

BETÃO FIBROSO DE COMPORTAMENTO MELHORADO AO FOGO

LÚCIO LOURENÇO

Aluno de Doutoramento
UMinho – Guimarães
lucio@civil.uminho.pt

JOAQUIM BARROS

Professor Assoc. c/Agreg.
UMinho – Guimarães
barros@civil.uminho.pt

JOÃO RODRIGUES

Professor Auxiliar
FCTUC – Coimbra
jpaulocr@dec.uc.pt

SIMÃO SANTOS

Aluno de Mestrado
UMinho – Guimarães
simaopfsantos@civil.uminho.pt

ADÉRITO ALVES

Aluno de Mestrado
FCTUC – Coimbra
ajga@dec.uc.pt

SUMÁRIO

As Universidades do Minho e de Coimbra estão a desenvolver um betão reforçado com fibras (BRF), de elevada ductilidade, com comportamento melhorado sob a acção de temperaturas elevadas. Este betão inclui fibras de polipropileno e fibras de aço. Nesta comunicação, apresentam-se os resultados relativos à avaliação da influência de temperaturas elevadas nas seguintes propriedades mecânicas residuais do betão fibroso desenvolvido: módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à flexão. A aplicabilidade de ensaios não destrutivos na avaliação das propriedades residuais do betão é explorada.

Palavras-chave: temperaturas elevadas, resistência residual, BRF, ensaios não destrutivos.

1. INTRODUÇÃO

O betão é o material de construção mais utilizado nos nossos dias. Um dos factores que justificam esta ampla utilização é a sua durabilidade quando submetido às mais variadas condições de agressividade ambiental, nomeadamente em situação de incêndio. Contudo, um grande número de projectos de investigação e alguns incêndios em estruturas reais evidenciaram que a exposição a temperaturas elevadas origina uma degradação das propriedades mecânicas e químicas do betão, bem como níveis significativos de destacamento explosivo da sua superfície (*spalling*) [1].

O *spalling* depende de parâmetros como o teor de humidade no betão, as condições de aquecimento e/ou arrefecimento, o estado de tensão, a espessura do elemento, o tipo de armaduras, o tipo de agregados, a existência ou não de fibras e a proporção da mistura entre o cimento, os agregados e a água [2].

Com o destacamento da espessura de recobrimento do betão, as armaduras de reforço ficam directamente expostas à acção directa das chamas, desde os primeiros momentos do incêndio, reduzindo de forma significativa a capacidade resistente da estrutura (ocorre, por vezes, a desintegração do próprio betão). Em consequência, a acção da temperatura sobre o betão faz-se sentir mais rapidamente, pois a espessura resistente vai diminuindo com a progressão do dano por *spalling*. Este fenómeno é particularmente comum nos betões de elevada resistência, pois estes apresentam uma matriz bastante compacta e de porosidade reduzida, o que conduz ao desenvolvimento de pressões elevadas no interior da micro-estrutura do betão quando este é submetido a temperaturas elevadas [2].

Um incêndio poderá levar uma estrutura em betão ao seu colapso total ou parcial, com custos elevados, tanto na perda de vidas humanas, como no consumo de elevados recursos económicos para a sua recuperação ou demolição. Os elementos estruturais deverão, assim, resistir em situação de incêndio, durante, pelo menos, o tempo necessário à evacuação das pessoas e para as operações de combate do incêndio (tempo de resistência ao fogo). Como segundo requisito, os elementos estruturais deverão, também, apresentar uma resistência mecânica residual que permita a sua recuperação. Os danos nos elementos estruturais provocados pela acção de um incêndio são, no entanto, difíceis de avaliar. São necessários meios de inspecção e avaliação adequados que ofereçam ao inspector a segurança e a confiança necessárias, para que este possa pronunciar-se, em tempo útil, acerca das possibilidades de utilização futura da estrutura.

2. BETÃO FIBROSO DE COMPORTAMENTO MELHORADO AO FOGO

A adição de fibras de polipropileno (PP) em betões de elevado desempenho é uma das alternativas mais utilizadas para evitar o *spalling* explosivo deste tipo de betões, quando sujeitos a temperaturas elevadas. A referida adição de fibras de PP apresenta-se como uma solução simples, económica e eficiente. Com o aquecimento do betão, as fibras PP volatilizam (a cerca de 170 °C), formando micro-canais no seio do betão [3]. Estes micro-canais irão permitir a libertação do vapor de água, reduzindo-se o risco de *spalling* de forma significativa [4-7]. Com o aumento da percentagem de fibras de PP no betão, o número de canais e poros aumentará [8].

