

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO RESIDUAL DE BETÕES CALCÁRIOS APÓS INCÊNDIO

C. CALMEIRO SANTOS

Eq. Prof. Adjunto
EST-IPCB
Castelo Branco

**JOÃO PAULO C.
RODRIGUES**

Professor
FCTUC
Coimbra

A. LEÇA COELHO

Investigador
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

Com o objectivo de conhecer a resistência residual à compressão dos betões calcários após incêndio, desenvolveu-se um programa experimental no qual se consideraram como variáveis de estudo: o processo de arrefecimento (arrefecimento ao ar e arrefecimento por jacto de água); a temperatura máxima a que o betão esteve sujeito (20°C, 300°C, 500°C e 700°C) e o nível de carregamento (0.3fcd e 0.7fcd).

ABSTRACT

In order to know the residual compressive strength of calcareous concrete after fire exposure an experimental programme was carried out in which it was considered the following variables: the process of cooling (cooling in the air and cooling by water jet), the maximum temperature that the concrete was subjected (20°C, 300°C, 500°C and 700°C) and the loading level (0.3fcd and 0.7fcd).

1. INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura resultante da acção de um incêndio provoca uma redução na resistência mecânica dos elementos por degradação das propriedades mecânicas do betão e do aço [1, 2]. Nessa degradação interferem factores referentes à acção térmica e factores inerentes aos materiais constituintes do betão. Em relação aos primeiros destacam-se a taxa de aquecimento e a temperatura máxima atingida. Em relação aos segundos 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 descurar as propriedades que dependem de factores como a humidade e porosidade do betão.

Os fenómenos mais importantes que surgem nas estruturas de betão quando sujeitas a incêndio são a fendilhação e o spalling do betão. O aquecimento rápido do betão associado à impossibilidade de saída para o exterior do vapor de água gerado no interior do mesmo leva a que surjam fenómenos de destacamento que colocam as armaduras expostas ao fogo ficando comprometida a capacidade resistente do elemento.

Vários trabalhos de investigação [6 - 8] foram realizados no sentido de caracterizar as propriedades mecânicas e térmicas do betão quando submetido a altas temperaturas, todavia o número de trabalhos referentes às propriedades do betão após incêndio são mais reduzidos. Autores como Kodur e Hager realizaram estudos experimentais para testar a influência do carregamento na resistência residual à compressão do betão quando submetido a elevadas temperaturas. Constataram que o nível de carregamento quando não excessivo 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. Tal facto julga dever-se a uma densificação da matriz cimentícia do betão e a uma limitação da fissuração [7, 11].

Ensaio efectuados para avaliar os efeitos da temperatura no betão normal após incêndio, permitiram concluir que o betão tem pequenas perdas na resistência residual 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].

Estudos experimentais realizados com diversas composições de betão provam que existe uma correlação entre a resistência à compressão e os estragos provocados pelo aumento da temperatura. Por exemplo, a rotura do betão denominado de alta resistência sob a acção do fogo é tão mais violenta quanto mais elevada a sua classe de resistência, porque apresenta uma estrutura mais compacta e menos permeável à fuga do vapor de água gerado durante o incêndio. Por outro lado este betão é muito frágil, originando uma propagação de fendas pela matriz do ligante e/ou pelos próprios agregados, dado que a resistência deste tipo de betão é semelhante à resistência da pasta de cimento.

O processo de extinção do incêndio também interfere na capacidade de carga residual das estruturas de betão, como mostrou Schneider e Nägele [1]. A perda da resistência do betão quando arrefecido mediante jacto de água é maior do que para o betão 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].

O tipo de agregado constituinte do betão é também factor determinante na diminuição da resistência residual à compressão do betão sujeito a altas temperaturas. Abrams constatou que o betão constituído por agregados siliciosos perde maior resistência à compressão do que o betão constituído por agregados calcários ou agregados leves, ainda que essa diferença seja irrelevante quando a temperatura atinge cerca de 800°C. A natureza do agregado está intimamente ligada com o coeficiente de expansão térmica e com a condutibilidade térmica [2].

Com o objectivo de determinar a influência da temperatura, do carregamento e do processo de extinção do incêndio, na resistência residual à compressão de betões calcários após incêndio, desenvolveu-se um programa experimental no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos neste artigo.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nos ensaios realizados foram testados 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 fcd), sendo depois ensaiados à compressão.

2.1 Composição do betão

O betão em estudo foi fabricado com agregados de natureza calcária e apresentava a seguinte composição (Tabela 1): 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.

Tabela 1. 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

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

Tabela 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	57.1	56.1	C45/55	30.2	21.14	9.06
56.2						
57.3						

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. 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 [10] (Fig. 1).

