

Composição de betão de resistência melhorada ao fogo para aduelas de túneis - parte I

L. Lourenço, J. Barros, P. Souto

Relatório 05-DEC/E-32

*O presente trabalho foi realizado no âmbito do projecto FICOFIRE
POCTI/ECM/57518/2004*

Data: Dezembro de 2005

N.º de páginas: 42

Palavras chave: BRF, Fogo, Temperaturas elevadas, Aduelas, Túneis



Escola de
Engenharia



Departamento de
Engenharia Civil



Universidade
do Minho



Spie batignolles europe



RESUMO	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUÇÃO	5
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	6
2.1. Fogo em túneis	6
2.2. Casos de carga de uma aduela de túneis	8
2.3. BRF em aduelas	11
2.4. Propriedades térmicas do BRF a altas temperaturas	13
2.5. Comportamento do betão sob a acção do fogo	17
2.6. Cenários de fogo normalizados	19
2.7. Classificação dos materiais (resistência ao fogo)	21
2.8. Inspeção e avaliação de elementos estruturais afectados pelo fogo	22
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.1. Selecção do tipo de fibra não metálica	23
3.2. Determinação do tempo necessário para a estabilização da resistência residual de compressão	32
3.3. Dosagem necessária de fibras de polipropileno	35
4. CONCLUSÕES	40
AGRADECIMENTOS	40
BIBLIOGRAFIA	41



Resumo

Para a obtenção de um betão de ductilidade elevada e resistência melhorada ao fogo para aduelas de túneis, optou-se, entre outros, pela utilização de dois tipos de fibras. Um primeiro tipo de fibra, não metálica, que apresenta reduzido grau de polimerização e derrete na presença de temperaturas elevadas. Sob a acção do fogo, o desaparecimento desta fibra irá criar uma rede de micro canais que permite a saída do vapor de água do interior do betão. A inclusão deste tipo de fibra também reduz a propagação de fendas durante a fase de retracção plástica do betão. O outro tipo de fibra, metálica, tem o propósito de garantir o nível de ductilidade que se pretende para o betão, bem como reduzir a quantidade de armadura convencional a colocar nos elementos estruturais.

O presente relatório começa com uma breve síntese do estado do conhecimento no âmbito de: incêndios em túneis, aspectos acerca do dimensionamento de aduelas para túneis, nomeadamente a inclusão de fibras metálicas e o comportamento do betão sob temperaturas elevadas (alterações das suas propriedades, cenários de fogo normalizados, classificação dos materiais e inspecção e avaliação de estruturas afectadas). Segue-se uma secção onde são reportados os ensaios preliminares efectuados com vista à selecção do tipo e dosagem de fibra não metálica a utilizar, bem como o tempo necessário para a estabilização da resistência residual do betão com o tempo após a exposição à simulação do efeito do fogo.



Abstract

To develop a high ductility concrete of enhanced fire resistance, two distinct types of fibers were used. The first one is a non-metallic fiber, with low degree of polymerization, that sublimes in the presence of high temperatures. Under the action of fire, these fibers create a network of micro channels for the escape of the water vapor. These fibers have also the purpose of decreasing the crack formation and crack propagation during the concrete plastic shrinkage phase. The other type of fibers, is made by steel, and has the purpose of providing high ductility to the concrete post-cracking behaviour, as well as of replacing, totally or partially, conventional reinforcement applied in pre-casting concrete tunnel segments.

A brief state-of-the-art is presented in the following topics: fire in tunnels; design of tunnel segments; the use of metallic fibers in this type of structural elements; concrete behavior under high temperatures (how material properties are affected, fire scenarios, fire classification for materials and inspection and evaluation of affected structures). A section of this document is dedicated to the description of the preliminary tests carried out to select a non-metallic fiber type and the content of this fiber. The period of time for the stabilization of the concrete compressive residual strength was also assessed.

1. Introdução

O betão é o material de construção mais utilizado nos dias correntes. Um dos factores que justificam tal utilização é a sua durabilidade sob variadas condições de agressividade ambiental, nomeadamente a sua resistência ao fogo. Contudo, um grande número de projectos de investigação e alguns acidentes em túneis (Figura 1) evidenciaram que as elevadas temperaturas originam uma degradação notória das propriedades do betão, bem como um extenso “destacar” (*spalling*) explosivo da sua superfície.



