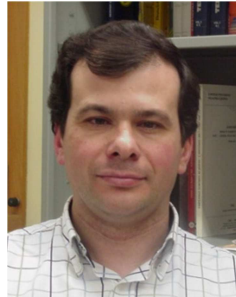


INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE ARREFECIMENTO E DO CARREGAMENTO NA RESISTÊNCIA RESIDUAL À COMPRESSÃO DE BETÕES NORMAIS APÓS INCÊNDIO



Cristina Calmeiro dos Santos

Equiparada a Profa. adjunto
Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal.
ccalmeiro@ipcb.pt



João Paulo Correia Rodrigues

Professor
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.
jpaulocr@dec.uc.pt



António Leça Coelho

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
alcoelho@Inec.pt

SUMÁRIO

O betão apresenta em geral um bom comportamento ao fogo, no entanto em incêndios de grande severidade e longa duração, os elementos de betão podem perder parcial ou totalmente a sua capacidade de carga. Por outro lado, as condições de extinção do incêndio têm uma influência significativa nas propriedades mecânicas do betão sendo a sua degradação tanto maior quanto mais brusco for o processo de arrefecimento. Com o objectivo de conhecer a resistência residual à compressão dos betões normais após incêndio realizaram-se um conjunto de ensaios em que se testou a influência do nível de carregamento e do processo de arrefecimento nesta propriedade.

Palavras-chave: betão; incêndio; resistência; compressão; residual.

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de betão apresentam um bom comportamento ao fogo devido à baixa condutibilidade térmica do betão. No entanto, essas estruturas podem ser afectadas, de forma mais ou menos significativa, dependendo os danos da severidade do incêndio. O aumento da temperatura causa uma redução na resistência mecânica dos elementos por degradação das propriedades mecânicas do betão e do aço [1, 2].

As propriedades mecânicas e térmicas do betão quando submetido a elevadas temperaturas sofrem alterações resultantes de factores ambientais e factores inerentes aos materiais constituintes do betão. Entre os factores ambientais destacam-se a taxa de aquecimento e a

temperatura máxima atingida. Relativamente aos factores inerentes aos materiais constituintes do betão é de sublinhar as mudanças físico-químicas na pasta de cimento e nos agregados e alguma incompatibilidade térmica entre os agregados e a pasta de cimento [3 - 5].

Com efeito as transformações físico-químicas que ocorrem no betão quando submetido a altas temperaturas são difíceis de caracterizar em virtude do betão ser um material composto por diversos materiais com características térmicas muito específicas, sem descuidar as propriedades que dependem de factores como a humidade e porosidade do betão.

Embora o conhecimento das propriedades mecânicas e térmicas do betão quando submetido a altas temperaturas seja consistente [6 - 8], continua insuficiente o conhecimento das propriedades mecânicas residuais após o incêndio.

Vários autores realizaram estudos experimentais para verificar a influência do carregamento na resistência residual à compressão do betão quando submetido a elevadas temperaturas. Constataram que o nível de carregamento apresentava um efeito positivo relativamente à resistência residual à compressão, uma vez que os provetes sujeitos a uma determinada carga apresentavam uma redução da resistência residual à compressão menor que os provetes não carregados [7]. Tal facto deve-se a uma densificação da matriz cimentícia do betão e a uma limitação da fissuração [11].

Ensaio efectuados por alguns investigadores permitiram concluir que o betão tem pequenas perdas na resistência à compressão para temperaturas entre os 100°C e os 400°C o que não se verifica para temperaturas acima dos 400°C onde estas perdas aumentam drasticamente com o aumento de temperatura a que o betão esteve sujeito [12].

O tipo de agregado que faz parte da composição do betão é também um factor que interfere na resistência residual à compressão do betão sujeito a altas temperaturas. O betão constituído por agregados siliciosos perde maior resistência à compressão do que o betão constituído por agregados calcários ou agregados leves, no entanto essa diferença desaparece quando a temperatura atinge cerca de 800°C [2].

Sabe-se que o processo de extinção do incêndio é relevante para a determinação da capacidade de carga residual das estruturas de betão [1], uma vez que a perda da resistência do betão arrefecido mediante jacto de água é maior do que para o arrefecido ao ar. Esta degradação começa logo a partir dos 100°C sendo a resistência muito baixa ou nula para temperaturas superiores a 600°C, dependendo da composição do betão [13].