Relativamente à adição de fibras de aço, é reconhecido que estas, quando envolvidas por betão de elevada compacidade, constituem um sistema de reforço capaz de proporcionar elevada ductilidade a materiais de matriz cimentícia, tanto a curto como a longo prazo. No entanto, as vantagens da utilização de um betão reforçado com fibras de aço poderão ser alargadas, entre outras, ao comportamento perante temperaturas elevadas, como aquelas que se geram em situação de incêndio.

Como anteriormente referido, durante a exposição de um elemento estrutural em betão armado a temperaturas elevadas, o betão de recobrimento das armaduras tende a desagregar-se, devido à diferente deformabilidade do aço dos varões e do betão que os envolve, motivada pelos distintos coeficientes de expansão térmica destes materiais. O aumento das pressões internas do betão devido à presença de vapor de água também contribui para este

comportamento. A utilização de fibras de aço no betão melhora o comportamento deste quando exposto a temperaturas elevadas na medida em que as fibras de aço contribuem para manter a integridade da camada de recobrimento das armaduras, não a deixando exposta de forma directa às chamas. Por outro lado, tanto por contribuírem para uma maior distribuição da fendilhação, como por aumentarem a resistência do betão à tracção, as fibras de aço poderão reduzir a ocorrência de *spalling*. Isto assume especial importância no caso de elementos de betão de elevado desempenho, devido à sua reduzida porosidade e comportamento frágil.

A presença de fibras de aço aumenta, também, a condutibilidade térmica do betão [9]. Quando os elementos de BRF são expostos a temperaturas elevadas, a propagação da temperatura para o interior poderá ser superior, reduzindo assim a capacidade resistente do elemento estrutural. Trata-se, portanto, de um assunto que terá que ser analisado de forma a avaliar os reais benefícios das fibras de aço no contexto do desenvolvimento de um betão de resistência melhorada ao fogo.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta secção descreve-se o programa experimental efectuado no âmbito da caracterização do comportamento residual do betão fibroso desenvolvido.

3.1 Composição do betão

Para que a avaliação do comportamento residual de um betão possa ser levada a cabo, é preponderante que este suporte a exposição térmica a que estará sujeito. Investigação previamente realizada [10], no âmbito da definição do sistema fibroso para o betão de resistência melhorada ao fogo, indicou que a inclusão de 2 kg/m³ de fibras de PP mais 60 kg/m³ de fibras de aço garante os requisitos mínimos impostos ao betão a desenvolver no âmbito do projecto FICOFIRE.

Na composição seleccionada para o presente programa experimental foi adoptado cimento (CEM) do tipo I 42.5R, superplastificante (SP) de terceira geração (SIKA ViscoCrete® 3002 HE), filler calcário (FC) e quatro tipos de agregados: areia fina (AF), bago de arroz (BA) e dois tipos de britas calcárias (B1: 5-12 mm; B2: 14-20 mm). O reforço fibroso adoptado é constituído por dois tipos de fibras: fibra de aço (FA) DRAMIX® RC-80/60-BN, com comprimento l_{fa} de 60 mm, diâmetro (d_{fa}) de 0.75 mm, relação comprimento/diâmetro (l/d_f) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa; fibras de polipropileno (FP) DURO-FIBRIL®, com diâmetro (d_{fp}) de 31 µm e comprimento de 6 mm. A composição desenvolvida para o betão fibroso está resumida no Quadro 1.

Quadro 1: Composição adoptada (por m³ de betão)

CEM	FC	Água	SP	AF	BA	B1	B2	FP	FA
[kg]	[kg]	[dm ³]	[dm ³]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
300.2	228.0	120.5	7.0	533.6	457.6	295.0	294.3	2.0	60.0

3.2 Provetes

A avaliação dos parâmetros residuais módulo de elasticidade e resistência à compressão do betão desenvolvido foi efectuada em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O comportamento residual à flexão foi determinado através de ensaios em vigas de 150 x 150 x 600 mm³.

