

Uso de fibras para um melhor desempenho ao fogo de pilares de betão



**Ana Rita M.
Amado¹**



**João Paulo C.
Rodrigues²**

RESUMO

O betão dispõe na sua estrutura de uma certa percentagem de água. Quando o betão é submetido à acção do fogo, a água existente na estrutura endurecida do betão aumenta de volume ao passar para a fase gasosa. Se a estrutura interna do betão oferecer resistência à saída para o meio circundante da água no estado gasoso, geram-se elevadas tensões internas que poderão levar à rotura frágil deste, que é geralmente seguida da rotura violenta e catastrófica de partes ou de toda a estrutura. Assim o estudo de betões com um melhor desempenho em situação de incêndio é da maior importância.

Esta comunicação resume os trabalhos de investigação em curso no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra para o desenvolvimento dum betão de fibras, de uso corrente que tenha um comportamento melhorado em situação de incêndio e evite fenómenos como o acima referido. As composições testadas apresentavam uma mistura de quantidades variáveis de fibras de polipropileno e de fibras de aço.

Nesta comunicação são apresentados os resultados de ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas do betão de fibras em estudo. São também apresentados os resultados de ensaios de resistência ao fogo de pilares de betão de fibras com dilatação térmica restringida. Nos ensaios em pilares fez-se variar a percentagem de armaduras longitudinais ordinárias em função da percentagem de fibras de aço. Ou seja fez-se uma substituição de parte da armadura longitudinal por fibras de aço e verificou-se qual o comportamento ao fogo dos pilares.

PALAVRAS-CHAVE

fibras de Polipropileno, fibras de Aço, resistência ao fogo, pilares.

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

O betão é um dos materiais de construção mais usados nos nossos dias. Um dos factores que justificam esta ampla utilização é a sua durabilidade quando submetido às mais variadas condições agressivas ambiental, nomeadamente em situação de incêndio, comparando com o comportamento de outros materiais para as mesmas situações. Isto deve-se ao facto, de o betão ter uma resistência relativamente boa a altas temperaturas em virtude das suas características térmicas (baixa condutividade térmica).

Quando o betão é submetido à acção do fogo, a água existente na estrutura endurecida do betão aumenta de volume ao passar para a fase gasosa. Se a estrutura interna do betão oferecer resistência à saída para o meio circundante da água no estado gasoso, geram-se elevadas tensões internas que poderão levar à rotura frágil deste, que é geralmente seguida de uma rotura violenta e catastrófica de partes ou de toda a estrutura. A rotura de importantes elementos da estrutura de betão numa edificação pode levar não só à perda de vidas humanas como também ao aparecimento de danos irreparáveis ou comprometedores da futura utilização da infra-estrutura.

Incêndios em túneis como o caso do incêndio do túnel do Monte Branco e em edifícios como o incêndio na torre de “Windsor”, em Madrid, Espanha, no edifício CESP, em S. Paulo, Brasil, no “Military Personnel Record Center” em Overland, EUA, e no World Trade Center, em Nova York, sensibilizaram a opinião pública para as consequências e extensão dos danos que um incêndio pode ter no comportamento e na estabilidade de toda a estrutura.

Mediante a ocorrência destas catástrofes, surgiu um grande interesse ao nível da comunidade científica internacional estudar o comportamento do betão como material e do betão como elemento estrutural em situação de incêndio, visando extrair mais segurança, de forma a comprometer a segurança estrutural e humana. Apesar de todo o esforço científico ainda não se consegue dar respostas de forma satisfatória e abrangente a todos os casos.

Pretendeu-se assim neste trabalho estudar o comportamento de um betão corrente com fibras de aço e de polipropileno a altas temperaturas. As fibras de polipropileno permitem a criação de micro-canais para possibilitar a fuga do vapor de água, evitando a desagregação do betão e permitem diminuir a fendilhação que se possa desenvolver durante a fase de retracção plástica do betão. Já as fibras de aço permitem impedir a rotura frágil do betão e suprimir de forma parcial as armaduras ordinárias.

2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO

Neste ponto apresentam-se os estudos realizados para a caracterização mecânica dum betão corrente com fibras de aço e polipropileno. Após o estudo da composição do betão e a avaliação da resistência do betão à temperatura ambiente, este foi ensaiado a altas temperatura.

