

O *Spalling* nas estruturas de betão



Susana Otero dos Santos¹



João Paulo C. Rodrigues²

RESUMO

Durante a sua vida, o betão dispõe na sua estrutura de uma certa percentagem de água que depende, de entre outros factores, da composição do betão e das condições ambientais a que o betão está sujeito. Quando o Betão é submetido à acção do fogo, a água existente na sua constituição passa ao estado gasoso havendo um aumento de pressão de vapor no interior dos seus poros. Este vapor tem quase sempre alguma dificuldade em sair para o meio circundante, geram-se assim elevadas tensões internas no betão que poderão levar à sua rotura frágil. Esta rotura é geralmente explosiva e acompanhada de estrondo levando à separação do betão das armaduras. As armaduras ficam então expostas ao incêndio, ficando a capacidade de suporte dos elementos comprometida ao ponto de poderem entrar em ruína. Este fenómeno não se encontra ainda controlado nas Estruturas de Betão Armado e acontece com alguma frequência em incêndios de severidade média a elevada.

Este artigo resume os trabalhos de investigação que vêm sendo levados a cabo no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra na área do comportamento a altas temperaturas de betões (material). Foram desenvolvidas três composições de betão de alta resistência (BAR): uma sem fibras, outra com fibras de aço e polipropileno em conjunto e uma terceira com fibras de vidro. Nos ensaios realizados, os provetes de betão foram aquecidos até três níveis de temperatura máxima (300°C, 500°C e 600°C) sempre com carregamento constante ($0.7f_{cd}$). Após a temperatura desejada ser atingida e estabilizada no interior do provete, ou se realizavam ensaios de resistência à compressão ou o provete era arrefecido para posterior avaliação visual do efeito *spalling*.

Realizaram-se ainda algumas simulações numéricas do desenvolvimento das temperaturas nos provetes com recurso ao programa de elementos finitos ABAQUS.

PALAVRAS-CHAVE

Spalling; betão de alta resistência; fibras de polipropileno; fibras de aço; fibras de vidro.

¹ Mestranda. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II da Universidade, Rua Luís Reis Santos. 3030-788 Coimbra. Portugal.

² Professor. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Polo II da Universidade, Rua Luís Reis Santos. 3030-788 Coimbra. Portugal.

1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos 20 anos, o betão tem sido desenvolvido de forma a melhorar o seu desempenho, tendo sido feitas alterações na sua composição (redução da quantidade de água, uso de superplastificantes, optimização da distribuição do tamanho dos agregados, uso de partículas com actividade pozolânica, adição de fibras, etc.) de modo a melhorar a sua resistência, ductilidade e densidade. Na maioria dos casos, os betões compactos apresentam maior durabilidade. No entanto podem ter mau comportamento ao fogo, podendo sofrer *spalling* para determinados esforços térmicos e mecânicos. [1]

De forma simplificada, o *spalling* pode definir-se como sendo o destacamento, violento ou não, de camadas ou partes da superfície do elemento de betão, quando exposto ao rápido aumento de temperatura, como o existente em situação de incêndio [2].

O fenómeno *spalling* pode também acontecer na situação de corrosão das armaduras constituintes de um elemento de betão armado, devido a um recobrimento deficiente. Estas armaduras podem passar a ocupar volumes até dez vezes superiores ao original, podendo originar elevadas pressões que dão origem ao destacamento do betão.

Nos últimos anos, ocorreram na Europa incêndios em diversos túneis, que provocaram perda de vidas além de danos significativos na estrutura de betão [3]. Alguns desses túneis como por exemplo o “Channel Tunnel” e o “Great Belt Tunnel”, foram construídos recentemente, o que mostra que o fenómeno de *spalling* não é ainda considerado de forma correcta nos métodos simplificados e nos métodos avançados de dimensionamento ao fogo, previstos no Eurocódigo 2 parte 1.2.

O trabalho de investigação desenvolvido pretendeu contribuir para a caracterização do fenómeno através do desenvolvimento de betões de comportamento melhorado ao fogo. Para isso foram desenvolvidas várias composições de betões de fibras que foram depois testadas à compressão a altas temperaturas, no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

Nos betões estudados foram incorporadas fibras de aço e polipropileno ou fibras de vidro. As fibras de polipropileno, quando expostas a altas temperaturas, formam canículos que permitem a saída de vapor, diminuindo assim a pressão acumulada na rede porosa do elemento de betão, enquanto que as fibras de aço aumentam a ductilidade do betão, permitindo assim a obtenção de um betão mais resistente mecânica e termicamente. A inclusão de fibras de vidro na composição do betão teve como objectivo avaliar até que ponto estas podem substituir as fibras de polipropileno e de aço na resistência do betão a altas temperaturas.