Com o objectivo de contribuir para um conhecimento mais preciso da influência do processo de extinção do incêndio na capacidade resistente residual das estruturas de betão, desenvolveu-se um programa experimental, no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra, para o conhecimento do comportamento de betões normais após incêndio. Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos relativamente à avaliação da influência da temperatura, do carregamento e do tipo de arrefecimento na resistência residual à compressão do betão.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos ensaios realizados dois processos de arrefecimento foram testados, 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 sob carregamento constante e igual a uma percentagem do valor de cálculo da tensão de rotura à compressão do betão à temperatura ambiente ($0,3$ e $0,7 f_{cd}$), sendo depois ensaiados à compressão.

2.1 Composição do betão

Após a realização de um estudo de mercado para conhecer as composições de betão mais representativas das usadas em obras de construção civil em Portugal, foi escolhida a seguinte composição de betão.

A composição do betão era composta por cimento Portland (CEM) tipo II/A-L 42,5R (composição química: $SO_3 \leq 4\%$ e $Cl \leq 0,10\%$; resistência à compressão: 2 dias - 20MPa e 28 dias - 42,5MPa), 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.

Quadro1. Composição do betão por m³

CEM [Kg]	Água [dm ³]	SP [dm ³]	A1 [Kg]	A2 [Kg]	B1 [Kg]	B2 [Kg]	A/C
300	166	3,30	364	495	505	377	0,56

O quadro 2 apresenta os resultados dos ensaios de compressão realizados para determinar a classe do betão de acordo com a NP EN 2006-1 [9].

Quadro 2. Resultados dos ensaios de compressão do betão

f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	Classe de Resistência	$1,0 f_{cd}$ (MPa)	$0,7 f_{cd}$ (MPa)	$0,3 f_{cd}$ (MPa)
57,9						
56,2	57,1	56,1	C45/55	30,2	21,14	9,06
57,3						

2.2 Provetes

Os provetes usados eram cilíndricos de 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 [10] (Fig. 1).

2.3 Metodologia de ensaio

Para simular os processos de arrefecimento comumente utilizados, foram utilizados dois sistemas de ensaio diferentes. O arrefecimento ao ar (com o intuito de simular a extinção

natural do fogo) e o arrefecimento por jacto de água (com a intenção de simular a acção dos bombeiros no combate ao incêndio).

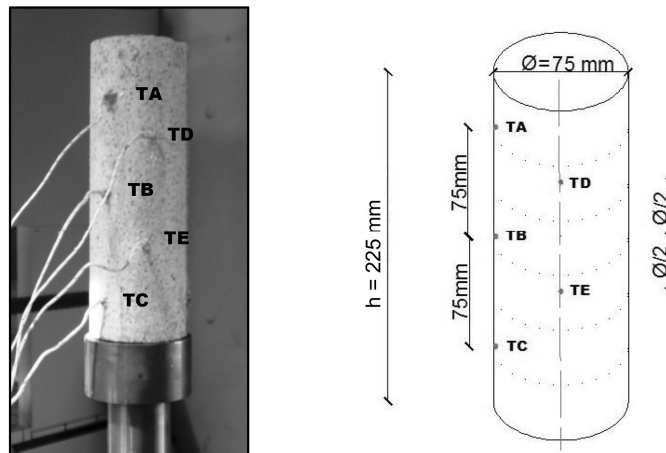


Figura 1. Provetes e localização dos termopares.

2.3.1 Arrefecimento ao ar

Do sistema de ensaio fizeram parte uma máquina universal de tracção / compressão Servosis com capacidade de carga até 600kN, um forno cilíndrico com uma câmara de aquecimento de 90 mm de diâmetro e 300 mm de altura (temperatura máxima de 1200°C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530. Nos ensaios foram registadas as forças, deslocamentos e as temperaturas nos provetes e no forno (Fig. 2).