2.1 Composição e resistência à compressão do betão à temperatura ambiente

O betão estudado tinha na sua composição cimento (**CEM**) do tipo I 42,5 R, superplastificante (**SP**) SIKAVISCOCRETE® 3002 HE, filler calcário (**FC**) e quatro tipos de agregados: areia fina (**AF**), bago de arroz (**BA**) e dois tipos de britas calcárias (**B1**: 5-12mm; **B2**: 14-20mm). O reforço fibroso adoptado era constituído por dois tipos de fibras: fibras de polipropileno (**FP**) DURO-FIBRIL com diâmetro (d_{FP}) de 31 μ m e comprimento (l_{FP}) de 6mm; fibras de aço (**FA**) DRAMIX RC 80/60 com comprimento (l_{FA}) de 60 mm, diâmetro (d_{FA}) de 0.75 mm, relação comprimento/diâmetro (l_{FA} / d_{FA}) de 80, tensão de cedência de 1100MPa.

A composição desenvolvida para o betão fibroso dos provetes cilíndricos encontra-se resumida no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição adoptada (por m³ de betão).

CEM [kg]	SP [%CEM]	FC [kg]	AF [kg]	BA [kg]	B1 [kg]	B2 [kg]	FA [kg]	FP [kg]	A/C
200.0	3.0	100	539	407	319	422	70.0	2.0	0.67

Após 28 dias de idade determinou-se a resistência à compressão do betão à temperatura ambiente a partir de provetes cúbicos 150 x 150 mm (Quadro 2) [1].

Quadro 2 – Resistência à compressão do betão com fibras aos 28 dias de idade.

Proвете cúbicos	$f_{c, cub}$ [MPa]	$f_{cm, cub}$ [MPa]	$f_{ck, cub}$ [MPa]	Classe de Resistência
1	28.10	31.89	23.89	C16/20
2	35.25			
3	32.31			

Realizaram-se também ensaios em provetes cilíndricos com diâmetro (ϕ) = 79mm e altura (h) = 237mm, semelhantes aos usados nos ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas adiante descritos, cujo os resultados confirmaram a classe de resistência indicado no Quadro 2.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão à temperatura ambiente, permitiram determinar os níveis de carregamento aplicar aos provetes de betão de fibras nos ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas (Quadro 3).

Quadro 3 – Níveis de carregamento adoptados.

f_{cd} [MPa]	$0.3 f_{cd}$ [MPa]	$0.7 f_{cd}$ [MPa]
11.92	4.78	11.15

2.2 Ensaios de resistência à compressão a altas temperaturas do betão

O betão estudado à temperatura ambiente foi depois ensaiado à compressão a altas temperaturas. Os provetes cilíndricos com $\phi = 79$ mm e $h = 237$ mm ($h/\phi=3$) eram aquecidos até diferentes níveis de temperatura (300°C, 500°C, 700°C e 900°C) sob carregamento constante ($0.3f_{cd}$, $0.7f_{cd}$), em que f_{cd} é o valor de cálculo da resistência à compressão do betão à temperatura ambiente sendo depois ensaiados à compressão.

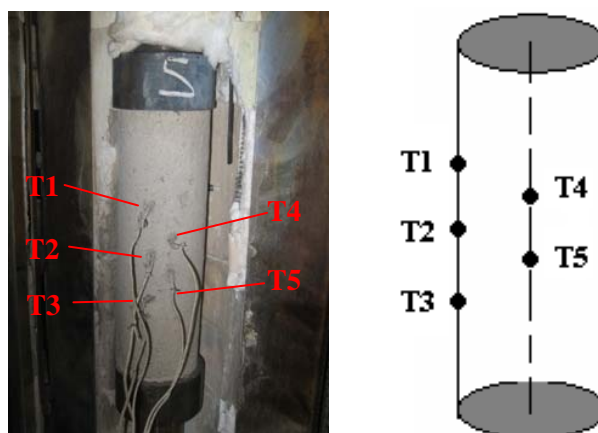


Figura 1- Disposição dos termopares

A relação entre a altura e o diâmetro $h/\phi=3$ permitiu que houvesse uma maior influência na distribuição da temperatura em altura. Para os ensaios de resistência à compressão à temperatura ambiente para a determinação dos níveis de carregamento usou-se a mesma relação.

A evolução da temperatura no interior do provete foi medida por intermédio de termopares tipo K (Cromo-Alumel), com diâmetro de 0.5mm, localizados em 5 pontos do provete, seguindo as recomendações do RILEM TC 200-HTC (fig. 1) [2].