2 O SPALLING

O *spalling* resulta fundamentalmente de dois processos: um processo termo-mecânico resultante das dilatações térmicas que ocorrem no interior do elemento de betão e um processo hidro-térmico que está relacionado com a transferência de massa (ar, vapor de água, água no estado líquido) na rede porosa do betão a qual provoca aumentos de pressão nos poros do elemento [4].

O processo termo-mecânico está directamente associado ao campo de temperaturas a que o elemento de betão é submetido. Aumentos de temperatura geram maiores dilatações térmicas que por sua vez provocam tensões de tracção perpendiculares à face aquecida. Existe ainda uma incompatibilidade de tensões entre a pasta de cimento e os agregados. Enquanto os agregados dilatam com o aumento de temperatura até ficarem quimicamente degradados, a pasta de cimento diminui de volume, com a perda de água, e a degradação química ocorre aproximadamente aos 180°C. Estes distintos comportamentos térmicos justificam parte da degradação que ocorre na matriz de betão.

O processo hidro-térmico está relacionado com a transferência de massa. Com o aumento da temperatura, parte da água é evaporada. Esta evaporação gera pressões na rede porosa do betão. A transferência de massa deve-se essencialmente a este aumento gradual de pressões no interior do betão. Pela face aquecida, parte do ar e do vapor de água saem para o exterior do elemento e outra parte para o interior deste, onde se dá a condensação do vapor de água formando-se uma camada quasi-saturada. Passado algum tempo o elemento de betão apresenta, na face aquecida, uma zona seca e desidratada, uma outra que está ainda em processo de secagem e desidratação e ainda uma camada quasi-saturada, que actua como uma parede impermeável não permitindo a passagem de gases. As restantes zonas do elemento não sofrem alterações. O pico de pressões ocorre na camada quasi-saturada (Fig. 1). Quanto menos permeável for o material, mais cedo se forma a camada que obstrui a passagem de gases e mais perto fica da superfície aquecida, sendo ainda geradas pressões superiores [1].

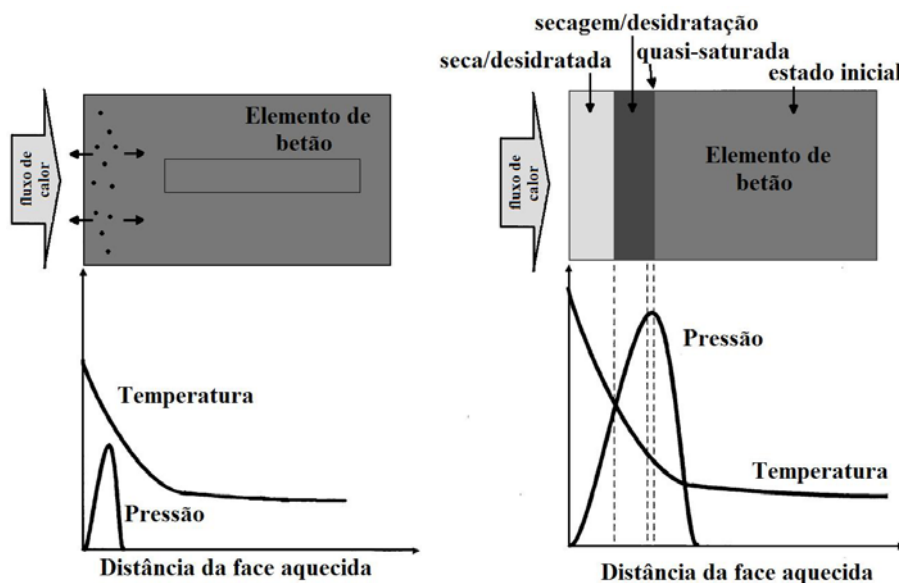


Figura 1. Processo de aumento da pressão no elemento de betão a altas temperaturas [1].