Figura 1 – Acidentes em túneis (Channel Tunnel Fire)

O destacar do recobrimento do betão expõe a armadura de reforço ao contacto directo com as chamas do fogo, 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 resistência elevada, pois são bastante compactos e de porosidade reduzida, o que conduz ao desenvolvimento de pressões elevadas no interior da micro-estrutura do betão.

Um fogo num túnel pode originar, neste sentido, o colapso estrutural, a perda de vidas humanas (grandes objectos e/ou restos de betão a cair sobre as pessoas; inundações ou mesmo devido a um eventual colapso estrutural, nos casos de roturas no revestimento do túnel), bem como o consumo de elevados recursos económicos para o restabelecimento do serviço (custo de reparação ou quebra no serviço; impacto sobre a economia local).

Os danos nos elementos estruturais provocados pelo desenvolvimento do incêndio são, na maioria dos casos, difíceis de avaliar. No entanto, é inequívoca a redução do período de vida útil, os efeitos financeiros a longo prazo e a perda de confiança da população no uso de túneis.



Os elementos estruturais terão que evitar o colapso da estrutura durante um período de tempo suficientemente longo de forma a permitir a intervenção dos bombeiros e a evacuação das pessoas. O colapso de toda a estrutura é especialmente catastrófico em túneis submersos ou em ambientes urbanos, sob edifícios ou outras estruturas. Como segundo requisito, os elementos estruturais deverão apresentar uma resistência residual que permita a sua recuperação. São necessários meios de inspecção e avaliação que ofereçam a confiança necessária, de forma a acelerar a decisão e, desta forma, reduzir não somente os custos associados com a interrupção do serviço, como também os prejuízos para a economia local e custos de reparação.

2. Estado do Conhecimento

No presente secção, expõe-se, de forma concisa, o estado do conhecimento relativo à resistência de cascas de BRF (as aduelas, em particular), antes e após a acção de um fogo.

2.1. Fogo em túneis

2.1.1. Existência de novos fogos

Como referido, são vários os fogos ocorridos em túneis. Estes originam significativas perdas humanas, além de todos os custos indirectos relativos ao restabelecimento de serviço e ao impacto provocado sobre a economia local, com a cessação temporária de uma via de comunicação (ver Tabela 1). Infelizmente, devido ao que seguidamente se expõe, não se poderá afirmar que a probabilidade da ocorrência de novos fogos no futuro irá diminuir.

Em 1995, aproximadamente 45% da população mundial vivia em cidades. Prevê-se que esta percentagem aumente para 55% em 2015. A população urbana está a aumentar em 60 milhões de habitantes anualmente. Em 2015, cerca de 10% da população urbana irá se concentrar em “mega cidades” com mais de 15 milhões de habitantes. O aumento da população mundial e a sua concentração em áreas urbanas irá provocar um aumento do trânsito de veículos em cerca de 1.5 vezes.

Por estas razões, é clara a necessidade do aumento do número de vias de comunicação, particularmente em áreas urbanas. Atendendo à elevada densidade de construções nas necessidades, o espaço subterrâneo apresenta-se como uma boa alternativa. Os espaços subterrâneos têm reduzidos custos (não há expropriação), oferecem protecção natural, isolamento,

protecção ambiental, maior durabilidade e resistência sísmica. A opção pela construção de túneis e uma maior ocupação do espaço subterrâneo irá proporcionar às “mega cidades” a resposta ao aumento da circulação viária.

Tabela 1 – Acidentes em túneis (fogo)

Túnel	Local	Data	Danos humanos	Custo económico (Milhões de Dolares)	Temperatura máxima (°C)	Tempo de duração (horas)	Comprimento total (km)	Comprimento danificado (m)	Observações
Holalnd	Nova Iorque	Maio 1949	66 feridos	1	-	4		200	
Moorfleet	Hamburgo						0.243		Origem num veículo de mercadorias com 4 toneladas de polietileno.
Hokuriku	Japão	1972	30 mortos 714 feridos	-	-	-	13.8	-	Origem num veículo automóvel
Nihonzaka	Japão	Julho 1979	7 mortos 2 feridos	33	1300	159	2	1122	Origem em colisão entre camiões. Foram necessários 7 dias para extinguir o fogo, perdendo-se 189 veículos. Reparação durou 2 meses.
Kajiwara	Japão	1980	1 morto	-	-	-		280	
Caldecott	Oakland	Abril 1982	7 mortos	3	-	2,4		580	
Summit	Inglaterra	1984			1200		2.7		Origem num veículo ferroviário contendo 600 toneladas de gasolina.
Storebælt	Dinamarca	1994							
Euro Tunnel	França Inglaterra	Novembro 1996	34 feridos	300	1100	10		-	Reparação demorou 6 meses.
Mont Blanc	França	Março 1999	41 mortos	200	1000	48		-	Reparação demorou 3 anos.
Tauern	Áustria	Maio 1999	1 morto 71 feridos	-	1000	50		-	
São Gotardo	Itália Áustria	Outubro 2001	11 mortos	-	1200	24	16.9	-	Origem em colisão entre camiões. Reparação demorou 2 meses.

