland (CEM) tipo II/A-L 42.5R, superplastificante (SP) SIKA (Sikament®195R) e quatro tipos de agregados: areia fina (A1), areia grossa (A2), Brita 1 (B1) com a dimensão máxima de 12,7mm e Brita 2 (B2) com a dimensão máxima de 19,1mm. Esta composição mantém-se para o betão com agregados calcários e para o betão com agregados graníticos. As proporções da mistura são apresentadas no Quadro 1.

Os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem, ou seja, em ambiente de laboratório, de modo a adquirirem endurecimento suficiente (presa) para poderem ser descofrados e transportados até à zona de cura. O período de cura foi de 28 dias. Os resultados dos ensaios de compressão após cura, realizados para determinar a classe de resistência do betão de acordo com a NP EN 2006-1 [20], são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1. Composição do betão com agregados calcários (BC) e com agregados graníticos (BG) por m<sup>3</sup>

Composição do betão	CEM [Kg]	Água [dm <sup>3</sup> ]	SP [dm <sup>3</sup> ]	A1 [Kg]	A2 [Kg]	B1 [Kg]	B2 [Kg]	A/C
BC	300	166	3,30	364	495	505	377	0,56
BG	320	165	3,20	310	511	617	459	0,52

Quadro 2. Resultados dos ensaios de compressão do betão com agregados calcários (BC) e com agregados graníticos (BG)

Tipo de betão	f <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>cm</sub> [MPa]	Classe de Resistência
BC	45,4	44,05	C30/37
	43,8		
	43,0		
BG	40,6	40,23	C30/37
	39,4		
	40,7		

## 2.2. Ensaaios experimentais

Nos ensaios realizados foram testados dois processos de arrefecimento, arrefecimento ao ar (que pretendia simular um incêndio extinto de uma forma natural) e arrefecimento por jacto de água (que pretendia simular a acção dos bombeiros no combate ao incêndio). Os provetes foram submetidos a um ciclo de aquecimento/arrefecimento. Para controlar a evolução da temperatura no interior dos provetes, estes foram providos com cinco termopares tipo K. A localização dos termopares nos provetes foi definida tendo por base as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [21].

### 2.2.1. Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos com 75mm de diâmetro e 225mm de altura, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. Para a concretização dos ensaios usou-se uma máquina universal de tracção/compressão Servosis com capacidade de carga de 600kN, um forno cilíndrico com uma câmara de aquecimento de 90mm de diâmetro e 300mm de altura (temperatura máxima de 1200°C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530. Nos ensaios foram registadas as forças, os deslocamentos e as temperaturas nos provetes e no forno. O procedimento de ensaio adoptado respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [21].

Para determinar a resistência residual à compressão, foram utilizados dois sistemas de ensaio similares, diferindo apenas no tipo de arrefecimento dos provetes. Um conjunto de provetes foi sujeito ao arrefecimento ao ar e um outro conjunto arrefecido por jacto de água.

#### Arrefecimento ao ar

Os provetes foram submetidos a um nível de carregamento de  $0,3f_{cd}$  ou  $0,7f_{cd}$ , o qual foi mantido constante durante o processo de aquecimento/arrefecimento. Quando se atingiu o nível de carregamento pretendido, os provetes foram aquecidos a uma taxa de  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , até ser obtido o nível de temperatura desejado. Foram testados três níveis de temperatura máxima (300°C, 500°C e 700°C). Para controle do betão foram também testados provetes à temperatura ambiente.

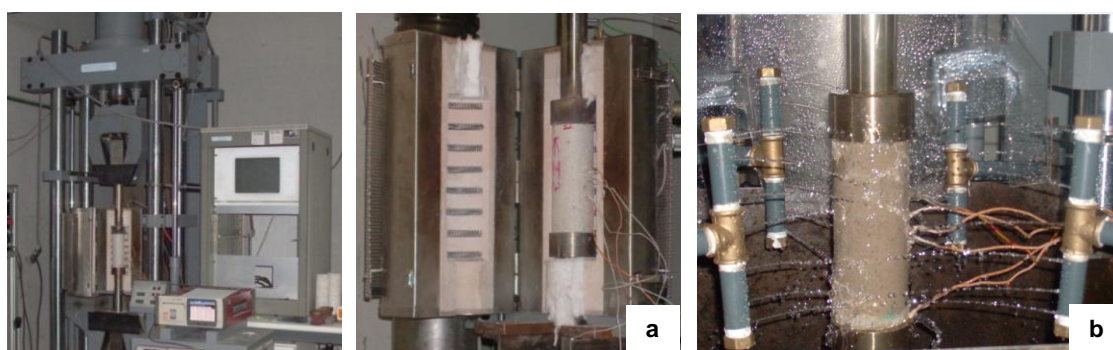


Figura 1. Sistema experimental – resistência à compressão.  
a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jacto de água.

