



Avaliação de Estruturas de Betão Degradadas pelo Fogo

F. Branco¹, J. R. Santos¹, J. de Brito¹

¹ ICIST, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa – Portugal.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i1.40>

Artículo recibido el 27 de Octubre de 2012 y revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 12 de Diciembre de 2012. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el tercer número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2013

RESUMEN

Um dos principais problemas na reabilitação de estruturas de betão que estiveram sujeitas à acção de um fogo, é a determinação da espessura degradada do betão que necessita ser substituída, não havendo presentemente nenhuma técnica expedita para o realizar. Neste artigo apresenta-se um método de ensaio (Fire Behaviour Test - FBTEST), desenvolvido pelos autores, em que a espessura degradada de betão é quantificada recorrendo à medição das características de absorção de água e da tensão de rotura à tracção de discos obtidos a partir de carotes retiradas na estrutura danificada. Esta técnica tem vindo a ser aplicada com sucesso em peritagens de incêndios em estruturas de betão.

Palavra-Chave: dano de fogo; concreto; estruturas; reabilitação; teste.

ABSTRACT

One of the major problems in the rehabilitation of concrete structures affected by fire is the quantification of the deteriorated layer of concrete that needs to be replaced. Presently there is no practical test to evaluate that deteriorated layer. In this paper a test method (Fire Behaviour Test – FBTEST) developed by the authors is presented allowing that evaluation by measuring the evolution, along the depth, of water absorption and tensile stress in discs obtained from disks from cores of the affected structure. This technique has been applied, with success, in several fire accidents in concrete structures.

Keywords: fire damage; concrete; structures; rehabilitation; test.

Autor de contacto: Fernando Branco (fbranco@civil.ist.utl.pt)

© 2013 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 3, No. 1, Enero – Abril 2013, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de enero de 2013.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

Os acidentes de incêndio em estruturas de betão, nomeadamente em instalações industriais e em edifícios ocorrem em Portugal com uma frequência de algumas unidades por ano. Os autores deste artigo, ao longo dos últimos anos, tiveram a oportunidade de realizar diversas peritagens a acidentes de incêndios quer em túneis, quer em construções industriais e em edifícios de habitação, quer mesmo em pontes, o que lhes permitiu identificar um problema que aparece sempre na reabilitação decorrente destas situações e que consiste na quantificação da zonas degradadas do betão estrutural (Neves, 1995; Neves, 1997; Mendes, 2000).

Ao contrário das estruturas metálicas, em que as estruturas afectadas por um incêndio ficam muito deformadas e não têm em geral reaproveitamento (Neves, 1995), nos incêndios em construções de betão, dada a baixa condutibilidade térmica deste, as estruturas são frequentemente recuperáveis. Nestes casos é necessário começar por identificar a espessura de betão degradada que terá então de ser substituída com a aplicação de uma nova camada de betão e eventualmente substituindo também as armaduras de reforço (FSJ, 1990; ECP, 2007). Tal tem sido realizado em diversas recuperações de estruturas de betão danificadas pelo fogo, entre as quais se refere, pela sua gravidade, o incêndio na Estação Alameda do metro de Lisboa em que a laje de cobertura (com 1 m de espessura) esteve sujeita a um incêndio durante 12 horas, sem que os bombeiros tivessem condições de intervir, tendo a laje ficado seriamente danificada e sido posteriormente reparada na espessura deteriorada, recuperando toda a sua segurança (Branco, 1998) (Figura 1).

Uma superfície de betão sujeita às temperaturas de um incêndio, apresenta um gradiente térmico da superfície para o interior. À medida que as temperaturas vão aumentando o betão vai perdendo as características de resistência em profundidade e vai fissurando pelas tensões internas geradas pela pressão do vapor de água (FIB, 2007). Quando as temperaturas elevadas chegam ao nível das armaduras estas dilatam e como estão restringidas, tendem a instabilizar por compressão, deformando-se, e provocando o descasque do betão superficial remanescente. Este é o aspecto visual típico das estruturas de betão danificadas pelo fogo (Figura1). Com o desenvolvimento do incêndio, o betão continua a degradar-se em profundidade em função das temperaturas atingidas. Além disso, a posterior intervenção dos bombeiros, com aplicação de água fria provoca uma microfissuração superficial do betão que também reduz as suas características.