Nos próximos 10 a 15 anos, aproximadamente 2.100 km de túneis estão planeados para a Europa, 2.350 km para a Ásia, 650 km para a América do Sul e 650 km para a América do Norte. Com o aumento do número de túneis e do número de veículos em circulação, aumentará a probabilidade de um fogo.

Na Figura 2 apresentam-se os dados recolhidos pelo *Japan Concrete Institute* que, embora não representem a totalidade dos fogos ocorridos desde o surgimento de túneis para circulação de veículos, demonstram a forte tendência para o aumento no número de incêndios em túneis.

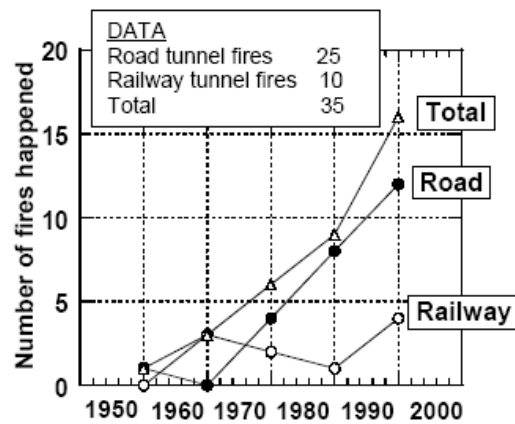


Figura 2 – Fogos em Túneis

2.1.2. Colapso estrutural de um túnel devido ao fogo

A ruptura da estrutura de um túnel pela acção de um incêndio tem um percurso similar ao esquematizado na Figura 3. Com o início de um incêndio, a temperatura aumenta rapidamente, podendo atingir os 1000 °C em cerca de 20 minutos. Esta elevação brusca da temperatura provoca a evaporação da água que satura os poros do betão nas suas camadas mais superficiais. Se o vapor não encontrar um caminho de fuga, gera tensões internas elevadas. Além disso, a face exposta ao calor dilata-se, restringida, contudo, pelas camadas internas, o que incrementa o estado de tensão. Este aumento de tensão leva ao referido *spalling*, expondo as camadas mais internas às temperaturas elevadas. Neste sentido, ocorre um *spalling* progressivo. Dependendo do tipo de maciço existente, poderá ocorrer a rotura completa do revestimento do túnel e o colapso de todo o maciço no seu contorno.



Figura 3 – Sequência da destruição de um túnel pela acção de fogo

2.2. Casos de carga de uma aduela de túneis

O revestimento de túneis é usualmente efectuado recorrendo à aplicação de “anéis” em betão. Estes anéis são constituídos por sete segmentos pré-fabricados (aduelas). A aplicação destes elementos

permite um melhor controlo de qualidade e uma aparência final esteticamente satisfatória, entre outros atributos.

O dimensionamento de aduelas passa pela análise dos casos de carga em duas diferentes fases: fase de construção (condição de armazenamento, de transporte, de manipulação pelo erector e de instalação pelo escudo); comportamento a longo prazo.

2.2.1. Fases de construção

Condição de armazenamento: O forte ritmo de fabricação de aduelas exige, por vezes, que estas sejam armazenadas umas sobre as outras, ainda com poucos dias de cura do betão. Se assim não fosse, seria necessário uma área bastante grande de terreno para a armazenagem, originando custos de aluguer de terreno elevados. Dado que o armazenamento se processa poucas horas após a desmoldagem, poderá surgir fissuração nas aduelas. Para evitar tal ocorrência, o armazenamento das aduelas deverá ser feito de forma a reduzir os esforços de flexão das peças. Contudo, para efeitos de dimensionamento deverão ser previstas várias possibilidades de armazenamento. A Figura 4 apresenta o armazenamento mais comum.