2.2.1 Procedimento de ensaio

O modelo experimental era composto por uma máquina universal, da marca SERVOSIS de 600KN, capaz de aplicar forças de compressão (1) (fig. 2). A máquina era controlada através dum sistema próprio (2). As forças eram aplicadas ao provete a ensaiar através dum conjunto de amarras em aço inox refractário (3) que resistiam sem deformações a altas temperaturas. O provete era colocado dentro dum forno cilíndrico (4), da marca SERVOSIS, com uma câmara de $\phi = 90$ mm e $h = 300$ mm, que aplicava a acção térmica. O forno era controlado através de dois controladores que registavam a temperatura a dois níveis diferentes no forno (5). Todos os parâmetros medidos nos ensaios eram registados num sistema de aquisição de dados TML TDS 602 (6).



Figura 2 – Resistência à compressão dos provetes cilíndricos de betão a altas temperaturas.

Ao provete cilíndrico de betão começava por ser aplicada uma carga até ao nível de carregamento pretendido ($0,3f_{cd}$ e $0,7f_{cd}$).

Após a estabilização da carga procedia-se ao aquecimento dos provetes a uma taxa de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até se atingir o nível de temperatura desejado (300°C , 500°C , 700°C e 900°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, caso este ainda não tivesse rompido durante o aquecimento.

2.2.2 Resultados

Na figura 3 apresentam-se os resultados da evolução de temperatura em cada um dos termopares dos provetes cilíndricos e a evolução da temperatura do forno em função do tempo para um ensaio de aquecimento até 500°C.

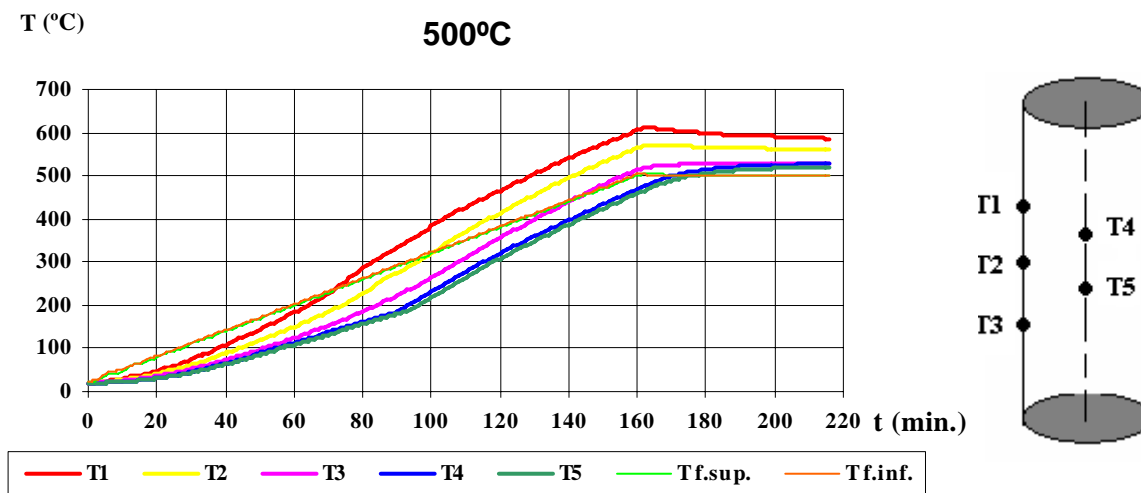


Figura 3 – Evolução da temperatura num provete para o ensaio de 500°C

Da análise do gráfico verifica-se uma grande uniformidade das temperaturas no interior do provete em relação às temperaturas do forno. Este facto deve-se à boa exposição térmica que o provete esteve sujeito no forno cilíndrico e ao facto da taxa de aquecimento ser somente de 3°C/minuto. Esta uniformidade verificou-se nos demais ensaios referentes às várias séries testadas.

Na figura 4, sintetizam-se os resultados da resistência à compressão do betão a altas temperaturas em relação à sua resistência à compressão do betão à temperatura ambiente.