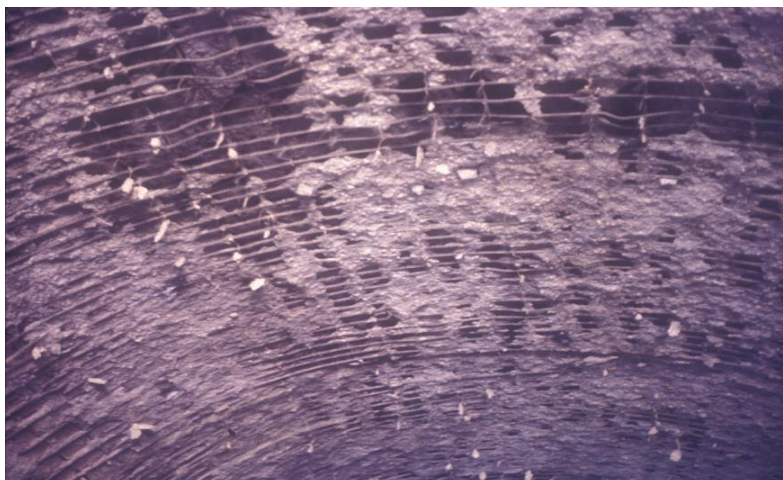


Figura 1. Estrutura de um túnel em betão danificado por um incêndio (Branco, 1998)

A reparação destas estruturas consiste habitualmente na remoção de todo o betão danificado e das armaduras existentes e na aplicação de uma nova camada de betão (não retráctil) e novas armaduras, mediante um projecto específico de reabilitação (EC2, 2005; Schneider, 1990). Neste processo de reparação o principal problema consiste em determinar a espessura degradada do betão, já que a partir da zona superficial não é possível fazer uma quantificação apenas por observação visual. Esta informação é assim particularmente importante para a optimização da operação de reparação/reforço, ou mesmo para a tomada de decisão sobre uma eventual demolição do elemento.

Nas peritagens a acidentes de incêndio, durante o trabalho inicial de inspecção e avaliação, são habitualmente extraídas de carotes de betão (Figura 2) para determinação da resistência à compressão do betão afectado, característica fundamental para a elaboração do projecto de reforço. Na preparação destas carotes para o ensaio de compressão, o betão junto à superfície, que esteve em contacto com o fogo, é frequentemente eliminado. A carote remanescente fica assim com um betão cuja resistência é variável ao longo do seu comprimento em função das temperaturas a que ficou sujeita. O valor da tensão de rotura obtida nos ensaios de compressão é pois de difícil interpretação já que engloba a totalidade da carote, não reflectindo especificamente a zona superficial danificada.

Não existindo uma técnica para quantificar de forma expedita a zona degradada de betão, os autores desenvolveram um novo método de ensaio - Fire Behaviour Test (FBTEST) - com o objectivo de quantificar a espessura degradada por acção de um incêndio, método que se descreve no presente artigo.