3.3 Metodologia de ensaio

Os provetes começaram por ser aquecidos até diferentes níveis de temperatura numa mufla (BARRACHA K9-E) com controle de temperatura (TERMOCONTROL 1PR) (ver Figura 1a). Os níveis de temperatura testados foram: 250 °C, 500 °C, 750 °C e 1000 °C. Após se atingir o nível de temperatura desejado, este era mantido constante durante 4 horas, para permitir a homogeneização da temperatura no betão (ver Figura1b). O arrefecimento dos provetes foi efectuado no interior da mufla. Até à realização dos ensaios mecânicos, os provetes ficaram expostos à temperatura ambiente do laboratório.

A exposição referida a diferentes níveis de temperatura foi efectuada 28 dias após a betonagem dos provetes. A avaliação das propriedades mecânicas, bem como os ensaios não destrutivos (esclerómetro de Schmidt e propagação de ultrasons), foram efectuados 28 dias após os provetes terem sido expostos aos referidos níveis de temperatura, com excepção dos provetes de referência, em que a avaliação foi efectuada 28 dias após a sua betonagem.

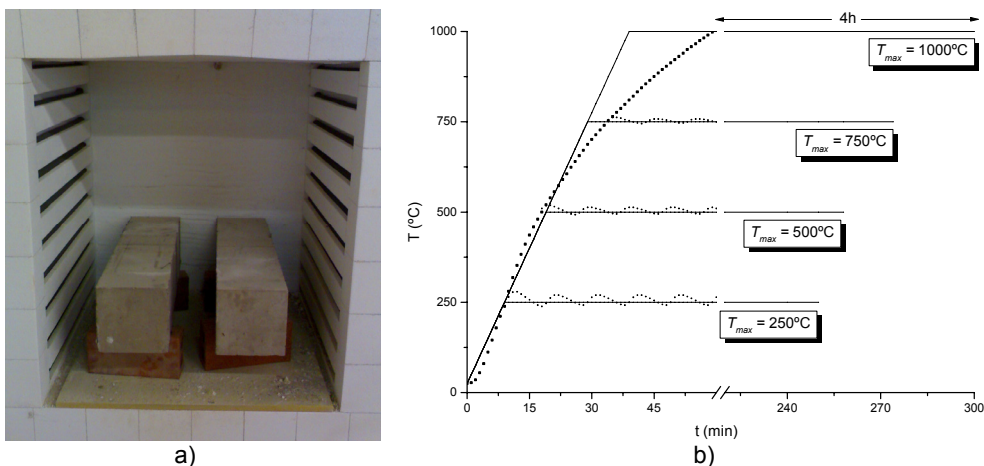


Figura 1: Exposição do betão a diferentes níveis de temperatura

Paralelamente ao presente programa experimental, moldaram-se provetes cilíndricos com a composição referida no Quadro 1, alterando-se apenas o tipo de cimento, que passou a ser do tipo I 52.5R (composição CEM525). Neste sentido, apresentam-se, também, os resultados obtidos nos provetes de betão em que foi utilizado o referido tipo de cimento, referentes ao módulo de elasticidade residual e resistência à compressão residual.

3.4 Resultados

A exposição do betão fibroso ao nível de temperatura de 1000 °C conduziu à desagregação deste (ver Figura 2), impossibilitando a avaliação das suas propriedades mecânicas residuais. É atribuído, assim, o valor nulo aos resultados relativos à exposição a 1000 °C. Salienta-se que esta desagregação ocorreu vários dias após o ensaio de exposição à temperatura referida, e não no decorrer deste. Estes provetes não sofreram qualquer tipo de *spalling* durante o ensaio de aquecimento.



Figura 2: Desagregação de um provete cilíndrico de betão após exposição a 1000 °C

3.4.1 Módulo de elasticidade residual

Os valores para o módulo de elasticidade residual do betão, E_{cmT}^{res} , após a exposição deste a diferentes níveis de temperatura, T_{max} , são apresentados na Figura 3a (valor médio dos resultados obtidos em três ensaios). A Figura 3b representa a variação do módulo de elasticidade residual do betão, E_{cmT}^{res} , em relação ao seu valor a 20 °C, E_{cm} , em função da temperatura máxima de exposição T_{max} para provetes com 28 dias de idade. A evolução deste parâmetro é apresentada para os provetes com cimento 42.5 e 52.5 nas suas correspondentes composições.