Vários autores definem e caracterizam os tipos de *spalling* de formas distintas [5]:

- Spalling* destrutivo: separação de grandes pedaços de betão da superfície das peças de betão armado. Este tipo de *spalling* surge normalmente em pilares e vigas, geralmente de forma explosiva e acompanhada de um estrondo (*spalling* do tipo explosivo).
- Spalling* localizado: origina o destacamento de pequenos pedaços de betão em pontos particulares da superfície dos elementos, como por exemplo arestas das vigas e pilares. Este tipo de *spalling* surge normalmente durante as fases posteriores à exposição ao fogo.
- Spalling* gradual de uma secção transversal: formação de fendas ao longo da secção transversal, ocorrendo principalmente para temperaturas muito altas e em betões com agregados leves.
- Esfoliação*: queda de pequenos pedaços de betão (aproximadamente 20mm) da superfície exposta. Normalmente, leva a alterações dos agregados, devido a mudanças físico-químicas a altas temperaturas.

Através de estudos experimentais, foram identificados, como sendo factores que influenciam o efeito *spalling* os seguintes:

- a. Taxa de aquecimento: a probabilidade e severidade do *spalling* explosivo aumentam com o aumento da taxa de aquecimento.
- b. Número de faces expostas ao fogo: a susceptibilidade ao *spalling* aumenta com o número de faces do elemento expostas ao fogo. Assim, dada a sua disposição nos edifícios correntes, as lajes são menos susceptíveis ao *spalling* do que as vigas.
- c. Espessura e forma da secção: o *spalling* explosivo não ocorre em secções de espessura reduzida pois o teor em humidade é expelido rapidamente. As secções com rápida mudança de secção são também desfavoráveis ao efeito *spalling*, pois formam-se elevadas tensões térmicas e taxas de influxo de calor nos cantos dos elementos.
- d. Teor de humidade: o risco de ocorrência de *spalling* aumenta com o teor de humidade. São aconselhados teores de humidade inferiores a 3% por peso de betão.
- e. Permeabilidade e porosidade: para valores da permeabilidade da matriz de betão superiores a $1 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$, a probabilidade de ocorrência de *spalling* diminui. Os betões de alta resistência permitem obter estruturas com maior capacidade de carga. Contudo, a elevada densidade, característica destes betões, oferece grande resistência ao fluxo de massas podendo originar *spalling* explosivo.
- f. Idade do betão: a maioria dos estudos realizados indicam que o risco de *spalling* diminui com a idade, dada a diminuição do teor de humidade.
- g. Carga de compressão: o aumento do carregamento de compressão, assim como a restrição dos elementos de betão, aumentam a probabilidade de ocorrência de *spalling*.
- h. Tipo e tamanho dos agregados: apesar de alguns estudos realizados serem incoerentes, de um modo geral pode afirmar-se que o *spalling* pode ser diminuído com o uso de agregados de reduzida expansão térmica e de menor diâmetro.
- i. Fissuração: por um lado a fissuração pode possibilitar a fuga de gás; por outro lado, pode dar origem ao desenvolvimento de outras fissuras, provocando *spalling*.
- j. Reforço dos elementos: o reforço e a concentração de armaduras de aço nos elementos de betão (nos cantos, por exemplo) favorece a ocorrência de *spalling*. [3]

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

No Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra vêm sendo levados a cabo estudos para o desenvolvimento dum betão de alta resistência de comportamento melhorado ao fogo. Assim foram estudadas três composições diferentes, uma de betão simples, uma de com fibras de aço e de polipropileno e outra com fibras de vidro (Quadro 1). A partir destas composições fabricaram-se provetes cilíndricos que foram depois ensaiados à compressão a altas temperaturas.

3.1 Composições de betão

As três composições testadas apresentavam uma composição base com cimento (CEM) do tipo II 42.5R, superplastificante (SP) SIKA 3002 HE, filler calcário (FC) e quatro tipos de agregados: areia fina (AF), bago de arroz (BA) e dois tipos de britas calcárias (B1 de 5-12 mm; B2 de 14-20 mm).

As composições apenas diferiram no tipo de fibras, ou ausência das mesmas. Para a primeira composição (BAR) não foram usadas fibras; na segunda composição foram usadas fibras de aço (FA)

DRAMIX RC ZP305 com comprimento de 30 mm, diâmetro de 0.55 mm, relação comprimento/diâmetro de 55, tensão de cedência de 1100 Mpa, juntamente com fibras de polipropileno (FP) DURO-FIBRIL, com diâmetro de 31 μ m e comprimento de 6 mm (BARFAP); na terceira composição usaram-se fibras de vidro (FV) VIMACRACK, com comprimento de 12 mm e diâmetro de 14 μ m (BARFV).