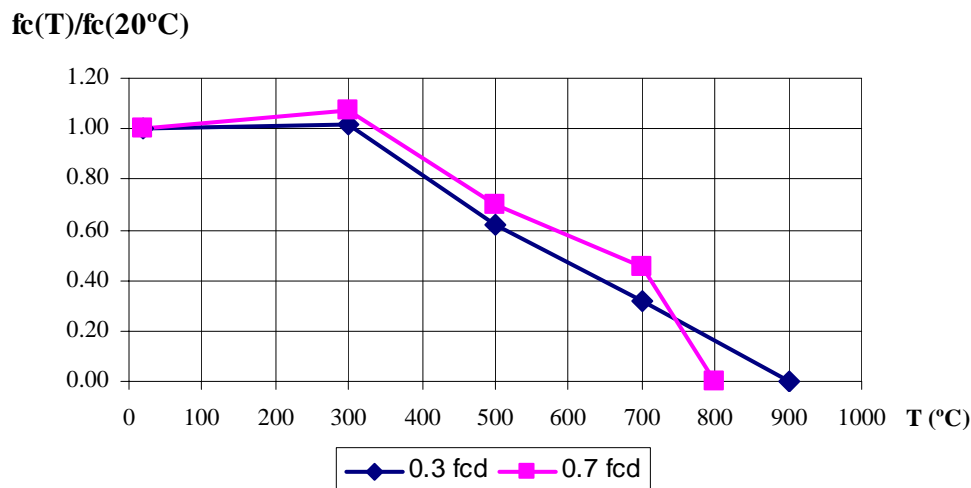


Figura 4 – Resistência à compressão do betão a altas temperaturas em relação à resistência à temperatura ambiente em função da temperatura máxima

Da análise da figura 4, verifica-se que o valor da resistência à compressão do betão mantém-se aproximadamente constante até aos 300°C, ou seja, não apresenta praticamente nenhuma perda de resistência à compressão. Para o nível de carregamento de 0.7 f_{cd} verifica-se até um ligeiro acréscimo de resistência aos 300°C. A partir dos 300°C, surge um decréscimo gradual dos valores para ambas as situações, sendo o decréscimo maior para os provetes que foram submetidos a 0,3 f_{cd} do que para o

caso de $0,7f_{cd}$. Conclui-se que a situação mais carregada apresenta um efeito benéfico na degradação da resistência à compressão do betão em função da temperatura, pois evita a formação de fissuras durante o aquecimento. A situação mais carregada acaba no entanto por ter um efeito maléfico para temperaturas mais elevadas. Nenhum dos provetes chegou a atingir o nível de temperatura de 900°C tendo todos rebentado durante o aquecimento.

Na figura 5, faz-se uma comparação entre os resultados da resistência à compressão a altas temperaturas do betão ensaiado com os valores das resistência à compressão de betões propostos no Eurocódigo 2 Parte 1-2 [3] e DTU [4].

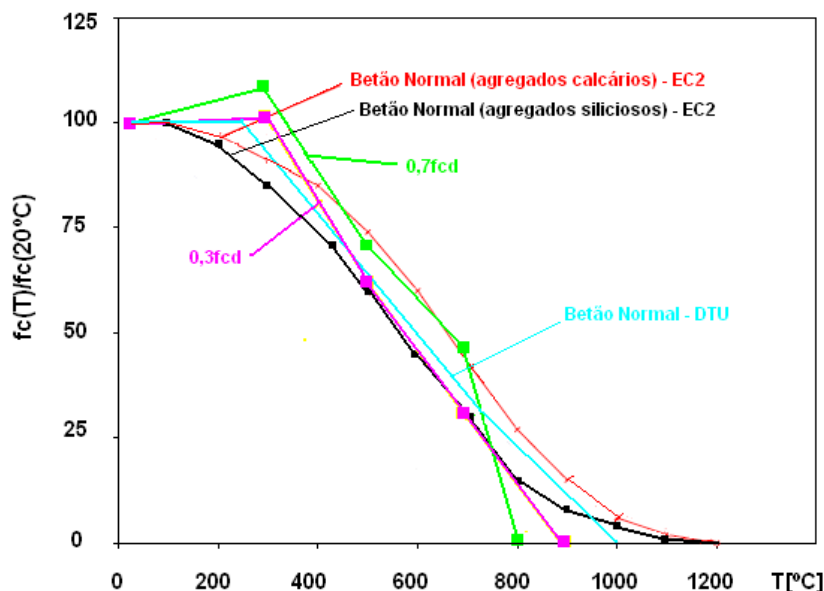


Figura 5 – Comparação dos resultados obtidos da resistência à compressão do betão a altas temperaturas com os propostos no EC2 parte 1.2 e DTU.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais aproximam-se bastante das curvas de cálculo propostas pelo Eurocódigo 2 parte 1.2 e pelo DTU. É de referir que as curvas de cálculo das normas referidas são para betões sem fibras.