Os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem, ou seja, em ambiente de laboratório, de modo a adquirem endurecimento suficiente (presa) para poderem ser desmoldados e transportados até à zona de cura. O período de cura foi de 28 dias.

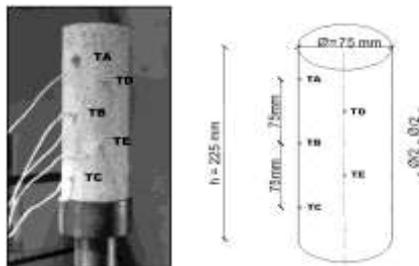


Figura 1. Provetes e localização dos termopares.

2.3 Metodologia de ensaio

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.

2.3.1 Arrefecimento ao ar

O sistema de ensaio era composto por uma máquina universal de tracção/compressão Servosis com capacidade de carga de 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. 2a).

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 $0.7f_{cd}$, o qual foi mantido constante durante o processo de aquecimento/arrefecimento.

Quando se atingiu o nível de carregamento pretendido, o provete foi aquecido a uma taxa de 3°C/min, até ser obtido o nível de temperatura desejado. Foram testados três níveis de temperatura

máxima (300°C, 500°C e 700°C). Foram também testados provetes à temperatura ambiente para controle do betão.

Considerava-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°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, abria-se o forno lentamente deixando o provete arrefecer ao ar. Quando o provete atingia a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizava-se o ensaio de compressão. A carga era incrementada a uma taxa de 0.25kN/s até se atingir a rotura do provete.

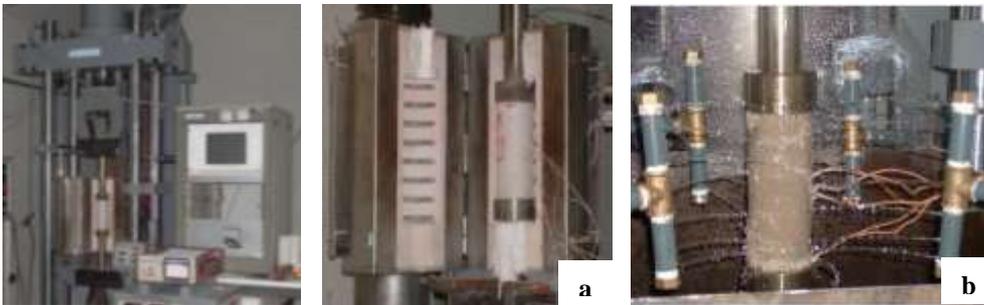


Figura 2. Sistema de ensaio. a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jacto de água.

2.3.2 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 o provete atingia o nível de temperatura desejado, o forno era aberto, deslocado para trás, e procedia-se ao arrefecimento do provete 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. 2b).

2.5 Resultados

Da análise da figura 3 observa-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°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.

Verifica-se ainda 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.

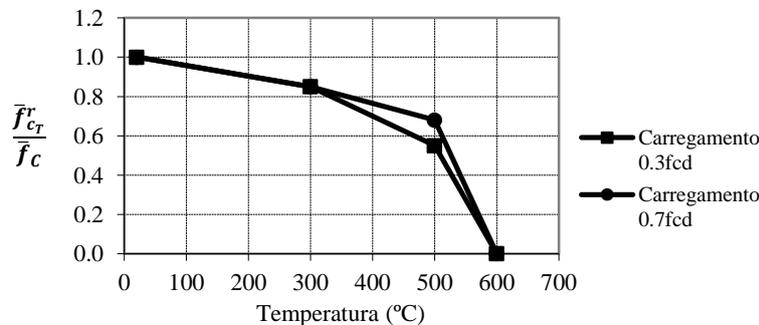


Figura 3. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – arrefecimento ao ar.

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 o nível de carga de 0.3f_{cd} e 30% para 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 dever-se aos agregados usados na composição do betão que apresentam alguma instabilidade para estes níveis de temperatura.

A variação da resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima em situação de arrefecimento por jacto de água é apresentada na figura 4.

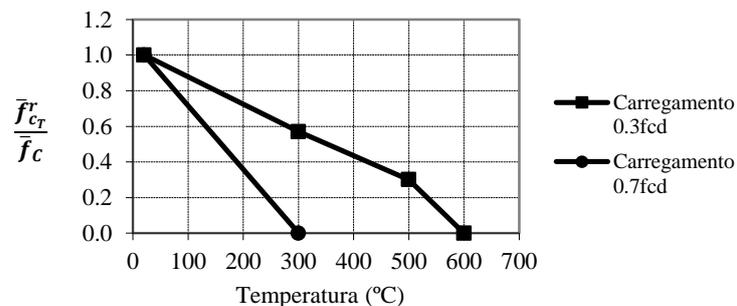


Figura 4. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – arrefecimento por jacto de água.