Figura 4 – Condição de Armazenamento

Condição de transporte: a verificação das condições de transporte é normalmente feita considerando um coeficiente dinâmico.

Condição de manipulação pelo erector: a manipulação das aduelas pelo escudo para instalar o revestimento é realizada por intermédio do erector (Figura 5). A verificação de resistência é feita considerando uma aduela apoiada num ponto único.



Figura 5 – Manipulação pelo erector

Condição de instalação pelo escudo: A verificação da estabilidade das aduelas durante a fase da sua montagem pelo escudo (Figura 6) é realizada considerando as acções dos actuadores do referido escudo. A verificação da tensão de contacto sobre os apoios dos actuadores e das armaduras de junta deverá ser feita considerando desalinhamentos da linha de acção dos actuadores em conformidade com as tolerâncias de posição relativa do escudo. Relativamente à verificação da tensão de contacto entre anéis, deverá ser igualmente feita considerando desalinhamentos entre as aduelas, em conformidade com as tolerâncias de montagem.



Figura 6 – Instalação pelo escudo

2.2.2. Comportamento a longo prazo

A análise dos casos de carga nesta fase é normalmente feita recorrendo ao método dos elementos finitos, com a simulação da não linearidade do comportamento, quer do betão como do solo. Os

resultados permitem verificar as deformações do maciço e do revestimento, bem como definir as solicitações no revestimento.

2.3. BRF em aduelas

O betão de resistência elevada é o material estrutural ideal para aplicações ao nível de revestimento de túneis. A espessura do revestimento é reduzida e, se for estruturalmente possível, a substituição da armadura convencional por fibras de aço poderá levar a uma simplificação do processo de produção dos elementos pré-fabricados. As armaduras são relativamente morosas de preparar e montar e necessitam de algum espaço de armazenamento na fábrica de pré-fabricação das aduelas. As armaduras necessitam de ser levantadas, introduzidas no molde e ajustada a sua posição. Estes passos desaparecem caso seja possível substituir a armadura convencional por fibras de aço, o que levará, eventualmente, a um redução nos custos de produção (Kooiman et al., 1999; Ramos et al., 2003; Suter, 2004).

Contudo, numa primeira fase, à adição de fibras de aço era somente atribuído o papel de melhoria do comportamento do betão perante possíveis impactos durante a manipulação e colocação das aduelas. No entanto, a investigação que tem sido desenvolvida ao nível do betão reforçado com fibras de aço (BRFA) tem demonstrado que a adição de fibras de aço aumenta significativamente a resistência ao corte e à flexão de peças de betão, especialmente no caso do betão de elevada resistência, desde que as fibras tenham as propriedades materiais e geométricas adequadas.

As experiências ocorridas noutros países (Tabela 2) demonstram ser possível utilizar fibras de aço como único elemento de reforço, sendo este suficiente para cumprir os requisitos exigidos a certos tipos de estruturas. Actualmente são, contudo, consideradas várias possibilidades de reforço estrutural do betão nas aduelas, nomeadamente: utilização única de armadura convencional; aplicação única de fibras de aço; utilização conjunta de armadura convencional e fibras de aço. Das alternativas apresentadas, deve ser escolhida a que proporcionar melhor desempenho, configurando a solução mais competitiva.

A utilização de fibras metálicas leva a algumas vantagens e inconvenientes, que seguidamente de descrevem. Comparativamente às aplicações mais convencionais de betões reforçados com fibras de aço, como em pavimentos industriais, a quantidade de fibras a utilizar em betões destinados a revestimento de túneis é superior, especialmente no caso de não existir qualquer armadura

convencional. O factor económico poderá ser preponderante. Relativamente à resistência ao impacto, a adição de fibras apresenta benefícios que podem ser significativos.

Tabela 2 – Utilização de fibras metálicas em aduelas

Túnel	Diâmetro	Tipo de fibras	Quantidade de fibras	Comprimento do tramo
Metro de Essen (Alemanha)	7.2 m (interno)	50 x 0.6 mm	50 kg/m ³	n/d
Heinenoord 2 (Holanda)	7.6 m (interno)	60 x 0.75 mm	60 kg/m ³	24 m
Oenzberg (Suíça)	11.5 m (externo)	60 x 0.92 mm	60 kg/m ³	200 m
Metro de Paris (França)	7.5 m	30 x 0.50 mm	60 kg/m ³	n/d
Linha 1 do Metro de Nápoles (Itália)	5.8 m (interno)	60 x 0.80 mm	40 kg/m ³	n/d
Transvase Manabi (Equador)	3.5 m	60 x 0.75 mm	30 kg/m ³	15 km
Channel Tunnel Rail Link (Londres)	7.15 m (interno)	50 x 1 mm	33 kg/m ³	40 km