Considerou-se alcançado o nível de temperatura desejado, 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  $1^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$  a  $700^{\circ}\text{C}$ . Os provetes foram mantidos a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a

estabilização da temperatura, abriu-se o forno lentamente deixando os provetes arrefecer ao ar. Quando os provetes atingiram a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizou-se o ensaio de compressão. A carga foi incrementada a uma taxa de 0,25kN/s até se atingir a rotura dos provetes (Fig. 1a).

#### Arrefecimento por jacto de água

O procedimento de ensaio utilizado foi idêntico ao anteriormente descrito para os ensaios com arrefecimento ao ar, apresentando apenas diferenças inerentes ao processo de arrefecimento. Deste modo, quando os provetes atingiram o nível de temperatura desejado, o forno foi aberto, deslocado para trás, e procedeu-se ao arrefecimento dos provetes mediante jactos de água. O caudal de água aplicado foi de  $3.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e a pressão de  $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  (Fig. 1b).

#### 2.2.2. Ensaio de resistência à tracção directa

Nos ensaios de tracção directa usaram-se provetes cilíndricos com 75mm de diâmetro e 225mm de altura, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. O sistema de ensaio consistiu numa máquina universal de tracção Servosis com capacidade de carga até 600kN. Utilizou-se ainda uma mufla (temperatura máxima de 1100°C) para os provetes atingirem os vários níveis de temperatura desejados. Para a aquisição de dados foi usado um TML TDS-530.

Os provetes foram aquecidos a uma taxa de 3°C/min, até se atingir o nível de temperatura pretendido. Para controle do betão testaram-se provetes à temperatura ambiente e provetes sujeitos a três níveis de temperatura (300, 500 e 700°C). Os provetes foram mantidos à temperatura pretendida durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura, procedeu-se ao arrefecimento dos provetes. Um conjunto de provetes foram arrefecidos ao ar mediante a abertura da mufla, um outro conjunto foi arrefecido bruscamente mediante a aplicação de jactos de água. Quando se atingiu a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizou-se o ensaio de tracção directa até à rotura dos provetes (Fig. 2).

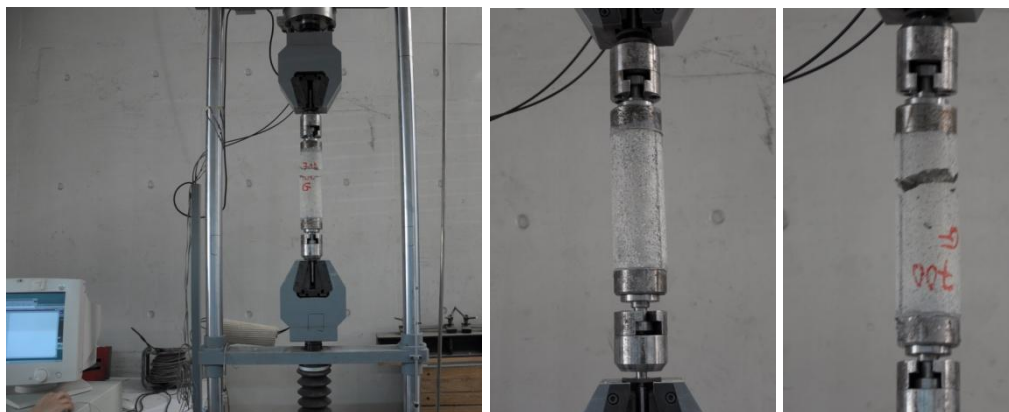


Figura 2. Sistema de ensaio – resistência à tracção directa.

#### 2.2.3. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

A fim de determinar a resistência à tracção por compressão diametral foram respeitadas as orientações da NP EN 12390-6 (2003), utilizando-se provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro e 300mm de altura [22]. O sistema de ensaio foi composto por uma máquina de tracção universal Servosis com capacidade de carga de até 600kN, um forno rectangular Termolab com uma câmara de aquecimento com as dimensões

150mmx150mmx100mm (temperatura máxima de 1200<sup>o</sup>C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530 (Fig. 3).