3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PILARES DE BETÃO COM FIBRAS

Neste ponto descrevem-se os resultados dos ensaios de resistência ao fogo realizados em pilares de betão de fibras. Foram ensaiados pilares com uma quantidade fixa de fibras de polipropileno e uma quantidade variável de fibras de aço. As armaduras longitudinais dos pilares eram substituídas parcialmente por fibras de aço. A quantidade de aço (fibras de aço + armaduras longitudinais em aço) nos pilares era sempre a mesma.

3.1 Composição do Betão dos pilares

A composição dos betões usados na fabricação dos pilares encontra-se resumida nos Quadros 4 e 5.

O Pilar 4 é um pilar de referência sem fibras tendo sido usado um betão pronto comercial, com a seguinte composição: cimento (CEM) 190 kg; superplastificante (SP) 2.9% CEM; cinzas volante (CV) 100 kg; areia fina (AF) 260 kg; areia média (AM) 380 kg; areia grossa (AG) 250 kg; brita 1 (B1) 940 kg e uma relação entre água e cimento (A/C) de 0.59.

Quadro 4 – Composição dos betões de fibras dos pilares (por m³ de betão).

Pilar	CEM [kg]	SP [%CEM]	FC [kg]	AF [kg]	BA [kg]	B1 [kg]	B2 [kg]	FP [kg/m ³]	FA [kg/m ³]	A/C
1	200.0	3.0	100	539	407	319	422	1.5	38.80	0.67
2	200.0	3.0	100	539	407	319	422	1.5	27.24	0.67
3	200.0	3.0	100	539	407	319	422	1.5	16.56	0.67

Quadro 5 – Quantidades de fibras de aço e de armadura ordinária nos pilares.

Pilar	Armadura Ordinária	Armadura Ordinária [kg]	Fibras de Aço [kg]	Total de Aço [kg]
1	4 ϕ 10	7.40	38.80	46.20
2	4 ϕ 16	18.96	27.24	46.20
3	4 ϕ 20	29.64	16.56	46.20
4	4 ϕ 25	46.20	-----	46.20

Após 28 dias de idade através de provetes cúbicos 150 x 150 mm determinou-se a resistência à compressão dos betões à temperatura ambiente. Os valores encontram-se resumidos no Quadro 6.

Quadro 6 – Resistência à compressão do betão de fibras aos 28 dias de idade.

Pilar	f_{cm} [Mpa]	f_{ck} [Mpa]	Classe de Resistência
1	23.8	16.0	C12/15
2	27.0	19.0	C12/15
3	25.1	17.1	C12/15
4	29.4	21.4	C20/25

3.2 Provetes

Os pilares ensaiados tinham secção quadrada 250 mm x 250 mm e 3 metros de altura. As armaduras longitudinais tinham o diâmetro indicado no Quadro 5 enquanto que os estribos eram ϕ 8mm (fig. 6).