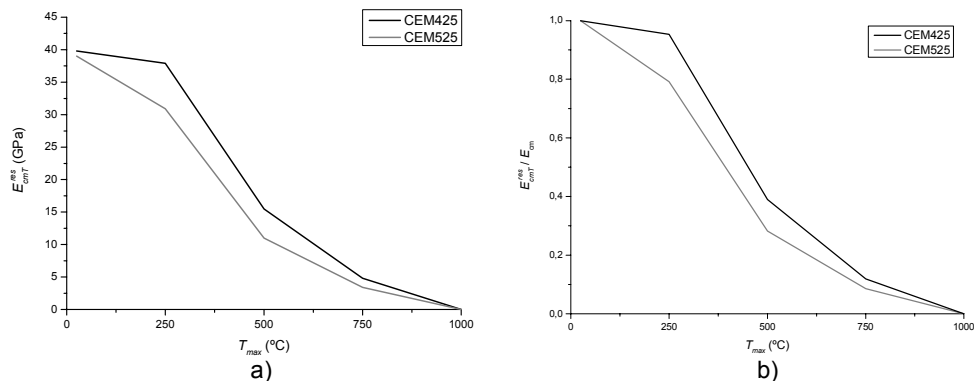


Figura 3: Variação do módulo de elasticidade residual do betão em função de T_{max}

O grau de diminuição de E_{cmT}^{res} com a temperatura é menor nos provetes com cimento 42.5 do que nos provetes com cimento 52.5. Tal deve-se, muito provavelmente, ao maior grau de finura destes últimos cimentos que, por aumentar a compacidade do betão, dá origem a tensões internas na micro-estrutura do betão, em consequência da maior resistência ao escape do vapor de água no interior do betão.

3.4.2 Resistência residual à compressão

Após a exposição aos níveis de temperatura referidos, os provetes do betão fibroso desenvolvido apresentaram o comportamento à compressão directa representado na Figura 4.