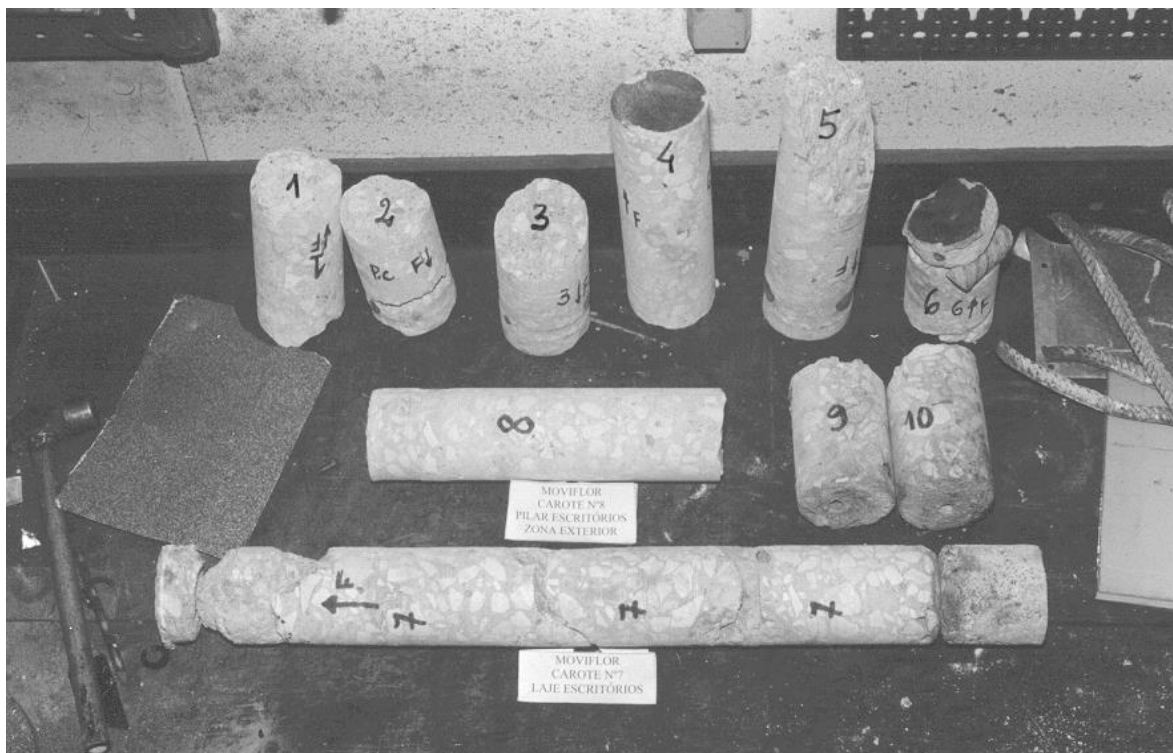


Figura 2. Carotes de betão extraídas das estruturas sujeitas a incêndio

2. VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO BETÃO COM AS TEMPERATURAS

A acção das temperaturas elevadas no betão conduz a alterações físico-químicas na sua composição que se traduzem numa perda parcial de resistência, irreversível, mais ou menos significativa em função das temperaturas atingidas (Alonso, 2004).

Além disso, a relativa baixa condutibilidade térmica do betão faz com que do processo fortemente não estacionário que é a evolução das temperaturas durante o incêndio resultem gradientes térmicos importantes nos elementos de betão (Neville, 1981; FSJ, 1990).

Os gradientes térmicos geram tensões de coacção no interior da massa do betão, as quais, juntamente com as dilatações diferenciadas dos componentes do betão que possuem diferentes coeficientes de dilatação térmica, e com as tensões geradas pela evaporação da humidade, conduzem a uma fendilhação, que também gera uma redução da resistência na fase de aquecimento. A inversão dos gradientes na fase de arrefecimento faz com que o aumento de fendilhação prossiga nesta fase, conduzindo a uma menor resistência residual.

Estes efeitos são ainda agravados frequentemente pela acção dos bombeiros que, com aplicação de jactos de água fria, aumentam a fissuração do betão e provocam mesmo o seu descasque pela pressão da água.

Genericamente, a evolução do comportamento do betão com as temperaturas traduz-se pelos seguintes efeitos (FSJ, 1990; Bilow, 2008):

- 100 °C - ocorrência da evaporação da água, sem diminuição da resistência;
- 200 °C - resistência residual de cerca de 80 a 90%;
- 300 °C - decomposição dos silicatos de cálcio hidratados e resistência de 70%;
- 500 °C - decomposição da portlandite e resistência de 30 a 40%.

Tal mostra que a resistência do betão começa a ser afectada a partir dos 250 °C a 300 °C e a partir dos 500 °C fica seriamente afectada. Note-se no entanto que, dada a baixa condutibilidade do betão, se a acção do incêndio não se fizer sentir durante um período longo, as temperaturas que conduzem a alterações ficam circunscritas apenas às camadas exteriores dos elementos estruturais. É por isso que é importante quantificar a espessura da zona efectivamente afectada, a considerar num processo de reabilitação estrutural.

3. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DE ENSAIO

Para o desenvolvimento de uma técnica experimental que permitisse caracterizar o comprimento da zona degradada pelo incêndio realizou-se uma campanha laboratorial em que a análise da degradação em profundidade foi obtida através do estudo da evolução das propriedades físico/mecânicas de discos com a espessura de 1,5cm, cortados sequencialmente em carotes de zonas sujeitas a incêndio.

Foi inicialmente analisada a evolução de várias propriedades ao longo da profundidade das estruturas afectadas, tendo-se adoptado a “absorção de água” e a “resistência à tracção” como as propriedades que mais facilmente permitiriam caracterizar a evolução da degradação por incêndio, já que estas propriedades estão directamente associadas à porosidade e à fendilhação que o incêndio provoca no betão.

O desenvolvimento da técnica que se designou de FBTest, constou assim na realização em laboratório de ensaios de absorção de água e de tracção em discos cortados de provetes de betão, sendo nestes, uma das faces sujeita a um incêndio artificial, segundo uma curva de aquecimento pré-definida.

Os provetes tinham geometria cilíndrica (idênticos a carotes), com secção transversal de 9 cm de diâmetro, e altura de 20 cm. Foram colocados nos provetes, ao longo do eixo longitudinal, 6 termopares, posicionados junto à face aquecida e a 1, 3, 5, 10 e 15 cm daquela, para registo, durante o aquecimento das temperaturas no provete ao longo da profundidade. Para o aquecimento dos provetes utilizou-se um forno eléctrico adaptado para peças cilíndricas e com aquecimento somente em uma das faces (Figura 3). A curva de aquecimento adoptada caracteriza-se por três variações lineares, da temperatura inicial dos provetes a 70 °C em 10 minutos, de 70 a 170 °C também em 10 minutos e de 170 a 800 °C em 30 minutos e por um patamar a 800 °C durante 60 minutos. Foi possível aquecer dois provetes em simultâneo, um instalado junto à extremidade superior do forno, e outro junto à inferior (Figura 3).