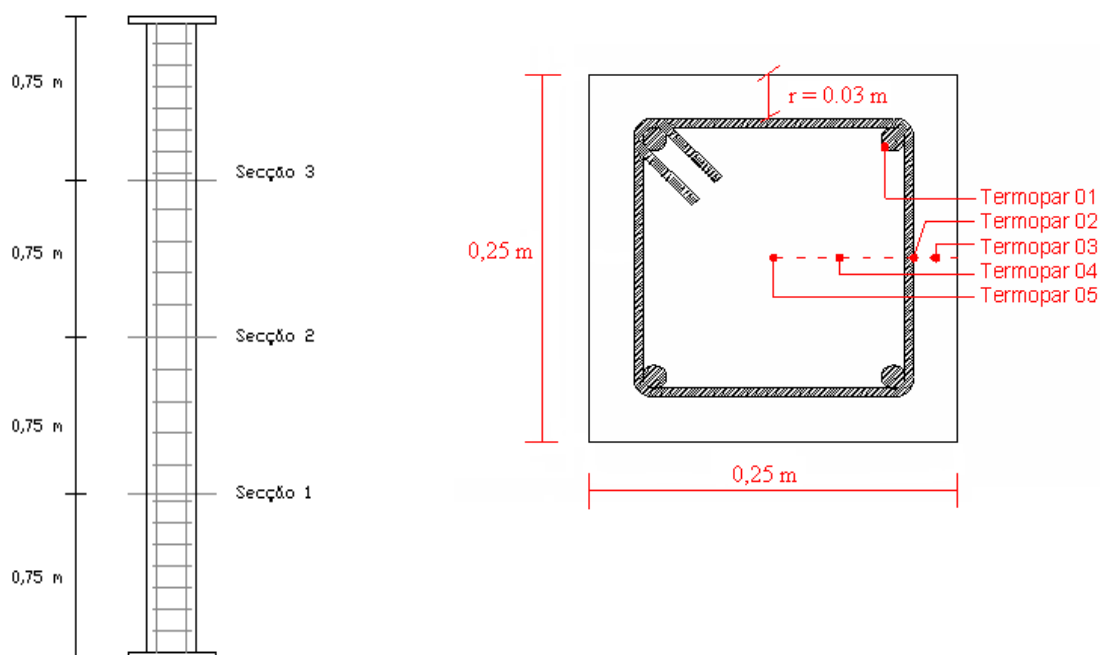


Figura 6 – Esquema dos pilares e localização dos termopares.

Para medição das temperaturas foram colocados no betão termopares tipo K (Cromo-Alumel) em 3 secções do pilar. Cada uma das secções tinha 5 termopares em diferentes pontos da secção transversal para medição das temperaturas em profundidade. O termopar 1 estava soldado na armadura longitudinal, enquanto que o termopar 2 estava soldado no estribo, os demais estavam embebidos no betão (fig. 6).

3.3 Procedimento de ensaio

Nos ensaios de resistência ao fogo foi usado um novo modelo de ensaio de pilares ao fogo com dilatação térmica restringida, desenvolvido por António Moura Correia, para o seu Doutoramento em Engenharia Civil na Universidade de Coimbra (fig. 7). Este sistema é constituído por um pórtico de restrição de rigidez variável (1), embora nestes ensaios fosse adoptada uma rigidez aproximada de 50 kN/mm (média das rigidez medidas dnos ensaios). Este pórtico pretende simular a rigidez da estrutura circundante do edifício ao pilar em caso de incêndio.

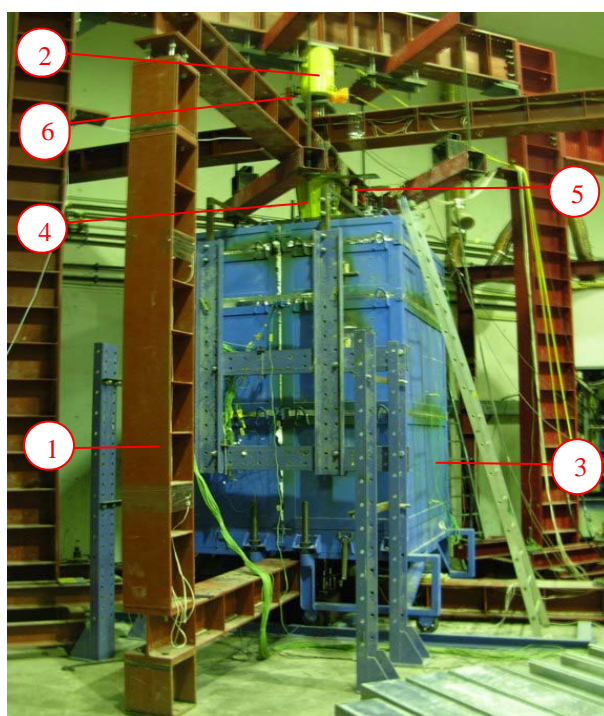


Figura 7 – Modelo de ensaio de resistência ao fogo dos pilares

Os pilares estavam sujeitos a uma força de compressão constante durante todo o ensaio, 686kN. Esta força era igual em todos eles e correspondia a 70% do valor de cálculo da carga de instabilidade à temperatura ambiente, calculada para o pilar 4 de referência, a partir do método da rigidez nominal indicado no Eurocódigo 2 parte 1.1 [5]. Esta força pretendia simular a carga de serviço a que o pilar está sujeito quando inserido numa estrutura real. A carga era aplicado através dum macaco hidráulico (2) controlado através duma central hidráulica servo-controlada.

A acção térmica era aplicada ao pilar através dum forno eléctrico modular (3) controlado a diferentes alturas através de termopares de sonda do tipo K. O aquecimento seguiu de perto a curva de incêndio ISO 834.