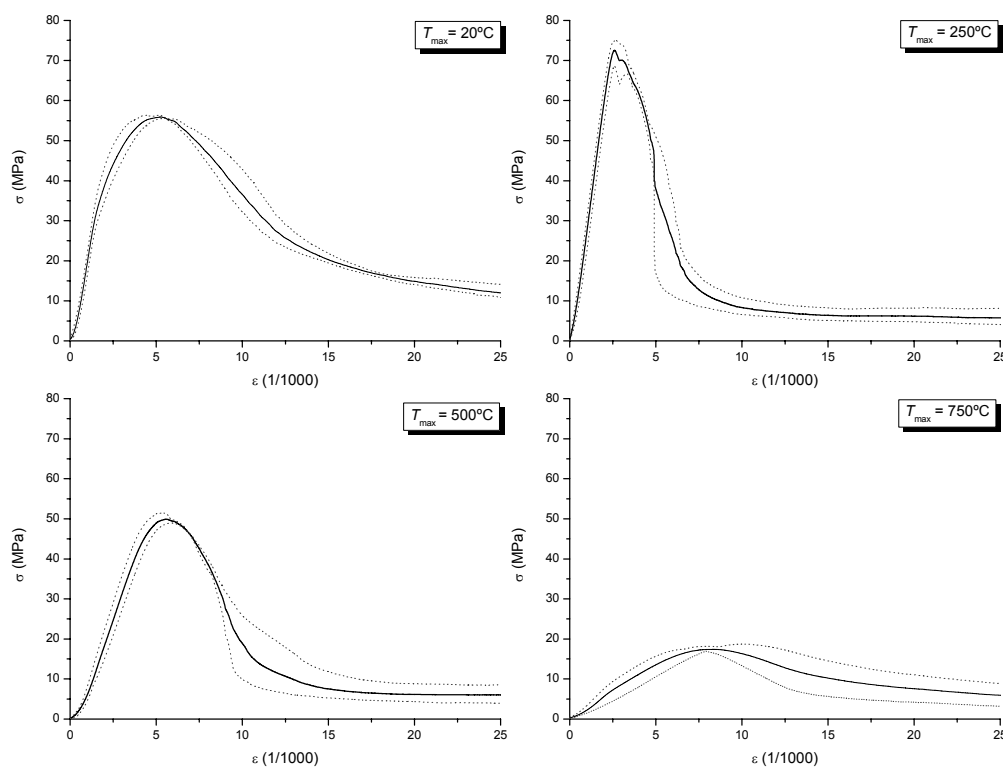


Figura 4: Comportamento σ - ϵ residual à compressão dos provetes CEM425

O comportamento verificado após a exposição a 250 °C (CEM425), com um acréscimo de resistência de cerca de 30% relativamente aos provetes não aquecidos, merece especial atenção. O referido comportamento não foi observado na composição CEM525, como é demonstrado posteriormente na Figura 6. As Figuras 5 e 6 apresentam, em síntese, os diferentes diagramas tensão-extensão residuais à compressão directa para o betão desenvolvido. A composição CEM425 apresenta um melhor desempenho, comparativamente à CEM525, para todos os níveis de exposição de temperatura, presumivelmente pelas razões apontadas na secção 3.4.1.

Na Figura 7a é apresentada a resistência residual à compressão do betão, f_{cmT}^{res} , em função da temperatura máxima a que este esteve sujeito, T_{max} (valor médio dos resultados obtidos em três ensaios). A Figura 7b representa a variação da resistência residual à compressão do betão, f_{cmT}^{res} , referida ao seu valor a 20°C, f_{cm} , em função da temperatura máxima a que este esteve sujeito T_{max} , para provetes com 28 dias de idade.

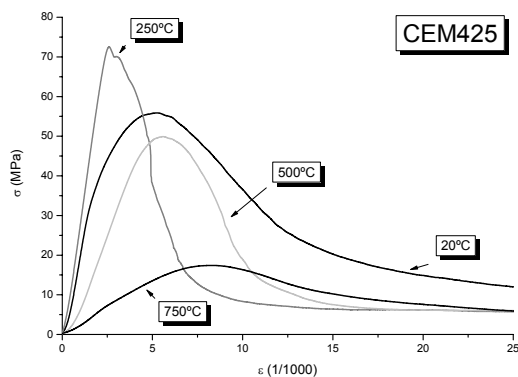


Figura 5: Comportamento σ - ϵ residual à compressão (composição CEM425)

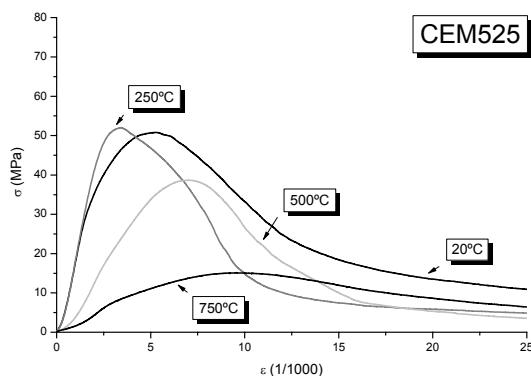


Figura 6: Comportamento σ - ϵ residual à compressão (composição CEM525)

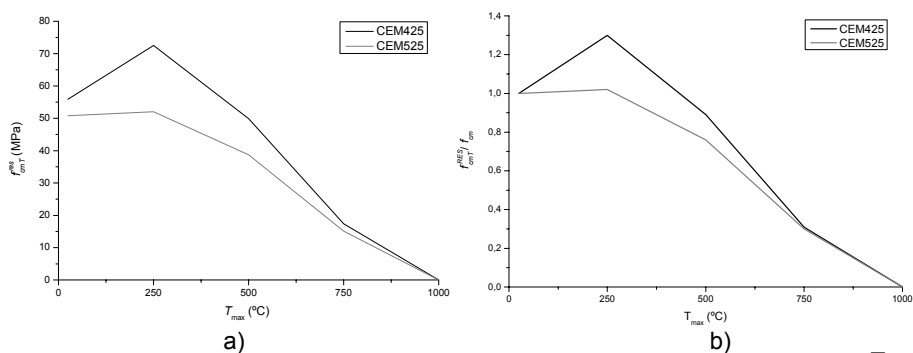


Figura 7: Variação da resistência residual à compressão do betão em função de T_{max}

3.4.3 Resistência residual à flexão

Os resultados apresentados na secção anterior permitem concluir que a utilização do cimento do tipo I 42.5R é mais vantajosa, comparativamente à utilização do cimento do tipo I 52.5R, do ponto de vista dos fenómenos em análise. Neste sentido, este tipo de cimento foi o adoptado na composição para o betão fibroso proposto. A avaliação da influência da exposição de temperaturas elevadas na resistência residual à flexão do betão foi, assim, efectuada somente com provetes tendo por composição base a apresentada no Quadro 1.