Figura 3. Forno eléctrico e provetes (superior e inferior) sujeitos a aquecimento

O registo das temperaturas no interior dos provetes instrumentados foi feito de modo automático (Figura 4). No fim do ensaio, o arrefecimento dos provetes foi realizado mantendo-se o forno aberto. Notou-se nos provetes, quer nos colocados na extremidade superior do forno, quer na inferior, junto à face directamente em contacto com o forno, uma camada com coloração mais clara, associada à alteração do betão, provocada pelo aquecimento.

Após arrefecimento, os provetes foram retirados do forno e iniciou-se o processo de corte dos discos nos provetes. Foram também, em paralelo, obtidos discos de provetes não aquecidos (com o mesmo betão) para servirem de comparação.

Posteriormente ao corte dos discos, estes foram colocados numa estufa, permanecendo nesta a 100 °C durante 24 horas, para secagem. Após este intervalo de tempo, os discos foram pesados. Determinado o peso seco, os discos foram introduzidos num tanque com água (Figura 5), permanecendo neste durante 48 horas. Após a saturação, os provetes foram novamente pesados determinando-se o peso saturado e a respectiva percentagem de absorção de água. Os discos saturados foram então

posicionados numa prensa para serem submetidos a compressão diametral até à rotura (Figura 6), avaliando-se a tensão de rotura à tracção do betão dos vários discos.

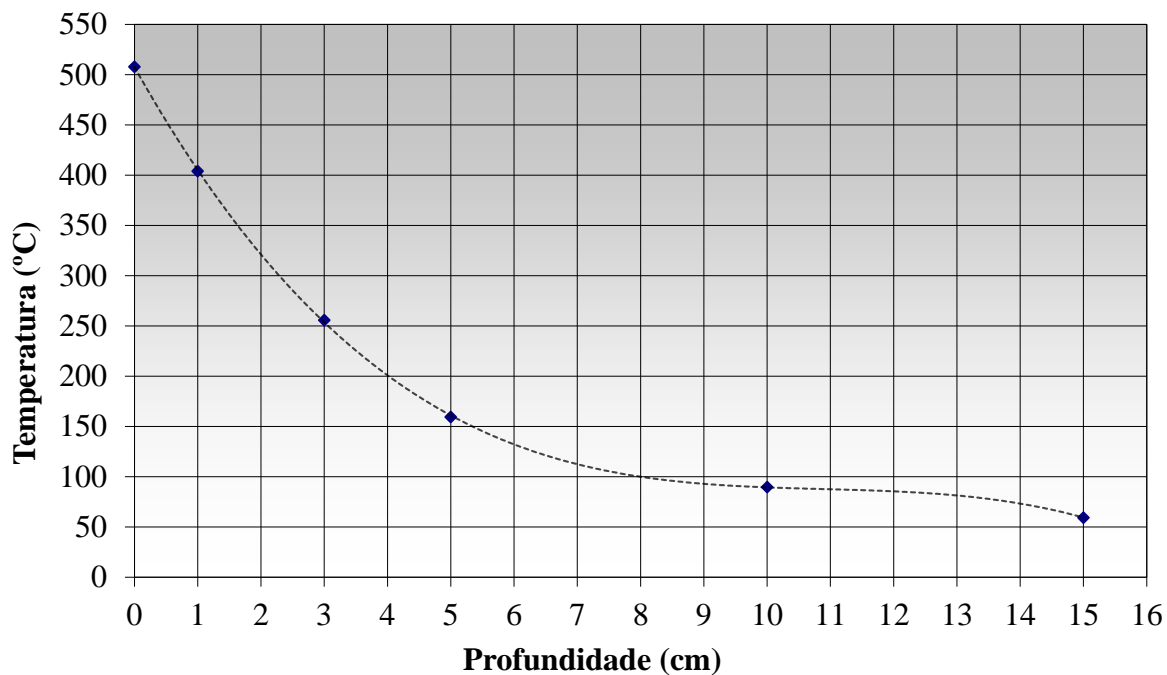


Figura 4. Temperaturas máximas nos termopares, no fim do aquecimento



Figura 5. Saturação dos discos num tanque com água



Figura 6. Ensaio de compressão diametral dos discos

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Variação da absorção de água com a profundidade

A Figura 7 apresenta a variação da absorção de água com a profundidade num provete colocado na extremidade superior do forno, outro na parte inferior e ainda num provete não aquecido.