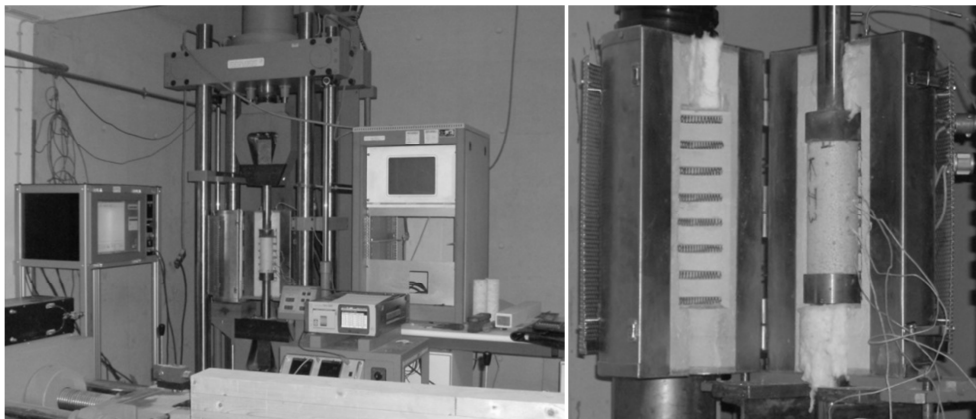


Figura 2. Sistema de ensaio – arrefecimento ao ar.

O procedimento de ensaio adoptado respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [10]. O provete foi submetido a um nível de carregamento de $0.3f_{cd}$ ou $0.7f_{cd}$ que foi mantido constante durante o processo de aquecimento/arrefecimento.

Após ser atingido o nível de carregamento, o provete era aquecido a uma taxa de 3°C/min, até ser atingido o nível de temperatura desejado. Vários níveis de temperatura máxima foram testados (300, 500 e 700°C). Foram também testados provetes à temperatura ambiente para controle do betão. O nível de temperatura era 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 era mantido a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura, o forno era aberto lentamente e o provete arrefecia ao ar. Quando o provete atingia a temperatura ambiente (cerca de 20°C), o ensaio de compressão era realizado. A carga era incrementada a uma taxa de 0.25kN/s até atingir a rotura do provete.

2.3.2 Arrefecimento por jacto de água

O sistema e procedimento de ensaio utilizado, era semelhante ao descrito anteriormente para os ensaios com arrefecimento ao ar, mas com algumas diferenças decorrentes do processo de arrefecimento (Fig. 3).



Figura 3. Sistema de ensaio – arrefecimento por jacto de água.

Depois do provete ter atingido o nível de temperatura desejado, o forno era aberto, deslocado para trás, e procedia-se ao arrefecimento do provete através de jactos de água (Fig. 3). Com este método o provete arrefecia rapidamente. O fluxo de água aplicado era de cerca de $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e a pressão de $3,5 \times 10^5 \text{ Pa}$.

2.4 Resultados

2.4.1 Evolução da temperatura nos provetes

A Figura 4 apresenta a título de exemplo a evolução da temperatura nos termopares do provete para o nível de temperatura de 500°C, com arrefecimento ao ar.

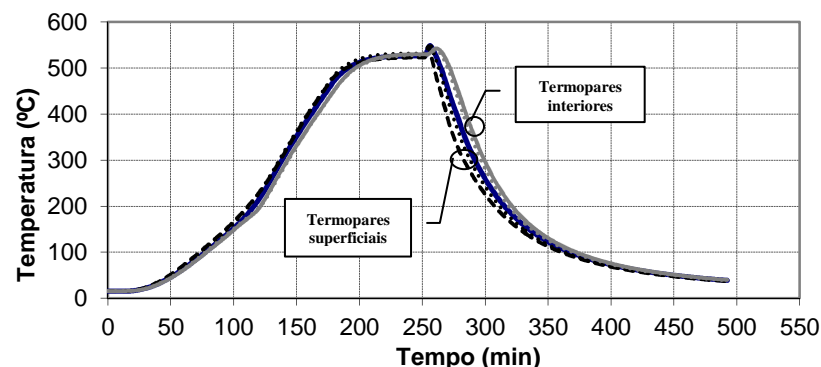


Figura 4. Evolução da temperatura no provete – série de 500°C – arrefecimento ao ar.

A fase de aquecimento demorou cerca de 2,8 horas e o arrefecimento cerca de 4 horas. Durante o aquecimento, como se pode observar, os termopares não apresentaram grandes diferenças de temperatura. No período de estabilização as temperaturas foram muito próximas. Na fase de arrefecimento os termopares superficiais do provete registaram uma maior queda que os termopares interiores, tal como era de esperar (fig. 4).