No Quadro 1 apresentam-se as diferentes composições, acima descritas.

Quadro 1. Composições de betão

	<i>CEM</i> [kg]	<i>B1</i> [kg]	<i>B2</i> [kg]	<i>BA</i> [kg]	<i>AF</i> [kg]	<i>FC</i> [kg]	<i>A/C</i>	<i>SP</i> [%CEM]	<i>FP</i> [kg]	<i>FA</i> [kg]	<i>FV</i> [kg]
BAR	400	600	321	230	470	200	0.3	2.9	-	-	-
BARFAP	400	600	321	230	470	200	0.3	11.6	1	70	-
BARFV	400	600	321	230	470	200	0.3	11.6	-	-	1.5

Para cada composição de betão, foram realizados três ensaios de resistência à compressão, à temperatura ambiente, após vinte e oito dias de cura, para avaliar a classe de resistência.

No Quadro 2 apresentam-se as classes de resistência para cada composição, obtidas através da Norma Portuguesa NP EN 206-1 (2007), bem como a carga de compressão ($0.7f_{cd}$) a aplicar no ensaio de resistência à compressão, durante o aquecimento dos provetes.

Quadro 2. Classes de resistência à compressão

	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ck} (MPa)	Classe de Resistência	Carga de compressão (KN)
BAR	73.04				
	72.25	71.33	63.33	C50/60	130.5
	68.69				
BARFAP	75.79				
	77.18	76.21	68.21	C55/67	140.6
	75.65				
BARFV	65.19				
	57.04	64.16	56.16	C45/55	115.8
	70.23				

3.2 Provetes

No estudo experimental desenvolvido foi previsto o ensaio de provetes cilíndricos com 75 mm de diâmetro (\varnothing) e 225 mm de altura, em que a relação h/\varnothing é igual a 3 (seguindo as recomendações do RILEM TC-200 HTC) [6].

Para a medição de temperaturas nos provetes foram colocados cinco termopares tipo K (Cromo-Alumel), com diâmetro de 0.5 mm, no interior do provete e à sua superfície, para medição da temperatura durante o ensaio a altas temperaturas.

A disposição dos termopares (TA, TB, TC, TD e TE) foi definida de acordo com as recomendações do RILEM TC-200 HTC [6] (Fig. 2).

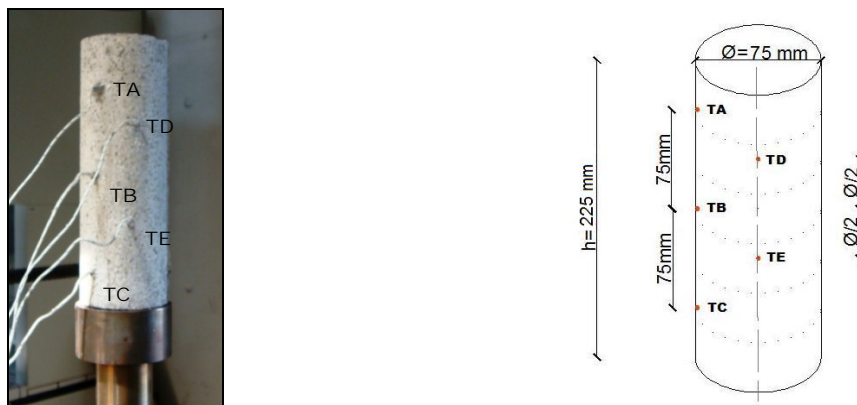


Figura 2. Posição dos termopares.

3.3 Procedimento de ensaio

Usou-se o sistema de ensaio apresentado na Fig. 3, constituído por uma prensa AMSLER com capacidade de 5 MN (a), um forno cilíndrico SERVOSIS com 90 mm de diâmetro interior e 300 mm de altura e capacidade de atingir a temperatura máxima de 1200°C (b) e um datalogger TML TDS-601 para aquisição de dados (forças, deslocamento, temperaturas do forno e temperaturas do provete) (c).