O comportamento residual à flexão do betão fibroso desenvolvido está apresentado na Figura 8a. Salienta-se que o comportamento tensão vs deslocamento a meio vão para a série “ambiente” foi efectuada aos 14 dias após a betonagem dos provetes. A Figura 8b pormenoriza a degradação ocorrida nos provetes após a exposição aos 750 °C. A Figura 9 representa a variação, com a temperatura máxima de exposição, da força máxima registada até uma flecha de 0.05 mm, F_L , e dos parâmetros designados por tensão equivalente em tracção para estados limite de serviço, $f_{eq,2}$, e para estados limite últimos, $f_{eq,3}$, parâmetros estes que traduzem a ductilidade dos betões reforçados com fibras. Os procedimentos para obtenção de F_L , $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ estão descritos em [11].

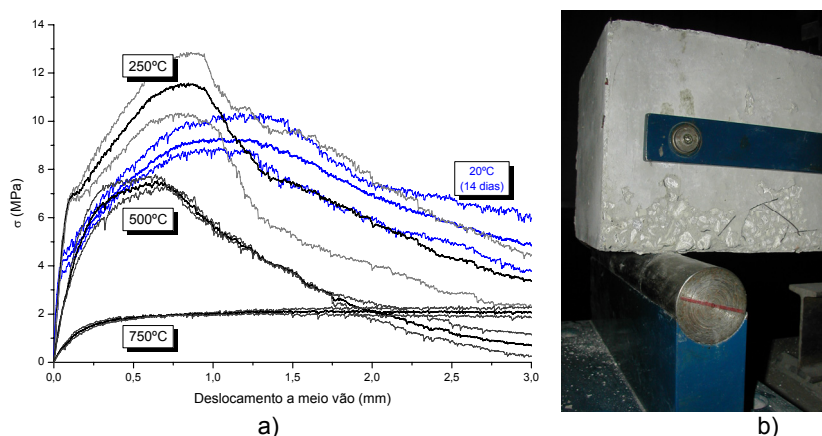


Figura 8: Comportamento residual do betão fibroso à flexão em função de T_{max}

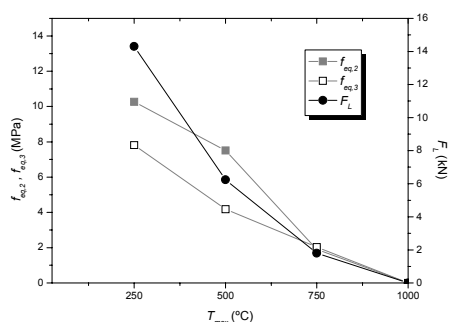


Figura 9: Variação dos parâmetros F_L , $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ em função de T_{max}

3.4.4 Ensaio não destrutivos

Foram realizados ensaios não destrutivos nos provetes recorrendo ao esclerómetro de Schmidt (tipo N) [12] e à medição da propagação de ultrasons, por intermédio do equipamento TICO Ultrasonic Instrument [13].

No ensaio efectuado através do esclerómetro de Schmidt mediu-se, fundamentalmente, a dureza superficial do betão, relacionando-a com a sua resistência residual à compressão (ver Figura 10a). Na Figura 10b comparam-se os valores de resistência obtidos segundo o esclerómetro de Schmidt com os registados nos ensaios de compressão directa (ver Figura 7a). A análise dos resultados permite constatar a existência de um “patamar” até à temperatura de exposição de 500 °C; após esta temperatura, os valores previstos para a resistência do betão diminuem.