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.

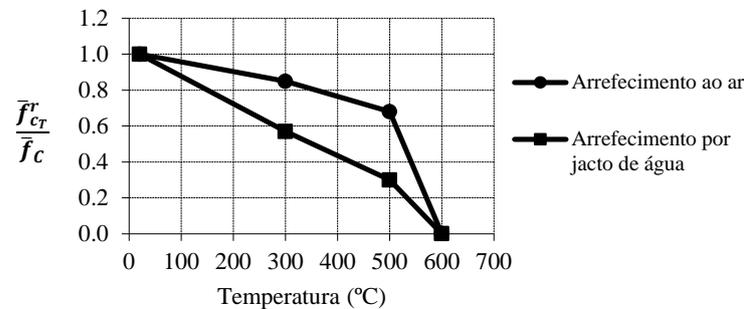


Figura 5. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – nível de carregamento 0.3f_{cd} – comparação dos processos de arrefecimento.

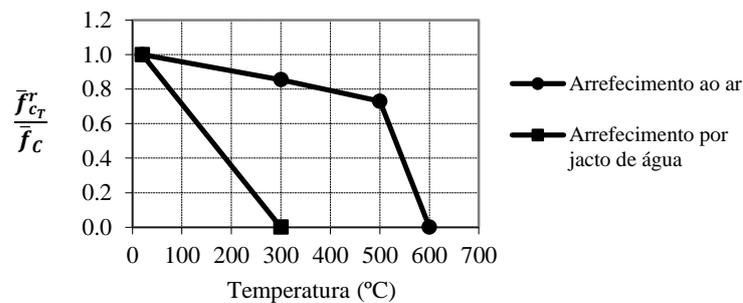


Figura 6. Resistência residual à compressão do betão em função da temperatura máxima atingida – nível de carregamento 0.7f_{cd} – comparação dos processos de arrefecimento.

A resistência à compressão residual em provetes de betão submetidos a 0.3f_{cd} é mais afectada no caso do arrefecimento por jacto de água que no caso de arrefecimento ao ar. Ainda que o betão em estudo apresente valores de resistência residual à compressão para 500°C, atinge o valor zero para 600°C, em ambos os processos de arrefecimento (Fig. 5).

Atendendo à influência dos processos de arrefecimento na resistência residual à compressão do betão para o nível de carregamento de 0.7f_{cd}, verificamos que a resistência residual à compressão do betão é adversamente afectada pelo arrefecimento com jacto de água (Fig. 6).

3. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido permitiu extrair as seguintes conclusões:

- O processo de arrefecimento apresenta uma influência determinante na redução da resistência à compressão do betão ordinário de agregados calcários. 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 comprometendo 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, dado que diminui as perdas provocadas pela temperatura a que esteve sujeito em situação de incêndio, contrariando o aparecimento de fissuração interna quando o betão é sujeito ao processo de aquecimento/arrefecimento.
- Os ensaios experimentais permitiram também verificar que o nível de carregamento associado ao tipo de arrefecimento tem um efeito benéfico apenas no caso de arrefecimento lento ao ar, isto é, 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.

Deste modo, os resultados deste programa de ensaios mostraram que a resistência dos elementos de betão diminui à medida que a temperatura aumenta e o processo de arrefecimento seja mais brusco.

Estes dados devem ser considerados aquando da tomada de decisão sobre o método de reparação a aplicar nos elementos de betão após incêndio. O processo de reparação deve garantir/restaurar a capacidade de carga original do elemento e, sempre que possível, corrigir erros de projecto ou de construção quando o edifício foi construído. Deve-se ainda, aquando do processo de intervenção, restabelecer e/ou reforçar a resistência ao fogo dos elementos estruturais, assim como assegurar as condições de serviço da estrutura. No final do processo de reabilitação das estruturas danificadas pelo fogo deve estar assegurada a estabilidade e a capacidade resistente da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Sika Portugal, S.A. pela oferta de adjuvantes para a fabricação dos betões ensaiados.

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 Doutoramento*, 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.; 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.



Cristina Calmeiro dos Santos
 Eq. Prof. Adjunto EST-IPCB
 Engenheira Civil (FCTUC)
 Mestre Engenharia Civil
 Especialização Ciências
 da Construção (FCTUC)
 Doutoranda em Engenharia
 Civil (FCTUC).



João Paulo C. Rodrigues
 Eng. Civil (FCTUC)
 Mestre em Estruturas
 (FCTUC)
 Doutoramento em Enga.
 Civil (IST)
 Prof. Auxiliar da FCTUC



António Leça Coelho
 Eng. Civil (FEUP)
 Doutoramento em Enga.
 Civil (FEUP)
 Investigador Principal
 (LNEC)