Figura 3. Sistema de ensaio

O procedimento para realização dos ensaios experimentais, foi adoptado de acordo com as recomendações do RILEM TC-200 HTC [6]. O provete era em primeiro carregado para uma carga igual a 70% do valor de cálculo da tensão de rotura à compressão (0,7fcd). Quando o nível de carregamento era atingido, procedia-se então ao aquecimento do provete, a uma taxa de aquecimento de 3°C/min, até ao nível de temperatura desejado. Três níveis de temperatura máxima foram testados (300°C, 500°C, 600°C). O nível de temperatura era atingido quando a média das temperaturas dos três termopares superficiais do provete igualava a temperatura do forno. O provete era depois mantido a essa temperatura durante uma hora para estabilização. Procedia-se, ainda, à verificação da diferença de temperaturas entre os termopares do mesmo nível, do interior e do exterior do provete, não devendo esta diferença ser superior a 20°C. Finalmente realizava-se o ensaio de rotura à compressão do provete sendo o valor da tensão de rotura registado.

Em cada série um dos provetes era aquecido e arrefecido, sob carregamento constante, sem ser levado à rotura para observação do *spalling* e fissuração do betão.

3.4 Resultados

3.4.1 Resistência à compressão

A Figura 4 apresenta o resumo dos resultados obtidos para a variação de resistência à compressão do betão em função da temperatura máxima a que os provetes estiveram sujeitos.

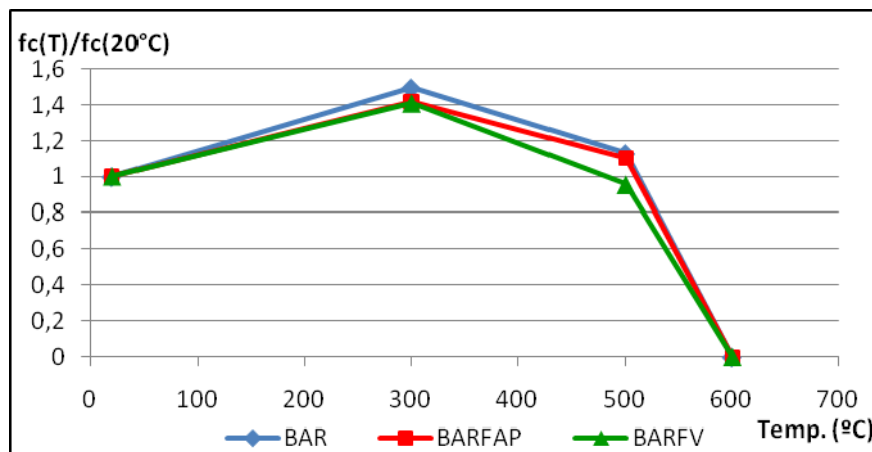


Figura 4. Variação da resistência à compressão do betão em função da temperatura máxima.

Neste gráfico, verifica-se que nos ensaios para 300°C houve um aumento da resistência de cerca de 40% para as composições com fibras, sendo este aumento de aproximadamente 50% para a composição de betão sem fibras. Para as composições sem fibras e com fibras de aço e polipropileno, nos ensaios até 500°C de temperatura máxima, observa-se ainda um ligeiro aumento da resistência à compressão (aproximadamente 10%). Para este nível de temperatura observa-se que os provetes compostos por betão reforçado com fibras de vidro sofreram um decréscimo de resistência de 5%, aproximadamente. Para a o nível máximo de temperatura, 600°C, em todos os ensaios se verificou a rotura com o aquecimento, antes de ser atingida a estabilização no interior do provete.

Foi observada uma rotura muito menos explosiva nos provetes constituídos por BARFAP confirmando a eficácia das fibras de aço na obtenção de betão mais dúctil e no controlo da fendilhação.

3.4.2 Visualização do efeito *spalling*

Na Figura 5 apresentam-se os provetes cilíndricos após aquecimento e arrefecimento até à temperatura ambiente, com carregamento constante. Apresentam-se apenas para os ensaios de 300°C e 500°C, uma vez que a 600°C os provetes atingiram a rotura com o aquecimento.

Não foi observado *spalling* explosivo em nenhum dos ensaios ilustrados na figura anterior. Apenas se registaram fissuras. Pode observar-se um agravamento da fissuração, para os ensaios até 500°C de temperatura máxima. Para este nível de temperatura, o provete constituído por BARFV sofreu esfoliação na parte superior. Nos ensaios realizados até 300°C, apenas o provete constituído BAR apresentou algumas fissuras superficiais.