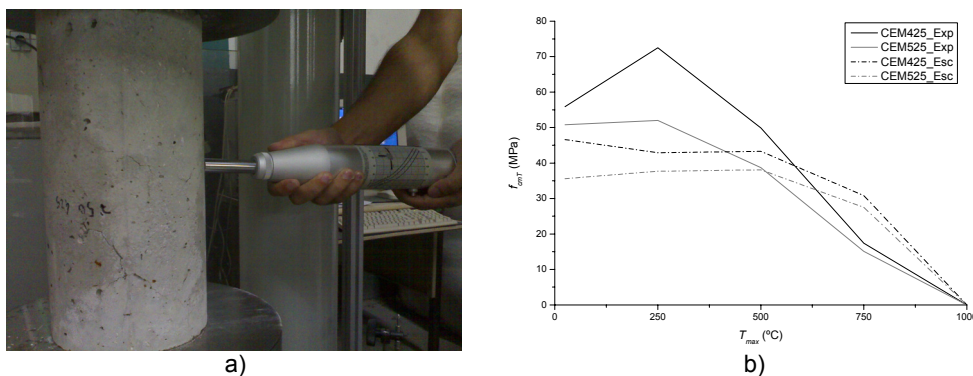


Figura 10: Previsão de resistência recorrendo ao esclerómetro de Schmidt

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas no betão é um método não destrutivo utilizado em elementos estruturais para avaliar o nível de dano nos materiais que os constituem. Este método é baseado no princípio da propagação de ultra-sons através do material, o qual se propaga a uma velocidade que depende das suas propriedades. Esta avaliação foi efectuada nas vigas utilizadas na avaliação do comportamento à flexão do betão, devido, essencialmente, às suas faces planas, tendo-se seleccionado os pontos indicados na Figura 11. Assim, a direcção de propagação das ondas coincidiu com a direcção de betonagem.

Os resultados obtidos na Figura 12 apresentam uma tendência similar aos obtidos noutros trabalhos experimentais [14]. Pode-se constatar que, como seria de esperar, a velocidade de propagação medida foi tanto maior quanto mais denso se apresentava o betão, diminuindo, assim, com o aumento da temperatura máxima de exposição a que o provete foi sujeito. Mais interessante é o facto de que, se exceptuar o resultado registado relativo à temperatura de 250 °C, a forma de evolução da curva obtida é similar à registada nos ensaios de compressão directa, pelo que é promissora a possibilidade de utilização deste tipo de ensaio não destrutivo na avaliação da resistência de um determinado betão que esteve submetido a uma dada

temperatura. A calibração deste tipo de relação exige um programa experimental extenso, que se encontra actualmente na sua fase inicial.

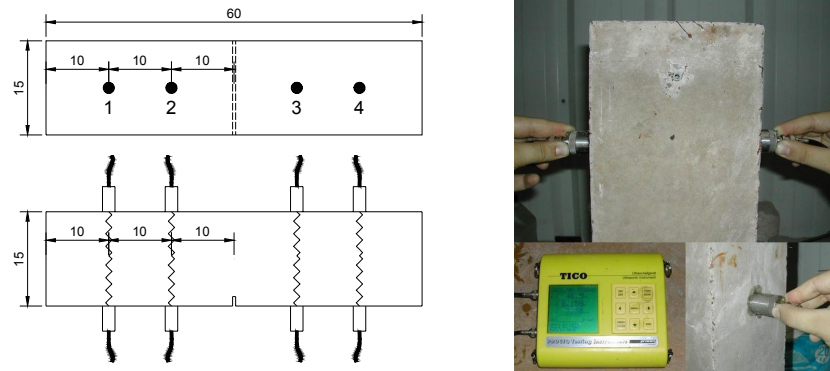


Figura 11: Ensaio de propagação de ultra sons no betão

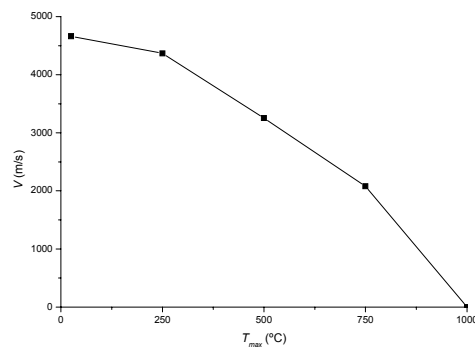


Figura 12: Variação da velocidade de propagação de ultra sons em função de T_{max}

4. CONCLUSÕES

Tendo por base os resultados obtidos em ensaios de compressão directa com provetes submetidos a diferentes níveis de temperatura (250, 500, 750 e 1000 °C), constatou-se que, até aos 250 °C, a resistência à compressão aumenta e o módulo de elasticidade não é afectado significativamente. Para os níveis de temperatura acima deste, a resistência à compressão residual e o módulo de elasticidade residual diminuem significativamente.