O procedimento de ensaio iniciou-se pelo aquecimento dos provetes a diferentes níveis de temperatura e a uma taxa de 3<sup>o</sup>C/min. Seguidamente arrefeceram-se os provetes até atingirem a temperatura ambiente. À semelhança dos ensaios descritos anteriormente, aplicaram-se os dois processos de arrefecimento em estudo.



Figura 3. Sistema de ensaio – resistência à tracção por compressão diametral.

#### 2.2.4. Ensaio de resistência à flexão

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em provetes prismáticos com 150mm de lado e 600mm de altura em conformidade com a NP EN 12390-5 (2009) [23]. A metodologia de ensaio foi similar à descrita para o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (Fig. 4).



Figura 4. Sistema de ensaio – resistência à flexão.

#### 2.2.5. Ensaio de módulo de elasticidade

Este ensaio foi realizado em provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro e 300mm de altura. Para medir o módulo de elasticidade foram aplicados três extensómetros nos provetes (TML tipo PFL-30-11). O procedimento de ensaio seguiu as orientações do RILEM TC 129-MHT [24].

A amostra foi aquecida a uma taxa de 3<sup>o</sup>C/min, até se atingir o nível de temperatura pretendido (300, 500 e 700<sup>o</sup>C). Após a estabilização da temperatura, os provetes foram arrefecidos (uns ao ar e outros por jacto de água) e seguidamente levados à rotura utilizando o mesmo sistema de ensaio aplicado no ensaio de resistência à tracção (Fig. 5).



Figura 5. Sistema de ensaio – módulo de elasticidade.

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Resistência à compressão residual

À temperatura ambiente ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ) o betão composto com agregados calcários e o betão composto com agregados graníticos apresentam um comportamento mecânico muito semelhante. Após aquecimento e arrefecimento a evolução da resistência residual à compressão do betão depende do tipo de agregados, do carregamento e do tipo de arrefecimento aplicado.

Da análise das Figuras 6 e 7 verifica-se, no caso de arrefecimento ao ar, uma diminuição da resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima a que este esteve sujeito. Esta diminuição é semelhante para os níveis de carga considerados até  $300^{\circ}\text{C}$  e para os dois tipos de agregados estudados.

Para níveis superiores de temperatura, os provetes de betão calcário submetidos a um nível de carregamento de  $0,3f_{cd}$  apresentam uma maior redução da resistência residual à compressão. Verifica-se assim que o nível de carga de  $0,7f_{cd}$  é mais favorável para o caso do betão calcário uma vez que permite reduzir a perda de resistência residual à compressão em função da temperatura máxima a que o betão esteve sujeito.

Assim, pode-se afirmar que a natureza dos agregados afecta a degradação do betão. O uso de agregados graníticos, para o arrefecimento ao ar e para o nível de carregamento de  $0,3f_{cd}$ , aumenta em 30% a resistência residual à compressão aos  $500^{\circ}\text{C}$  quando comparado com o uso de agregados calcários, e aumenta em cerca de 40% aos  $700^{\circ}\text{C}$  (Fig. 6).

A resistência residual à compressão para o nível de carregamento de  $0,7f_{cd}$  e arrefecimento ao ar é substancialmente melhor no caso de agregados graníticos até aos  $300^{\circ}\text{C}$ , situação que se inverte para níveis superiores de temperatura. Aos  $500^{\circ}\text{C}$  e arrefecimento ao ar, o betão calcário ainda apresenta 73% de resistência residual à compressão, enquanto o betão granítico apresenta uma perda total da sua capacidade de carga (Fig. 7).

Na Figura 6 e 7 observa-se que a redução da resistência à compressão residual, na situação de arrefecimento por jacto de água, é maior no betão calcário que no betão granítico. Para  $0,3f_{cd}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$  e arrefecimento por jacto de água, o rácio da redução da resistência à compressão residual entre o betão calcário e o betão granítico é aproximadamente 7%, para  $500^{\circ}\text{C}$  é de 16% e aos  $600^{\circ}\text{C}$  é de 38%. Todos os provetes submetidos a um nível de carregamento de  $0,7f_{cd}$  sofreram rotura durante o processo de arrefecimento mediante jacto de água não tendo sido possível ensaiar os mesmos à compressão. Deste modo, no caso de arrefecimento por jacto de água, a resistência residual à compressão sofre um decréscimo maior quanto maior é o nível de carregamento.