A Figura 5 mostra a evolução das temperaturas registadas pelos termopares do provete para a série dos 500°C, com arrefecimento por jacto de água. A fase de arrefecimento foi muito rápida, cerca de 10 minutos (aproximadamente 50°C/min). Na fase de aquecimento os termopares interiores registaram menores temperaturas que os exteriores enquanto na fase de arrefecimento passou-se precisamente o contrário.

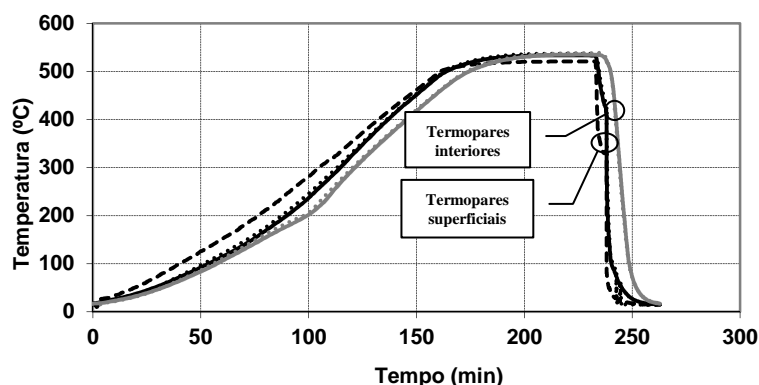


Figura 5. Evolução da temperatura no provete – série de 500°C – arrefecimento por jacto de água.

2.4.2 Resistência residual à compressão

A variação da resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida, caso de arrefecimento ao ar, pode ser observada na figura 6.

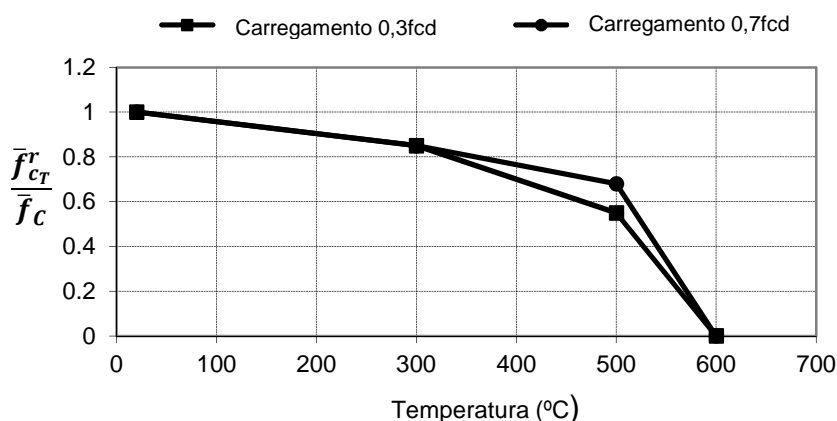


Figura 6. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – arrefecimento ao ar.

Da análise da figura observa-se uma diminuição da resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima a que esteve sujeito. Esta diminuição é

semelhante para os níveis de carga considerados até 300°C. Para níveis superiores de temperatura, os provetes submetidos a um nível de carregamento de $0,3f_{cd}$ apresentaram uma maior redução da resistência residual à compressão.

Conclui-se que o nível de carga de $0,7f_{cd}$ é mais favorável uma vez que permite reduzir a perda de resistência residual à compressão em função da temperatura máxima a que o betão esteve sujeito.

Para o nível de temperatura de 300°C, a resistência residual à compressão sofre um decréscimo na ordem dos 15% para ambos os níveis de carregamento. Na gama dos 500°C a redução foi de 45% para $0,3f_{cd}$ e 30% para o nível de carga de $0,7f_{cd}$. Todos os provetes submetidos a temperaturas de 600°C sofreram rotura durante a fase de estabilização da temperatura, logo a resistência residual à compressão foi considerada nula. Alguns autores indicam valores de resistência para o nível de temperatura de 600°C situação que não aconteceu com este betão. Este facto julga-se ter a ver com os inertes usados na composição deste betão.