As forças de restrição geradas no pilar devidas ao aquecimento, eram medidas através duma célula de carga de 3 MN situada no interior dum pistão de aço que se localizava na cabeça do pilar (4).

Nos ensaios eram medidos os deslocamentos axiais e rotações da cabeça do pilar através de 3 transdutores de deslocamentos (5), dispostos ortogonalmente em 3 pontos distintos, formando um plano de deformação e através dum transdutor de deslocamentos (6) colocado junto ao macaco que aplicava a carga de compressão.

Para além disto eram, como se referiu, medidas temperaturas em diferentes secções e profundidades do pilar e no forno.

3.4 Resultados

As temperaturas foram registadas em diferentes pontos da secção transversal dos pilares ensaiados. A título de exemplo apresentam-se as temperaturas registadas na secção 2 do pilar 3 (fig. 8).

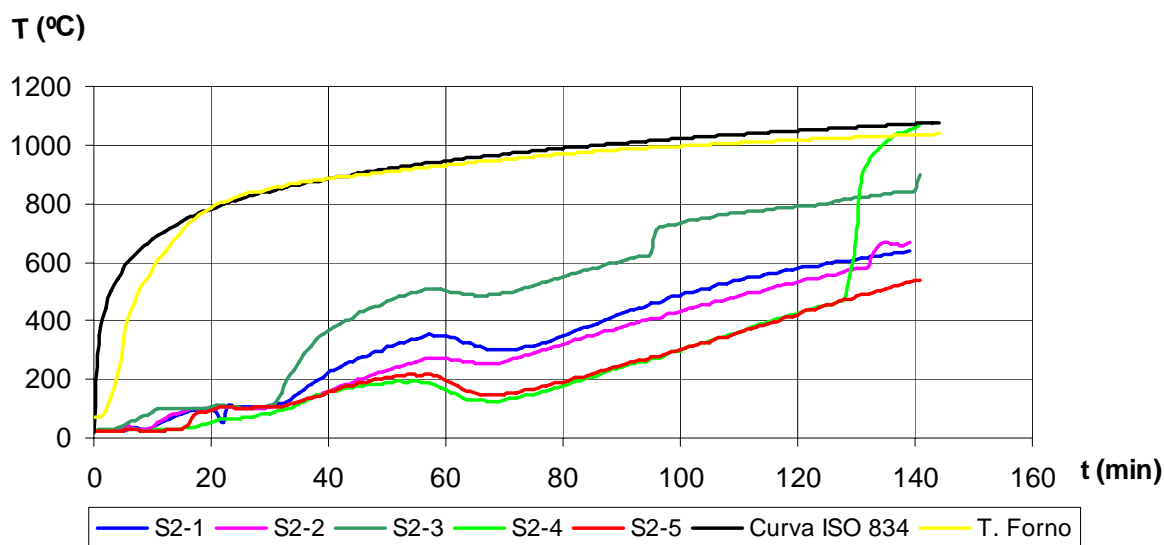


Figura 8 – Evolução da temperatura nos termopares da secção 2 do pilar 3

Da análise do gráfico verifica-se que a curva do forno seguiu de perto a curva ISO 834 e a existência de gradientes térmicos em profundidade na secção transversal do pilar. Os termopares mais internos foram obviamente aqueles que registaram menores temperaturas.