Note-se que a capacidade de expansão dos agregados desempenha um papel importante na redução da resistência residual à compressão do betão após a exposição a níveis elevados de temperatura. Os resultados dos ensaios experimentais mostram que o efeito da temperatura é mais acentuado no betão constituído com agregados de natureza calcária. Tal facto pode ser atribuído ao maior grau de porosidade dos agregados calcários e ao seu elevado coeficiente de dilatação térmica. Assim, o betão constituído por agregados calcários ao ser submetido a temperaturas elevadas sofre maiores expansões o que conduz a maiores danos.

A utilização do arrefecimento por jacto de água faz aumentar a humidade conduzindo a maiores expansões e fissurações - situação mais propícia para os agregados calcários pois a sua estrutura é muito mais porosa que os agregados graníticos.

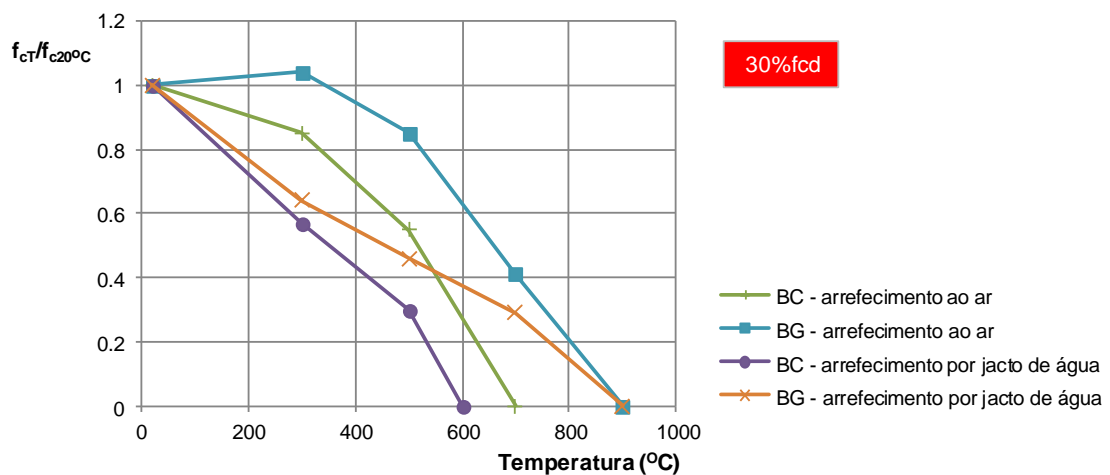


Figura 6. Resistência residual à compressão – 0,3 $f_{cd}$  – arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água – comparação entre betão calcário (BC) e betão granítico (BG).

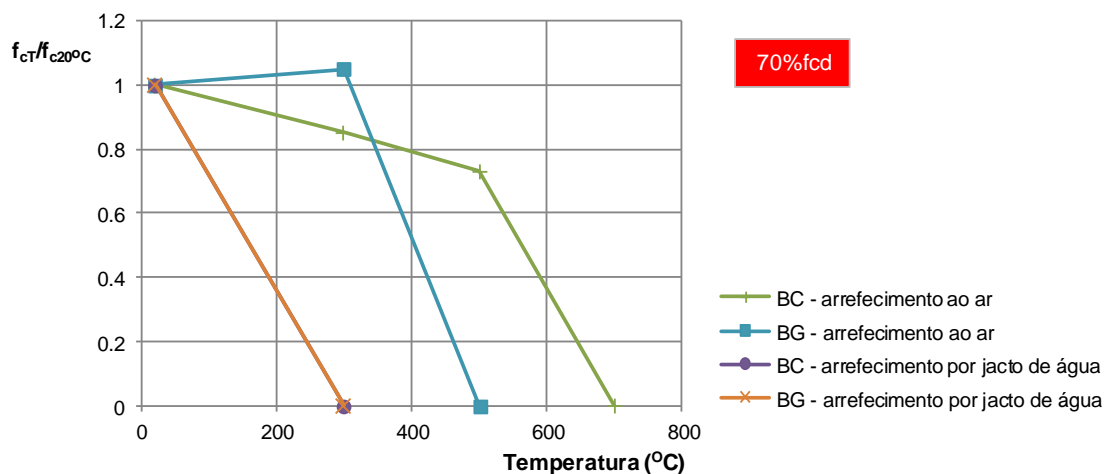


Figura 7. Resistência residual à compressão – 0,7 $f_{cd}$  – arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água – comparação entre betão calcário (BC) e betão granítico (BG).