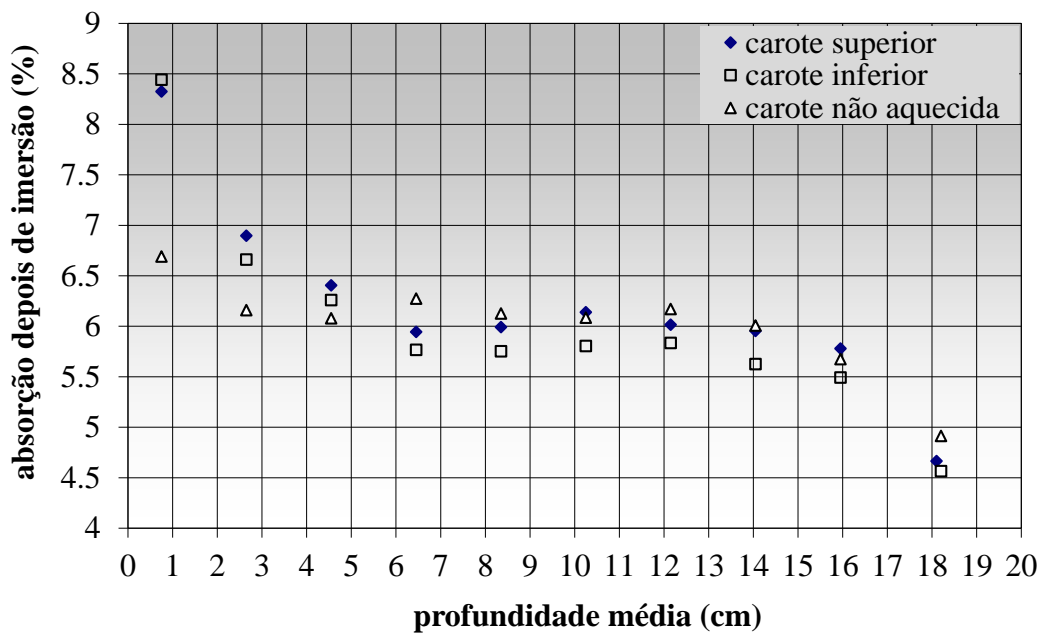


Figura 7. Variação da absorção de água com a profundidade.

Neste diagrama, observa-se que a partir de uma distância situada entre 4,5 e 6,5 cm (temperaturas de 100 a 200 °C) da face aquecida, a variação da absorção de água com a profundidade é muito pequena para ambos os provetes aquecidos. Isto indica que a partir daquelas profundidades o betão não foi afectado pelo aquecimento. O valor anómalo junto à face não aquecida resulta possivelmente da maior concentração de inertes grossos junto àquela face resultante da betonagem.

Ainda analisando o diagrama da Figura 7, pode-se constatar que a zona estável acima descrita apresenta variações da ordem de grandeza das do provete não aquecido. Saliente-se que nesta zona o coeficiente de variação para a absorção de água não ultrapassou 5%, quer para os provetes aquecidos, quer para os não aquecidos (retirando-se o valor anómalo da extremidade não aquecida).

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de absorção, construiu-se um diagrama de variação da absorção, acima do valor médio, *versus* variação da temperatura acima de 200 °C (Figura 8), na zona afectada pelo fogo. Os valores de absorção naquela faixa (entre 200 e os 500 °C) foram determinados por interpolação dos valores experimentais da face aquecida. O valor médio correspondente à média da absorção de todos os provetes aquecidos, na zona praticamente invariável, tem o valor de 5,88% e apresenta um coeficiente de variação de 2,2%, o que mostra a sua uniformidade. A variação ilustrada na Figura 8 mostra a correlação da propriedade “absorção de água “ com o aquecimento do betão, justificando a sua utilização no FBTEST.