O carregamento a que os provetes estiveram sujeitos durante o processo de aquecimento e arrefecimento não se mostrou excessivo e evitou em parte a formação de fissuras no betão. Carregamentos maiores e menores levariam à formação de fissuras, no primeiro caso pelo excesso de carregamento e no segundo caso porque este não seria suficiente para evitar a fissuração do betão principalmente durante o processo de arrefecimento.

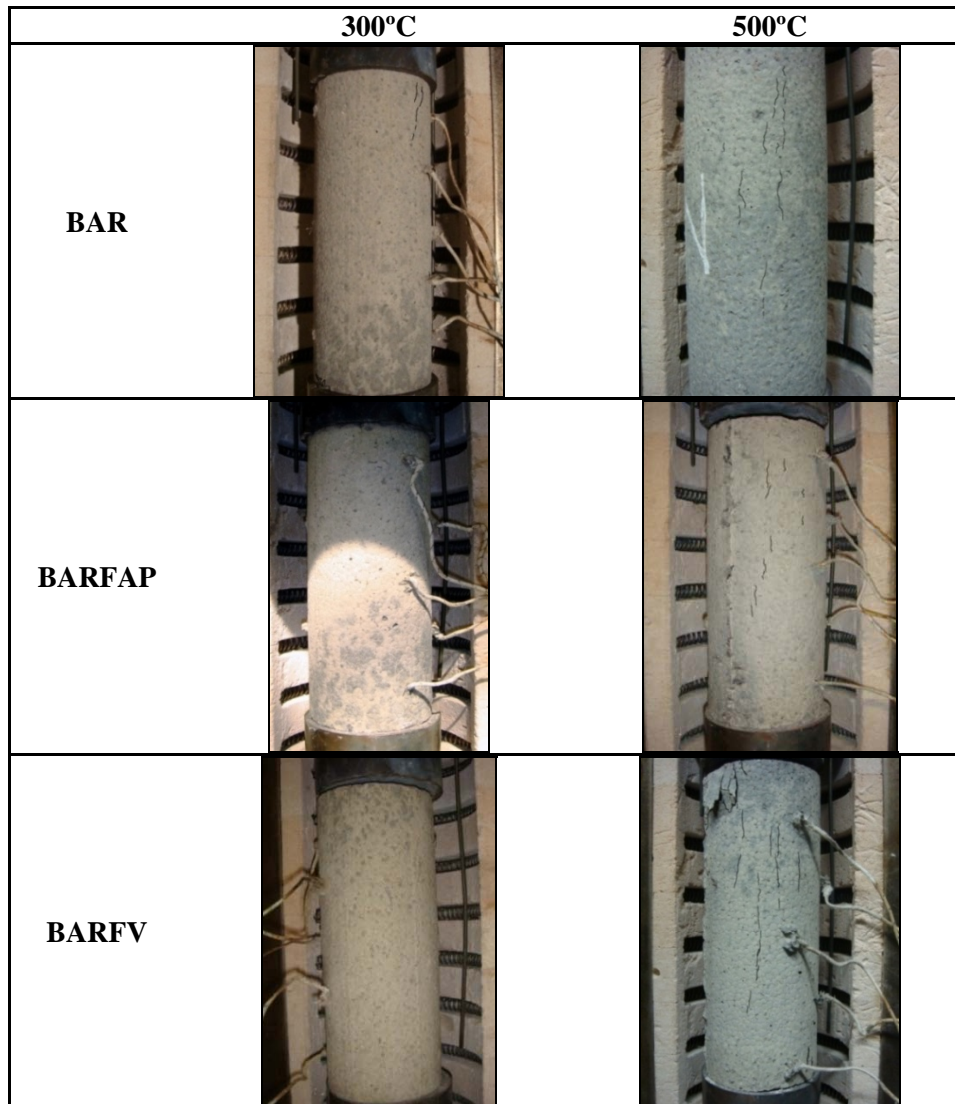


Figura 5. Provete após ensaio de aquecimento e arrefecimento.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

4.1 Parâmetros numéricos

Foram realizadas análises térmicas das composições de betão em estudo e para os três níveis de temperatura máxima (300°C, 500°C e 600°C), para comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Estas análises foram realizadas com recurso ao programa de elementos finitos ABAQUS. O elemento finito escolhido foi um sólido contínuo cúbico de oito nós.

Nas simulações numéricas usaram-se as temperaturas registadas nos termopares dos provetes ensaiados.