### 2.3.2. Resistência residual à tracção directa

A resistência residual à tracção directa diminui em função da temperatura máxima a que o betão foi submetido. No entanto, esta redução é mais significativa no betão constituído por agregados calcários. De acordo com a Figuras 8 conclui-se que, independentemente do nível de temperatura alcançado e do tipo de arrefecimento aplicado, o betão granítico comporta-se mais satisfatoriamente que o betão calcário em termos de resistência residual à tracção directa.

Considerando os dois processos de arrefecimento aplicados, verificou-se que o betão, independentemente do tipo de agregado que o compõe, apresenta um melhor comportamento quando arrefecido lentamente ao ar do que por jacto de água, em temperaturas na faixa dos 450-500°C. No entanto, esta situação inverte-se para altas temperaturas uma vez que o betão, tanto o betão calcário como o betão granítico, tem um melhor comportamento quando arrefecido por jacto de água.

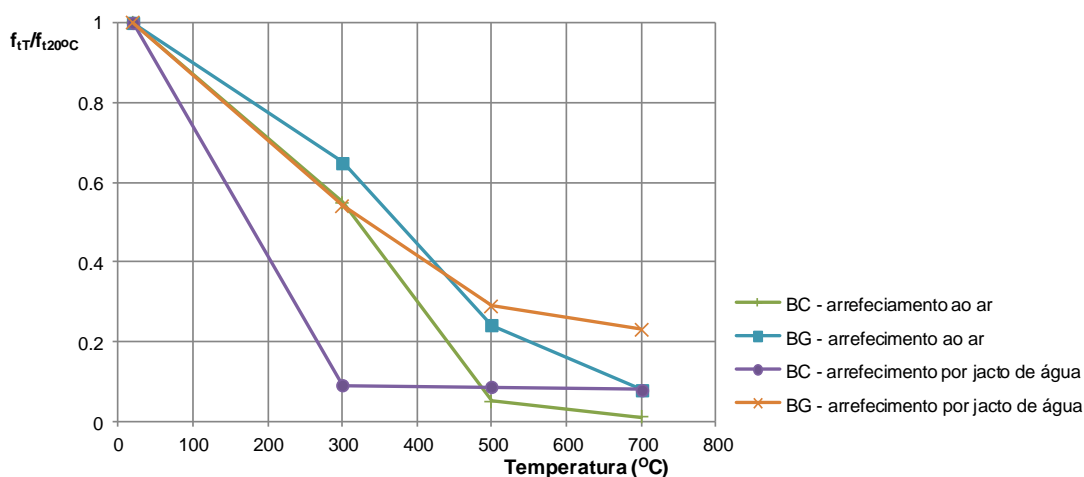


Figura 8. Resistência residual à tracção directa – arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água – comparação entre betão calcário (BC) e betão granítico (BG).

### 2.3.3. Resistência residual à tracção por compressão diametral

Os provetes constituídos por betão granítico para níveis de temperatura igual ou superior a 500°C não puderam ser testados à tracção por compressão diametral, pois durante o processo de aquecimento os provetes sofreram fissuração e spalling. Esse facto justifica-se devido ao baixo grau de porosidade que os agregados graníticos apresentam [25]. O mesmo não se verificou nos provetes de betão calcário, sendo possível testá-los à tracção por compressão diametral. Deste modo, conclui-se que o betão calcário tem um comportamento mais satisfatório que o betão granítico para temperaturas superiores a 500°C.

A partir dos dados obtidos nos ensaios verificou-se que, até temperaturas de 300°C, o betão granítico apresenta um melhor comportamento relativamente à tracção por compressão diametral que o betão calcário, na situação de arrefecimento ao ar (Fig. 9). Na situação do arrefecimento por jacto de água e até temperaturas de 300°C o comportamento do betão em estudo é muito similar.

Aos 500°C o betão calcário apresenta uma perda acentuada da sua resistência à tracção por compressão diametral, tendo apenas cerca de 30% da sua capacidade, situação similar para os dois tipos de arrefecimento. Aos 700°C, apenas tem 9% da sua capacidade no caso de arrefecimento ao ar e tem cerca de 12% no caso do arrefecimento por jacto de água (Fig. 9).