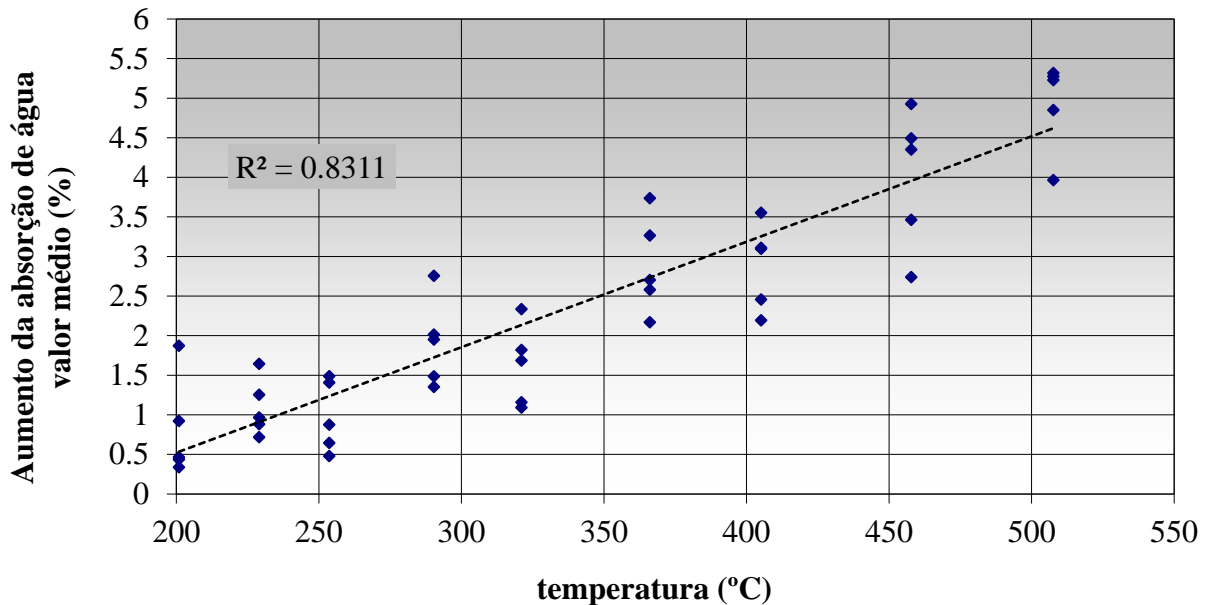


Figura 8. Variação da absorção de água com temperatura (acima de 200 °C)

4.2. Variação da tensão de tracção com a profundidade

A Figura 9 apresenta um diagrama da tensão de rotura à tracção *versus* profundidade média para os provetes aquecidos e também para um provete não aquecido. Deste diagrama pode-se observar que os valores da tensão de tracção, no caso dos provetes aquecidos, têm também uma tendência para estabilizar a partir das profundidades 4,5 e 6,5 cm (temperaturas entre 100 e 200 °C), indicando que a partir desta zona o betão não foi afectado pelo aquecimento. Ainda analisando este diagrama, nota-se no entanto que na zona não afectada existe uma significativa variabilidade nos valores da tensão de tracção e que estas variações são superiores às do provete não aquecido.

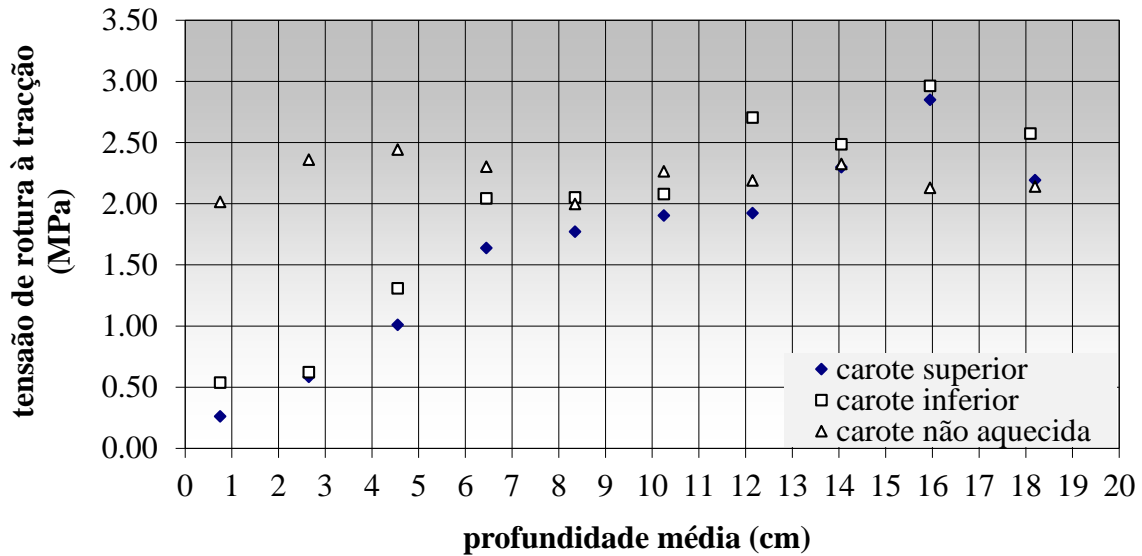


Figura 9. Tensão de rotura à tracção *versus* profundidade média

Com base nos resultados dos ensaios de compressão diametral e de modo semelhante ao realizado para a absorção de água, obteve-se um diagrama da diminuição da tensão de tracção (abaixo do valor médio) *versus* variação da temperatura acima de 200 °C (Figura 10), para a zona afectada pelo fogo. Os valores indicados foram interpolados com base nos resultados experimentais da zona aquecida e tendo em conta um valor médio da resistência do betão correspondente à média de tensão de tracção de todos os provetes não aquecidos (2,4 MPa). Saliente-se que este valor médio apresenta um coeficiente de variação que indicia uma grande dispersão dos valores da tensão de tracção.