Os valores da emissividade e do coeficiente de convecção foram adoptados, para as três composições, segundo o que está definido no Eurocódigo 1, parte 1-2 [7].

Os valores da condutibilidade térmica (λ), do calor específico (c_p) e massa volúmica (ρ) usados, foram os apresentados por *Kodur, V.K.R. e Sultan, M.A* em [8], para betão de alta resistência sem, e com, fibras de aço. Estes valores foram usados para as simulações de provetes constituídos por BAR e BARFAP, respectivamente (Quadros 3, 4 e 5).

Quadro 3. Condutibilidade térmica.

	λ (W/m °C)	Variação da temp.
BAR	2,00-0,0013 T	$0 \leq T \leq 300^\circ\text{C}$
	2,21-0,0020 T	$300 < T \leq 1000^\circ\text{C}$
BARFAP	1,8-0,0016 T	$0 \leq T \leq 500^\circ\text{C}$
	1,2-0,0004 T	$500 < T \leq 1000^\circ\text{C}$

Quadro 5. Massa volúmica.

	ρ (kg/m ³)	Variação da temp.
BAR	$\rho_{(20^\circ\text{C})} \times (1,0032 - 0,00006T)$	$0 \leq T \leq 600^\circ\text{C}$
	$\rho_{(20^\circ\text{C})} \times (2,5512 - 0,00264T)$	$600 < T \leq 700^\circ\text{C}$
	$\rho_{(20^\circ\text{C})} \times (0,7102 - 0,00001T)$	$700 < T \leq 1000^\circ\text{C}$
BARFAP	$\rho_{(20^\circ\text{C})} \times (1,0032 - 0,00006T)$	$0 \leq T \leq 700^\circ\text{C}$
	$\rho_{(20^\circ\text{C})} \times (2,2142 - 0,00179T)$	$700 < T \leq 785^\circ\text{C}$
	$\rho_{(20^\circ\text{C})} \times (0,8172 - 0,00001T)$	$785 < T \leq 1000^\circ\text{C}$

Quadro 4. Calor específico.

	c_p (J/kg °C)	Variação da temp.
BAR	$2,45 \times 10^6 / \rho_c$	$0 \leq T \leq 400^\circ\text{C}$
	$(0,0260 T - 12,850) \times 10^6 / \rho_c$	$400 < T \leq 475^\circ\text{C}$
	$(0,0143 T - 6,295) \times 10^6 / \rho_c$	$475 < T \leq 650^\circ\text{C}$
	$(0,1894 T - 120,11) \times 10^6 / \rho_c$	$650 < T \leq 735^\circ\text{C}$
	$(-0,2630 T + 212,40) \times 10^6 / \rho_c$	$735 < T \leq 800^\circ\text{C}$
	$2,00 \times 10^6 / \rho_c$	$800 < T \leq 1000^\circ\text{C}$
BARFAP	$3,81 \times 10^6 / \rho_c$	$0 \leq T \leq 400^\circ\text{C}$
	$(-0,0165 T + 10,41) \times 10^6 / \rho_c$	$400 < T \leq 475^\circ\text{C}$
	$(0,0079 T - 1,182) \times 10^6 / \rho_c$	$475 < T \leq 625^\circ\text{C}$
	$(0,2333 T - 142,06) \times 10^6 / \rho_c$	$625 < T \leq 700^\circ\text{C}$
	$(-0,1800 T + 147,25) \times 10^6 / \rho_c$	$700 < T \leq 800^\circ\text{C}$
	$3,25 \times 10^6 / \rho_c$	$800 < T \leq 1000^\circ\text{C}$

4.2 Resultados

Na Figura 6 apresenta-se o gráfico da evolução das temperaturas obtidas numericamente e experimentalmente. Neste gráfico inclui-se a curva da temperatura (inferior e superior) do forno.