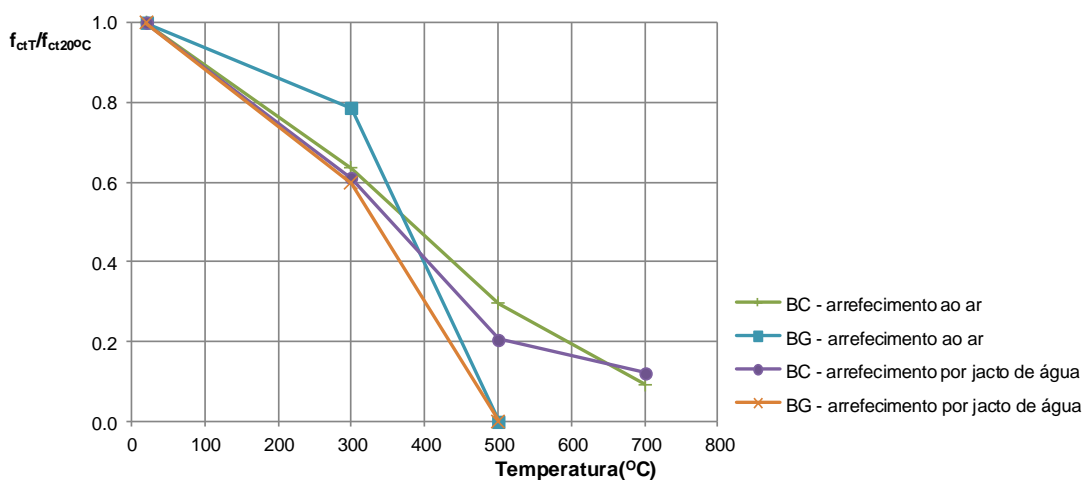


Figura 9. Resistência residual à tracção por compressão diametral – arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água – comparação entre betão calcário (BC) e betão granítico (BG).

#### 2.3.4. Resistência à flexão residual

A Figura 10 mostra que, para a temperatura de 400°C, os dois tipos de betão em estudo apresentam cerca de 40% da resistência à flexão residual no caso de arrefecimento ao ar e cerca de 30% no caso de arrefecimento por jacto de água. Até este nível de temperatura, o betão granítico tem um comportamento melhor que o betão calcário. Para temperaturas acima dos 500°C, independentemente do tipo de arrefecimento aplicado, o betão calcário apresenta um comportamento mais satisfatório que o betão granítico.

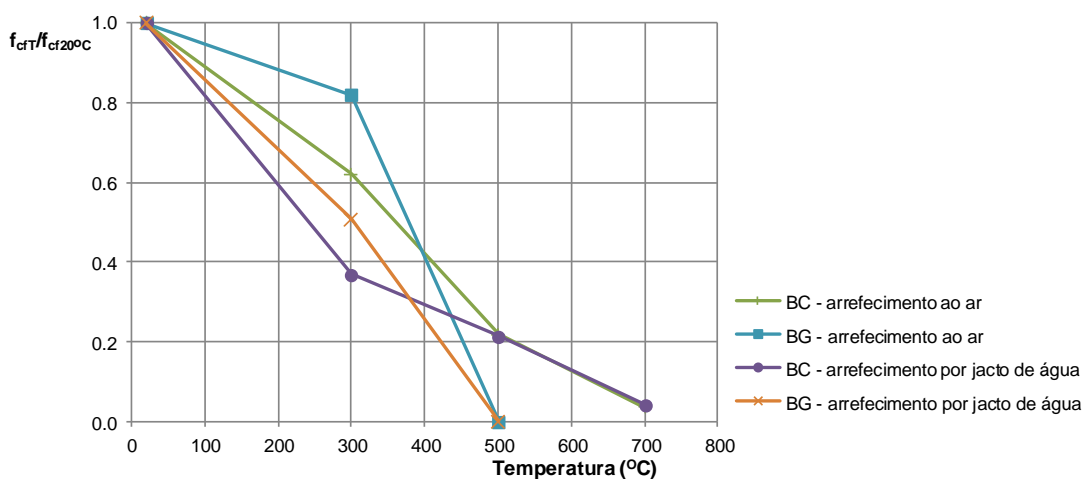


Figura 10. Resistência residual à flexão – arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água – comparação entre betão calcário (BC) e betão granítico (BG).

### 2.3.5. Módulo de elasticidade residual

A variação do módulo de elasticidade do betão em estudo (Fig. 11) decresce com o aumento da temperatura, tal como as propriedades mecânicas já apresentadas. O módulo de elasticidade atinge valores muito baixos para níveis de temperaturas acima de 500°C. Observa-se também que o módulo de elasticidade é menos afectado quando se aplica o arrefecimento ao ar, independentemente do tipo de agregado utilizado no fabrico do betão.