Dado que a finura do cimento do tipo I 52.5R é maior do que a do cimento I 42.5R, o betão com cimento 52.5 é mais compacto do que o betão com cimento 42.5. Como consequência, devido, presumivelmente, à maior dificuldade de escape do vapor da água existente no betão com cimento 52.5, este apresentou maior degradação do seu módulo de elasticidade e da sua resistência à compressão com o aumento da temperatura de exposição, do que os correspondentes valores registados no betão com cimento 42.5.

Os ensaios de flexão com provetes submetidos a 250, 500 e 750 °C evidenciaram que, aumentando a temperatura máxima a que os provetes foram submetidos, a resistência à flexão e as resistências equivalentes em tracção por flexão (parâmetros que traduzem a ductilidade dos betões reforçados com fibras) diminuem significativamente.

Os incêndios degradam o betão dos elementos estruturais. Esta degradação pode ser mais ou menos intensa, afectando parcialmente ou totalmente a capacidade de suporte destes elementos. A avaliação da segurança estrutural de um edifício submetido à acção do fogo é tarefa complexa, dada a dificuldade em determinar as propriedades mecânicas residuais do betão afectado. Usualmente, a caracterização destas propriedades passa pela extracção de carotes. Este tipo de intervenção causa, contudo, danos pontuais, permitindo apenas a recolha de informação localizada. Os resultados apresentados obtidos por intermédio da utilização de ensaios não destrutivos, nomeadamente os determinados por propagação de ultra-sons, são indiciadores de que estes métodos podem ser aplicados na previsão da resistência à compressão de betão afectado pela acção do fogo, desde que sejam definidas leis de correlação suportadas em programas experimentais extensos e bem preparados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores pretendem agradecer o apoio disponibilizado pela FCT (Projecto FICOFIRE - POCTI/ECM/57518/2004), Spie Batignolles, Civitest, Secil, Sika, DuroEuropa e Miguel Freitas. Os quarto e quinto autores agradecem o apoio financeiro obtido por intermédio das respectivas bolsas, ao abrigo do projecto acima referido.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Kusterle *et al.* – "Fire resistance of concrete tunnel linings - conclusions of large scale tests", *Proceedings of ConMat '05 and Mindness Symposium*, Vancouver, 2005.
- [2] Rodrigues, J. – "Recuperação de estruturas danificadas por incêndio – propriedades mecânicas residuais do aço e do betão", Tese de mestrado em engenharia civil, Universidade de Coimbra, 1994.
- [3] Georgali, B; Tsakiridis, P. – "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study", *Cement & Concrete Composites*, n.º 27, 2005, pp. 255-259.
- [4] Kützing, L. – "Fire resistance of high performance concrete with fibre cocktails", *LACER* n.º 4., 1999, pp. 185-191.
- [5] Kalifa *et al.* – "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. From spalling to microstructure", *Cement and Concrete Research*, n.º 31, 2001, pp. 1487-1499.
- [6] Collignon, C. – "Spalling test of concrete prisms with buckeye fibers following a standard fire curve (ISO 834)", Final Report, Construction Products Division – Fire Section, January, 2005.
- [7] Mahasneh, B. – "The effect of addition of fiber reinforcement on fire resistant composite concrete material", *Journal of Applied Sciences*, n.º 5, 2005, pp. 373-379.

- [8] Bilodeau *et al.* – “Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire”, *Cement & Concrete Composites*, n.º 26, 2004, pp. 163-174.
- [9] Kodur, V.; Sultan, M. – “Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, N.º 2, April, 2003, pp. 101-107.
- [10] Lourenço *et al.* – “Composição de betão de resistência melhorada ao fogo para aduelas de túneis – parte I”, Relatório 05-DEC/E-32, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Dezembro, 2005, 42 páginas.
- [11] Vandewalle *et al.* – “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation”, *Materials and Structures Journal*, 35, November, 2002, pp. 579-582.
- [12] ASTM C805-02 – “Standard test method for rebound number of hardened concrete”, ASTM International.
- [13] ASTM D2845 – “Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock”, ASTM International, 1995.
- [14] Lima *et al.* – “Difração de raios-X e ultra-som: usando ensaios não-destrutivos eficazes para análise de estruturas sinistradas”, *Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005*, Volume III – Efeito do Fogo em Estruturas de Concreto, IBRACON, 2005, pp. 64-75.