A Figura 7 apresenta a variação da resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima em situação de arrefecimento por jacto de água. A leitura dos dados apresentados na figura permite concluir que a redução da resistência residual à compressão do betão por arrefecimento com jacto de água é maior que no caso do arrefecimento ao ar. Todos os provetes submetidos a um nível de carregamento de $0,7f_{cd}$ sofreram rotura durante o processo de arrefecimento não tendo sido possível ensaiar os mesmos à compressão. Para $0,3f_{cd}$, a redução da resistência à compressão residual é cerca de 40% para 300°C, 70% para 500°C e apresenta um valor nulo para 600°C.

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.

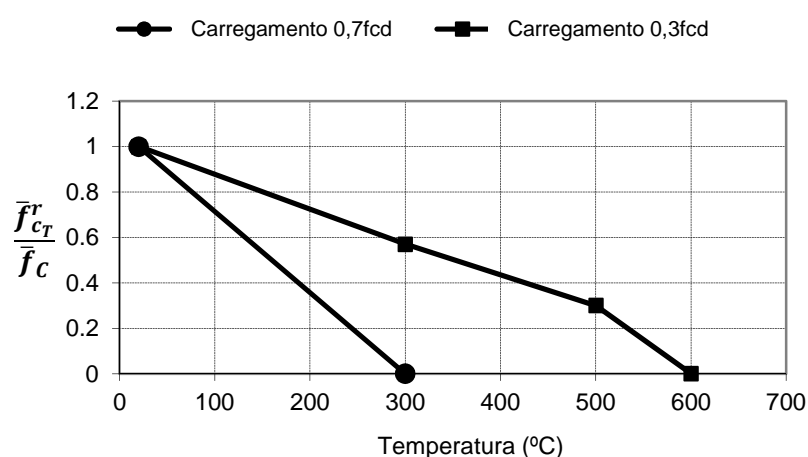


Figura 7. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – arrefecimento por jacto de água.

A influência do processo de arrefecimento na resistência à compressão residual em provetes de betão submetidos a $0,3f_{cd}$ pode ser observada na figura 8. Nesta figura pode-se

observar que o arrefecimento por jacto de água é mais prejudicial para o betão que o arrefecimento ao ar. Constatase que o betão em estudo apresenta valores de resistência residual à compressão para 500°C, atingindo o valor zero para 600°C em ambos os processos de arrefecimento.

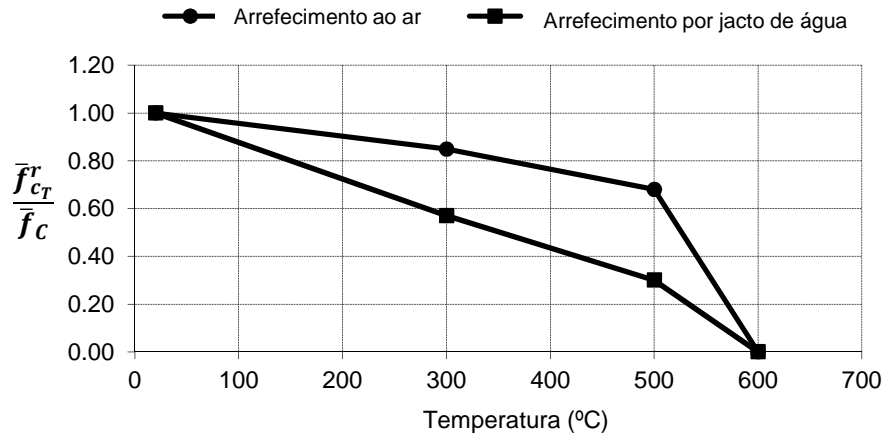


Figura 8. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – nível de carregamento 0,3fcd – comparação dos processos de arrefecimento.

A comparação da influência dos processos de arrefecimento na resistência residual à compressão do betão para o nível de carregamento de 0,7fcd pode ser observada na Fig. 9.

A resistência residual à compressão do betão é adversamente afectada pelo arrefecimento com jacto de água.