Verifica-se ainda que o betão calcário e o betão granítico apresentam um comportamento similar para temperaturas até 350°C, qualquer que seja o tipo de arrefecimento aplicado. Após esse nível de temperatura o betão calcário apresenta um melhor desempenho. Este desempenho é ainda mais evidente quando se aplica o arrefecimento ao ar.

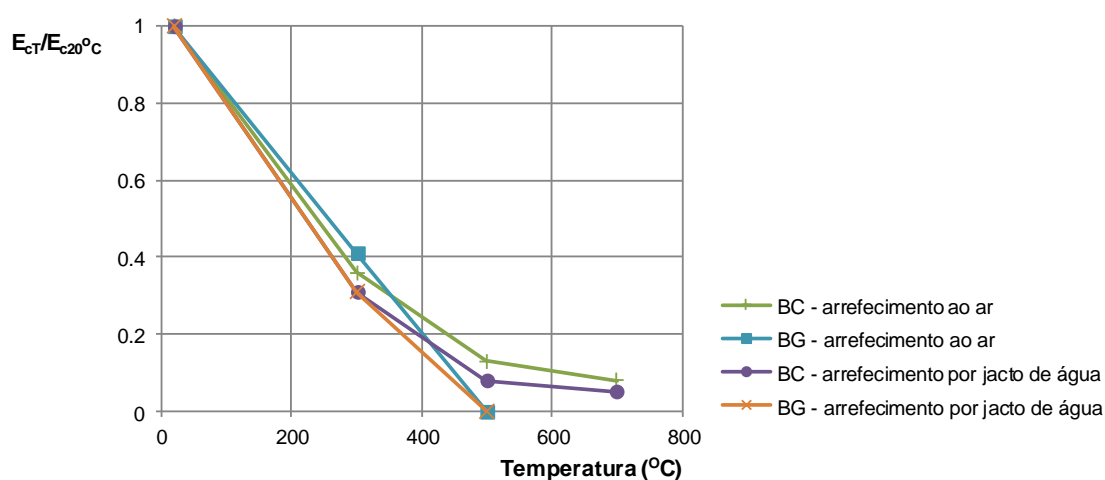


Figura 11. Módulo de elasticidade residual – arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água – comparação entre betão calcário (BC) e betão granítico (BG).

### 3. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido permitiu verificar que as propriedades mecânicas residuais do betão, constituído por agregados calcários ou por agregados graníticos, sofrem alterações quando o betão é submetido a altas temperaturas. Atendendo às variáveis testadas, pode-se extrair as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão do betão sofreu uma redução substancial com o aumento da temperatura. Ainda que a diminuição seja ligeira até temperaturas próximas dos 300°C, essa redução acentuou-se para temperaturas superiores.
- O processo de arrefecimento também interfere na redução da resistência à compressão do betão. Nos provetes em que se aplicou o arrefecimento por jacto de água, o betão calcário apresentou pior desempenho quando comparado com o betão granítico, independentemente do nível de carga e do nível de temperatura atingido. No entanto, no caso do arrefecimento ao ar, os provetes constituídos por betão calcário recuperam o seu desempenho quando comparados com o betão granítico para nível de carga  $0,7f_{cd}$  e temperaturas acima de 400°C.

- À medida que o nível de carga aumenta mais significativa é a influência do processo de arrefecimento na redução da resistência à compressão residual do betão. Comparando os dois processos de arrefecimento aplicados, verifica-se que essa influência é mais negativa no arrefecimento por jacto de água.
- A resistência residual à tracção do betão também diminui com o aumento da temperatura. O estudo desta propriedade mecânica mostrou que a composição do betão (mistura e natureza de agregados) é uma variável que influencia essa diminuição em virtude das transformações térmicas ocorridas nos seus componentes. Constatou-se que essa redução é maior no betão calcário.
- A resistência residual à flexão sofre alterações em função do tipo de arrefecimento aplicado. O arrefecimento ao ar tem um efeito menos acentuado quando comparado com o arrefecimento por jacto de água, independentemente da constituição do betão. Todavia, o uso de agregados calcários melhora o comportamento à flexão quando comparado com agregados graníticos.
- O módulo de elasticidade do betão decresce com o aumento da temperatura, independentemente do tipo de agregados constitutivos do betão e do método de arrefecimento aplicado (ainda que o arrefecimento por jacto de água cause mais danos do que o arrefecimento ao ar).