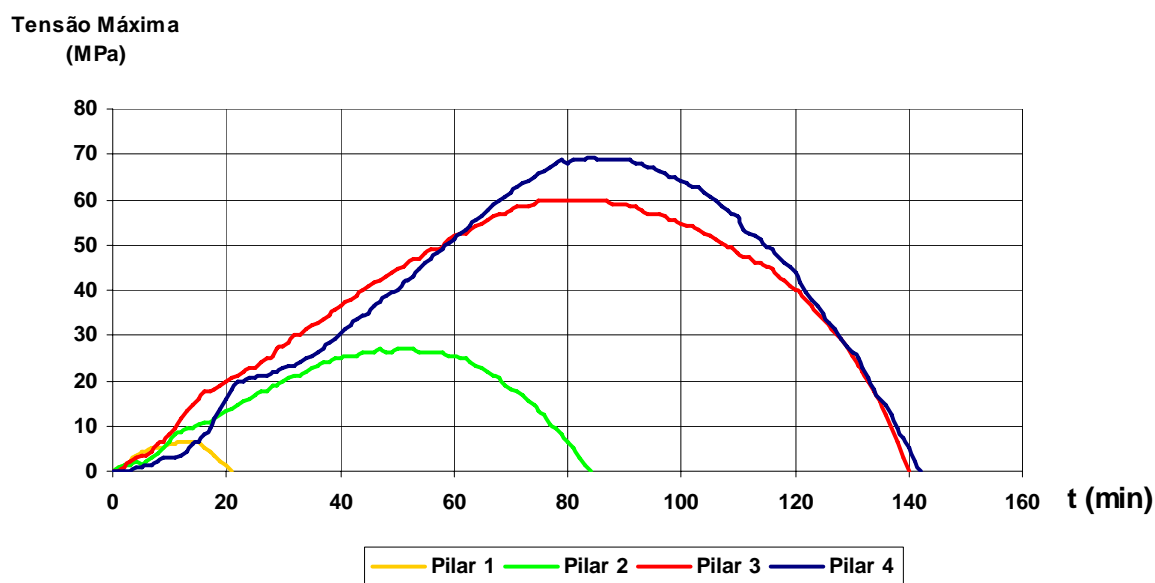


Figura 9 – Evolução das forças de restrição nos pilares em função do tempo

A evolução das forças de restrição nos pilares ensaiados em função do tempo encontra-se representada na figura 9. Da análise da figura verifica-se que o pilar 1 que apresenta a menor quantidade de armadura longitudinal, substituída por fibras de aço, apresenta as menores forças de restrição e a menor resistência ao fogo. À medida que a quantidade de armadura longitudinal aumenta, aumentam as forças de restrição medidas e a resistência ao fogo do pilar. O pilar 3 com varões longitudinais $\phi=20\text{mm}$ e $16,56\text{ kg/m}^3$ de fibras de aço, apresenta um desenvolvimento das forças de restrição idêntico ao pilar 4 de referência com armaduras longitudinais $\phi=25\text{mm}$ e sem fibras de aço.

4 CONCLUSÕES

Do trabalho de investigação realizado, conclui-se que as fibras de polipropileno e de aço melhoram o comportamento ao fogo do betão corrente. Enquanto que as fibras de polipropileno volatilizam criando canículos por onde pode escapar o vapor de água gerado no interior dos elementos de betão em situação de incêndio, as fibras de aço permitem resistir o betão às tensões de origem térmica geradas em caso de incêndio evitando a fissuração dos elementos.

A resistência à compressão do betão de fibras de aço e polipropileno a altas temperaturas, segue de perto os valores recomendados pelo Eurocódigo 2 parte 1.2 e pelo DTU. A resistência é praticamente constante até temperaturas da ordem dos 300°C , descendo depois gradualmente até zero para temperaturas de 800°C no caso do nível de carregamento de $0.7f_{cd}$ e temperaturas de 900°C no caso do nível de carregamento de $0.3f_{cd}$.

A substituição das armaduras longitudinais por fibras de aço nos pilares não traz grandes vantagens em termos de comportamento ao fogo destes. Os pilares que apresentaram maior resistência ao fogo foram aqueles que tinham maior quantidade de armadura longitudinal.

O pilar de referência, um dia após ensaio, apresentava grande esfoliação e spalling com as armaduras longitudinais expostas, enquanto que os pilares com fibras de aço e polipropileno não apresentavam este fenómeno. Assim o uso de fibras de polipropileno e uma pequena quantidade de fibras de aço no betão, pode trazer vantagens no controle do spalling do betão.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à SIKA pela oferta de adjuvantes, à BIU – Internacional e à BEKAERT pela oferta de fibras de aço e polipropileno e à COMITAL pela oferta de filler calcário.

REFERÊNCIAS

- [1] NP EN 206-1, (2007); “Betão – Parte 1 -Especificação, desempenho, produção e conformidade”, IPQ, 84p.
- [2] RILEM TC 200-HTC, (2005); “Mechanical concrete properties at high temperature – Modelling and applications”, Materials and Structures, Vol. 38, pp. 913-919, IPQ.4p.
- [3] EN 1992-1-2, Eurocode 2 parte 1.2 (2004) “Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”.
- [4] Hager, Izabela (2004) ; “ Comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques”. Tese de Doutoramento, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 183p.
- [5] EN 1992-1-1, Eurocode 2 parte 1.1 (2004) “Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”.