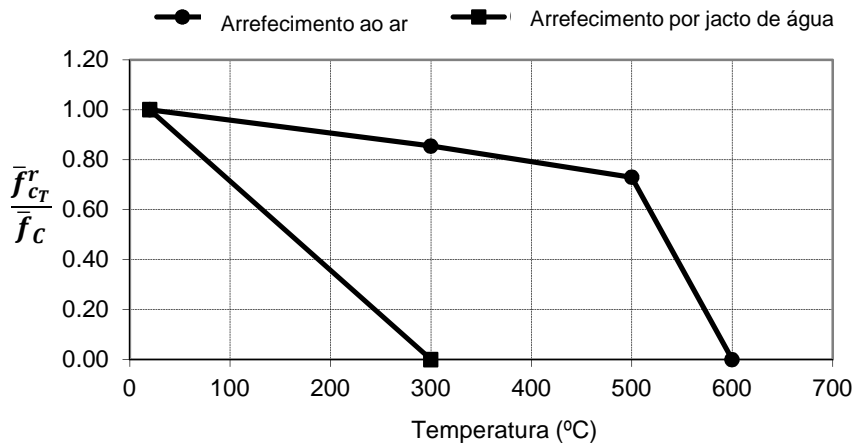


Figura 9. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – nível de carregamento 0,7fcd – comparação dos processos de arrefecimento.

Os ensaios experimentais permitiram concluir que quanto maior é o nível de carregamento maior é a influência do processo de arrefecimento na redução da resistência à compressão residual do betão após incêndio.

3. CONCLUSÕES

Os ensaios efectuados permitem concluir que o processo de arrefecimento apresenta uma influência determinante na redução da resistência à compressão do betão corrente. Constatou-se que o arrefecimento por meio de jacto de água provoca grandes reduções na resistência residual à compressão do betão mesmo para temperaturas relativamente baixas menores que 300°C.

Aquando da intervenção dos bombeiros para extinção do incêndio, a quantidade de água utilizada afecta a resistência do betão podendo comprometer a capacidade de suporte dos elementos estruturais. A fissuração do betão aumenta consideravelmente em virtude do arrefecimento brusco originado pela acção da água.

O nível de carregamento, se não for muito excessivo, interfere positivamente na resistência residual à compressão do betão, diminuindo as suas perdas com a temperatura a que esteve sujeito em caso de incêndio, pois contraria o aparecimento de fissuração interna quando o betão é sujeito ao processo de aquecimento/arrefecimento.

No entanto, estes ensaios experimentais permitiram também verificar que o nível de carregamento tem um efeito benéfico no caso de arrefecimento lento ao ar e um efeito prejudicial quando se procede ao arrefecimento brusco por meio de jacto de água.

Os resultados deste programa de ensaios serão úteis para a determinação da resistência residual dos elementos de betão armado após incêndio. Mostraram que a resistência dos elementos de betão diminuirá à medida que a temperatura aumenta e o processo de arrefecimento seja mais brusco. Estes dados são importantes na tomada de decisão sobre o método de reparação mais apropriado para os elementos de betão após incêndio.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Sika Portugal, S.A. pela oferta de adjuvantes.

REFERÊNCIAS

- [1] Schneider, U.; Nägele, E. – “Repairability of Fire Damaged Structures”, *CIB W14 Report*, 1989, 90 p.
- [2] Abrams, M. S.- “Fire Safety of Concrete Structures”, *ACI Publication SP-80*, Vol. 80, 1983, 308 p.
- [3] Georgali, B.; Tsakiridis, P.E.- “Microstructure of Fire-Damaged Concrete. A Case Study”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, 2005, p. 255-259.
- [4] Ghan, Y. N. et al. – “Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, 1999, p. 23-27.

- [5] Schneider, U.- “Behaviour of Concrete at High Temperatures”, *RILEM - Report to committee n° 44 - PHT*, Paris, 1982, 72 p.
- [6] Harmathy, T. Z. - “Thermal properties of concrete at elevated temperatures”, *Journal of Materials*, Vol. 5, 1970, p. 47-74.
- [7] 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.
- [8] Husem, M. - “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete”, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, 2006, p.155-163.
- [9] NP EN 206-1:2007 - “Concrete Part 1: Specification, performance, production and conformity”, 2007, 84 p.
- [10] Recommendations of RILEM TC 200-HTC - “Mechanical concrete properties at high temperature – Modeling and applications”, *Materials and Structures*, Vol.38, 2005, p. 913-919.
- [11] Kodur et al. - “A overview of a fire protection in buildings”, *World Trade Center Building Performance Study*, 2002, 28 p.
- [12] Phan, L. T.; e Carino, N. J. - “Fire performance of High Strength Concrete”; *ASCE/SEI structures congress*, Philadelphia, 2000, 9 p.
- [13] 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.