Os resultados deste programa experimental são similares aos descritos na literatura. Verifica-se que a resistência dos elementos de betão diminui com o aumento da temperatura, podendo atingir uma perda quase total para temperaturas acima dos 600°C. De igual modo, deve-se atender ao processo de arrefecimento aplicado, dado que quanto mais brusco este for maiores são os danos causados.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Sika Portugal, S.A. pela oferta de adjuvantes e resina epóxi e à empresa Lena Agregados S.A. pelo fornecimento de agregados.

## **6. REFERÊNCIAS**

- [1] Troxell, G. E.; Davis, H. E.; Kelly, J. W. - *Composition and Properties of Concrete*. McGraw-Hill, New York, 1968, 529 p.
- [2] Neville, A. M. - *Properties of Concrete*. Longman Group Limited, Essex, England, 1995, 844 p.
- [3] Luccioni, B. M.; Figueroa, M. I.; Danesi, R. F. - *Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures*. Engineering Structures, vol 25, no. 6, 2003, p. 729 - 742.
- [4] Georgali, B.; Tsakiridis, P. E. - *Microstructure of fire-damaged concrete*. Cement and Concrete Composites, vol. 27, 2005, p. 255 - 259.
- [5] Sakr, K.; El-Hakim, E. - *Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties*. Cement and Concrete Research, vol. 35, 2005, p. 590 - 596.
- [6] Janotka, I.; Nurnbergerova, T. - *Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume*. Nuclear Engineering and Design, 2005, vol. 235, p. 2019 - 2032.
- [7] Sanad, A. M. et al. - *Structural behaviour in fire compartment under different heating regimes—Part 1 (slab thermal gradients)*. Fire Safety Journal, vol. 35, 2000, p. 99 - 116.
- [8] Cioni, P.; Croce, P.; Salvatore, W. - *Assessing fire damage to r.c. elements*. Fire Safety Journal, vol. 36, 2001, p. 181 - 199.
- [9] Xiao, J.; Konig, G. - *Study on concrete at high temperature in China - an overview*. Fire Safety Journal, vol. 39, 2004, p. 89 - 103.
- [10] Kalifa, P.; Menneteau, D. F.; Quenard, D. - *Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures*. Cement and Concrete Research, vol. 30, 2000, p. 1915 - 1927.
- [11] Poon, C. S.; Shui, Z. H.; Lam, L. - *Compressive behaviour of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures*. Cement and Concrete Research, vol. 34, 2004, p. 2215 - 2222.

- [12] Hertz, K. D. - *Concrete strength for fire safety design*. Magazine of Concrete Research, vol. 57, no. 8, 2005, p. 445 - 453.
- [13] Aitcin, P. C. - *The durability characteristics of high performance concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, vol. 25, 2003, p. 409 – 420.
- [14] Castellotea, M. et al. - *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction*. Cement and Concrete Research, vol. 34, 2004, p. 1633 – 1644.
- [15] Ye, G. et al. - *Phase distribution and microstructural changes of self- compacting cement paste at elevated temperature*. Cement and Concrete Research, vol. 37, 2007, p. 978 - 987.
- [16] Schneider, U. - *Behaviour of Concrete at High Temperatures*. RILEM - Report to committee n° 44 - PHT, Paris, 1982, 72 p.
- [17] Bazant, Z. P.; Kaplan, M. F. - *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*. Longman, 1996, p. 424.
- [18] Hager, I. - *Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques*. Tese de Doutorado, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2004, 183 p.
- [19] Santos, C. C. et al. - *Influence of the cooling process on the residual mechanical properties of ordinary concretes*. 1st International workshop on concrete spalling due to fire exposure, MFPA Institute Leipzig, Germany, 2009, 10 p.
- [20] NP EN 206-1:2007 - *Concrete Part 1: Specification, performance, production and conformity*. 2007, 84 p.
- [21] RILEM TC 200-HTC - *Mechanical concrete properties at high temperature – Modeling and applications*. Materials and Structures, vol.38, 2005, p. 913-919.
- [22] NP EN 12390-6:2003 - *Testing hardened concrete Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*. 2003, 14 p.
- [23] NP EN 12390-5:2009 - *Testing hardened concrete Part 5: Flexural strength of test specimens*. 2009, 13 p.
- [24] RILEM TC 129-MHT – *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures*. Materials and Structures, vol. 37, 2004, p 139-144.
- [25] Sims, I.; Brown, B. - *Concrete aggregates*. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Arnold London, 4th Edition, 1998, p. 903-1011.