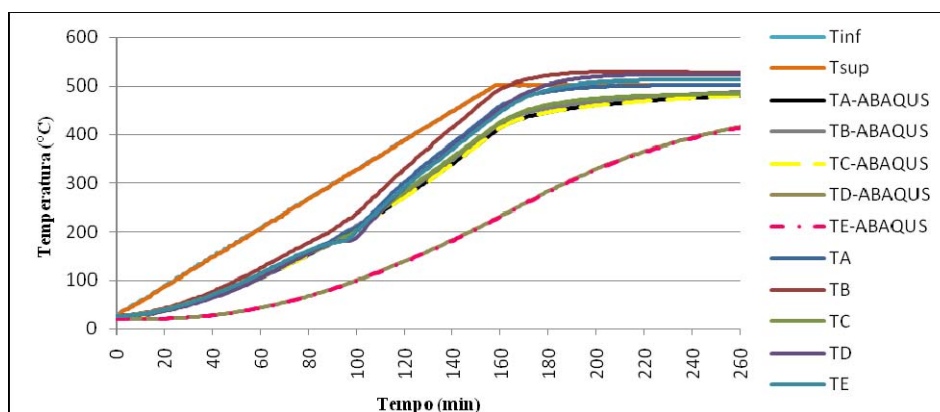


Figura 6. Comparação da evolução da temperatura no provete, até 500°C (ABAQUS e experimental).

Verificou-se que a temperatura no interior do forno se manteve bastante uniforme durante os ensaios, pois as curvas de temperatura inferior e superior foram praticamente coincidentes. Nas curvas de temperatura registadas através dos termopares, pode observar-se que os maiores gradientes de temperatura ocorreram na parte inferior do provete (TC) que esteve em contacto com a amarra inferior. Contudo, de uma forma geral, verificou-se uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete.

De modo geral, observa-se uma boa correlação entre os resultados das simulações numéricas e os dos ensaios experimentais. Relativamente aos resultados obtidos a partir do programa ABAQUS, verifica-

se que a temperatura no interior do provete (termopares TD-ABAQUS e TE-ABAQUS) evolui lentamente, não chegando a atingir os 500°C, ao contrário do verificado experimentalmente.

5 CONCLUSÕES

Analisando os resultados, verificou-se que a inclusão de fibras nas composições de betão evitou o *spalling*. Os provetes constituídos por betão com fibras de aço e polipropileno tiveram melhor comportamento ao fogo do que os constituídos por fibras de vidro, tendo sido observado um pequeno destacamento de betão superficial nestes últimos.

Nos ensaios de resistência à compressão, notou-se uma rotura muito explosiva nos provetes sem fibras assim como nos provetes com fibras de vidro. Confirmou-se assim o benefício das fibras de aço no controlo da fendilhação.

Comparando com os resultados obtidos num estudo anterior, concluiu-se ainda que a incorporação de fibras de aço de menor comprimento assim como de menor quantidade de fibras de polipropileno conferiu maior resistência aos provetes de betão.

As fibras de vidro não tiveram o efeito pretendido, isto é, o efeito de vencerem as tensões térmicas e mecânicas, que se formam no betão a altas temperaturas. No entanto, devem-se realizar futuros estudos nesta área, dado o reduzido número de ensaios realizados neste trabalho experimental.

Para os provetes constituídos por fibras de polipropileno e aço, os resultados obtidos vão ao encontro daqueles que tinham sido obtidos em estudos anteriores, realizados por outros autores.

O comportamento do adjuvante nos betões a altas temperaturas tem que ser melhor estudado, uma vez que, como ainda são desconhecidos os seus efeitos, não se sabe ao certo a influência que o uso deste adjuvante teve nos resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se às empresas SIKA, BIU – International e VIMAPLAS pela oferta de adjuvantes, fibras de aço e de polipropileno e fibras de vidro, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- [1] KALIFA, P.[et al.] (1999); “Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1915-1927.
- [2] KHOURY, G. A. (2000); “Effect of fire on concrete and concrete structures”, Prog. Struct. Engng Mater., Vol 2, pp. 429-447.
- [3] KHOURY, G. A. e ANDERBERG, Y. (2000); “Fire Safety Design”, Concrete Spalling Review- Report.
- [4] KALIFA, P. [et al.] (2001); “High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure”, Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 1487–1499.
- [5] ALVES, A. (2006); “Spalling em estruturas de betão armado”, Trabalho de Seminário do Mestrado em Segurança Contra Incêndios Urbanos, Universidade de Coimbra.
- [6] KODUR, V. K. R. & SULTAN, M. A. (2003); “Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete”, Journal of Materials In Civil Engineering.
- [7] Recomendações do RILEM TC 200-HTC (2005); “Mechanical concrete properties at high temperature – Modelling and applications”. Materials and Structures, Vol. 38, pp. 913-919.
- [8] NP EN 1991-1-2 (2002), Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-2: Acções gerais – Acções em estruturas expostas ao fogo.