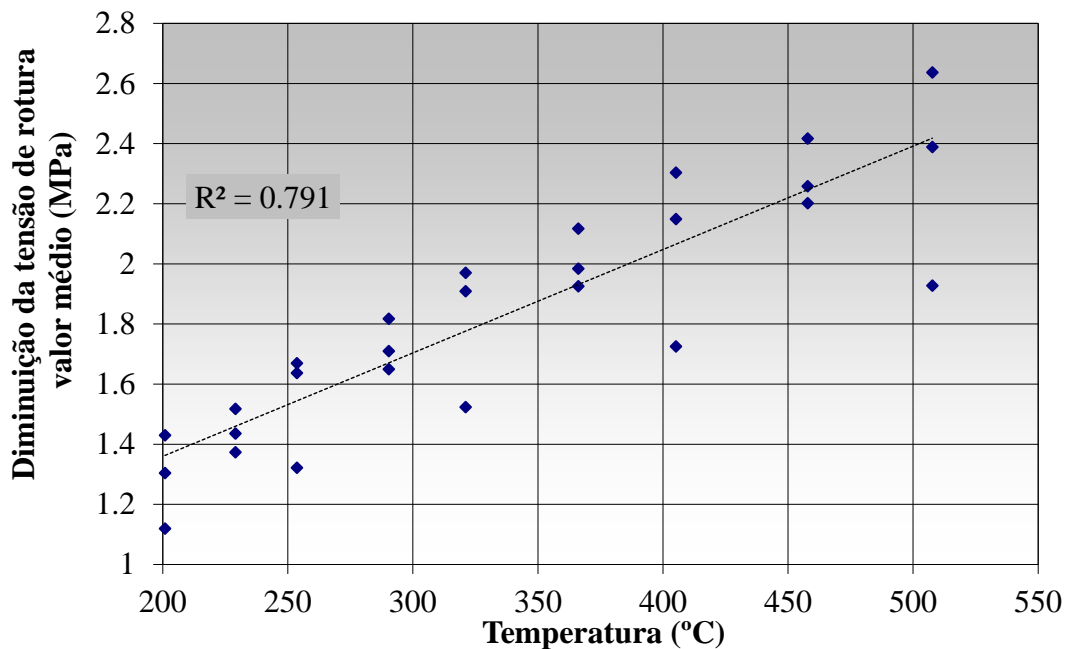


Figura 10. Variação da diminuição da resistência à tracção com temperatura (acima de 200 °C)

Da análise do diagrama da Figura 10, constata-se que na zona afectada, quanto maior a variação de temperatura acima do valor de referência (200 °C), maior a diminuição da tensão de tracção em relação ao valor médio do betão. A variação indicada na Figura 10 mostra também a correlação da propriedade “resistência à tracção” com o aquecimento do betão, embora neste caso com maior variabilidade. Tal levou a ser também considerada no FBTEST.

5. PROCEDIMENTOS DO FBTEST

Tendo por base a campanha experimental realizada, apresenta-se agora a síntese dos procedimentos do FBTEST para avaliar a espessura superficial danificada pelo incêndio numa estrutura de betão. O teste começa com a obtenção de carotes dos elementos estruturais afectados e que atinjam uma profundidade que garantidamente já não apresente betão deteriorado. Caso tal não se identifique as carotes devem atravessar todo o elemento.

Das carotes extraídas da extremidade da zona danificada pela acção do fogo são em seguida cortados discos de 1,5 cm de espessura (valor mínimo para evitar a sua quebra durante a serragem) ao longo de todo o comprimento, a partir da face que esteve em contacto com o fogo. Para cada um destes discos determina-se a absorção de água e a tensão de rotura à tracção.

Para determinar a absorção de água, após o corte dos discos, estes são levados a uma estufa, onde permanecem aquecidos a 100 °C durante 24 horas. Posteriormente os discos são arrefecidos até à temperatura ambiente e depois pesados, determinando-se o respectivo peso seco (p_{seco}).

Passa-se então à saturação dos discos, o que é feito deixando-os submersos durante 48 horas, ou o tempo necessário para o peso ficar estabilizado. Após a saturação, a superfície dos discos é limpa, sendo os discos novamente pesados, e determinando-se de seguida o peso saturado (p_{sat}). A percentagem em peso da absorção de água após imersão é avaliada através da seguinte expressão para cada disco (Neville, 1981):

$$\text{Absorção de água (\%)} = (p_{sat} - p_{seco}) / p_{seco} \times 100 \quad (1)$$

Para a determinação da tensão de rotura à tracção, os discos saturados são posicionados numa prensa, onde são submetidos à compressão diametral até à rotura. A tensão de rotura à tracção é determinada pela seguinte equação (Neville, 1981):

$$\sigma_t = 2 N_c / \pi \cdot D \cdot e \quad (2)$$

σ_t - tensão de rotura à tracção;

N_c - força diametral de compressão na rotura;

D - diâmetro do disco;

e - espessura do disco.

Após a realização dos dois tipos de ensaios descritos, obtém-se a variação com a profundidade, quer da absorção de água após imersão, quer da tensão de rotura à tracção. No que concerne à absorção de água, esta diminui com a profundidade, a partir da face que esteve directamente sob a acção do fogo, até atingir um patamar com valores praticamente constantes que define a zona não afectada. Isto explica-se pela maior porosidade e fendilhação do betão junto àquela face, ambas provocadas pela acção do fogo.

Em relação à tensão de rotura à tracção, observa-se um aumento desta com a profundidade, também até atingir-se um patamar mais uniforme (zona não danificada), pois a fendilhação provocada diminui a resistência à tracção.

Em ambos os casos, o início do patamar de valores estáveis, no respectivo gráfico de variação, indica aproximadamente a interface entre o betão deteriorado e o betão não danificado, permitindo assim estimar a espessura de betão danificado.

6. CONCLUSÕES

É apresentada uma técnica para avaliação da espessura de betão afectada pela acção do fogo baseada em ensaios de absorção de água e de tracção por compressão diametral em discos cortados a partir de carotes extraídas duma estrutura danificada pelo incêndio. Apresentaram-se os ensaios de calibração da técnica, e os diagramas de variações da absorção, e da tensão de rotura à tracção, com a profundidade, da zona degradada, o que permite ilustrar a técnica e validar os seus resultados.

Esta técnica permite resolver o problema da quantificação das zonas degradadas de betão por incêndio, problema para o qual não há outro método expedito, e cuja solução é necessária para os trabalhos de reabilitação deste tipo de acidentes. A técnica tem vindo a ser utilizada na peritagem de diversos acidentes em que os autores participaram.

7. REFERÊNCIAS

- Alonso, M. C.; Fernandez, L. (2004), *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*, Journal of Materials Science, vol. 39, pp. 3015-3024.
- Bilow, D.; Kamara, M. (2008), *Fire and concrete structures*, Proc. Conf. Structures: Crossing Borders, ASCE.
- Branco, F.; Neves, I.; Valente, J. (1998), *Incêndio da Estação de Metro da Alameda. Estudos de Avaliação Estrutural*, Relatório IC-IST EP 12/98.
- EC2 (EUROCODE 2 – Part 1-2), (2005), *Structural fire design*, ENV 1992 1-2.
- ECP (2007), *Comprehensive fire protection and safety with concrete*, European Concrete Platform, Brussels.
- FIB (2007), *Fire design of concrete structures – Materials, structures and modeling – State-of-art report*, Bulletin d'information n.º 38. 97 p. Lausanne.
- FSJ (1990), *Repairability of fire damage structures*, Fire Safety Journal, n.º 4.
- Mendes, P.; Valente, J.; Branco, F. (2000), *Simulation of a ship fire under Vasco da Gama Bridge*, ACI Structural Journal, ACI - American Concrete Institute, Detroit, March-April, pp. 285-290.
- Neves, I.; Valente, J.; Branco, F. A (1995), *Study of the Chiado fire in Lisbon*, Structures and Buildings Journal, vol. 110, n.º 3. *The Institution of Civil Engineers*, London, Agosto.
- Neves, I.; Branco, F.; Valente, J. (1997), *Effects of formwork fires during bridge construction*, Concrete International - Design & Construction, ACI - American Concrete Institute, vol.19, n.º3, Detroit, March, pp. 41-46.
- Neville, A. M. (1981), *Propriedades do concreto*, Ed. PINI, 1982, São Paulo.
- Schneider, U. (1990), *Repairability of fire damaged structures*, CIB W14 Report, Special Issue of Fire Safety Journal, V. 16, n.º 4, 292 p.