O ciclo de vida dos segmentos pré-fabricados passa por quatro fases, nomeadamente: produção, transporte, instalação e serviço. Em alguns dos segmentos surge um destacamento da superfície, devido a impactos que acontecem durante as três primeiras fases. Neste sentido, a armadura ficará exposta ao meio ambiente, o que levará a um início precoce do processo de corrosão. Assim, é clara a vantagem da utilização das fibras de aço, dado que estas estarão presentes em todo o volume do betão, resultando num aumento da resistência ao impacto. Consequentemente, a utilização de fibras de aço irá reduzir o número de segmentos que se destacam do elemento estrutural.

Se a composição do betão não for concebida tendo em conta a presença das fibras, a trabalhabilidade do BRF é inferior à do correspondente betão simples. Assim, é necessário que o método de composição atenda à quantidade e ao tipo de fibras a utilizar. Outro aspecto que deve ser tido em conta é a grande influência que o processo produtivo tem na distribuição e orientação das fibras, pelo que este deverá ser estabelecido de forma a ser garantida a maior homogeneidade possível na distribuição das fibras no volume de betão.

As fibras de aço próximas da superfície exterior do elemento estrutural estão normalmente expostas à humidade, podendo ficar sujeitas ao processo de corrosão. Contudo, isto não irá originar uma corrosão contínua de todo o reforço, pois cada fibra está individualmente rodeada pela matriz cimentícia e, por este facto, encontra-se protegida pelo betão. Assim, a corrosão das fibras não irá causar o “descascar” da superfície do betão. O único aspecto negativo que poderá surgir devido à corrosão das fibras metálicas é o surgimento de alguns pontos de oxidação na superfície do betão.

2.4. Propriedades térmicas do BRF a altas temperaturas

Para o estudo do comportamento do BRF sob elevadas temperaturas e para desenvolver métodos de previsão da resistência ao fogo, é necessário conhecer as propriedades térmicas, nomeadamente, condutividade térmica, calor específico, dilatação térmica e perda de massa, a diferentes temperaturas.

2.4.1. Condutividade térmica

Condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que define a facilidade destes em conduzir calor, e define-se como a quantidade de calor transmitida através de uma determinada espessura do material, numa direcção normal à superfície, devido a um gradiente térmico, sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas do gradiente de temperatura. Assim, a condutividade térmica de um dado material é a relação entre o fluxo de aquecimento e o gradiente térmico. A quantidade de água no betão, a densidade deste e a temperatura influenciam significativamente esta propriedade.

A condutividade térmica do BRF para dois tipos de agregados é apresentada na Figura 7. A referida propriedade apresenta-se quase constante na amplitude de temperatura entre os 400 e os 1000 °C. Esta característica é atribuída à presença de fibras de aço, que evita o surgimento de fendas e a sua propagação e, assim, diminui a taxa de transferência de calor no provete. A mesma figura permite concluir que a condutividade térmica de BRF com agregados de rocha granítica é maior do que no caso de BRF com agregados de rocha calcária, para temperaturas variando de 20 °C a 1000 °C. O efeito das fibras na condutividade térmica de um material de matriz cimentícia é irrelevante (Kodur e Sultan, 2003). Baseados nos resultados experimentais, Kodur e Sultan apresentam expressões simplificadas que, por intermédio da resolução das mesmas, obtém-se a condutividade térmica, k ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$), em função da temperatura, T (°C), ver Tabela 3.

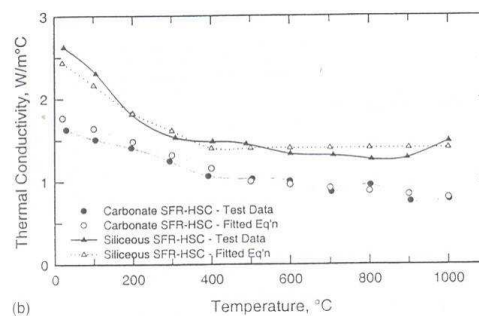


Figura 7 – Condutividade térmica (Kodur e Sultan, 2003)

Tabela 3 – Expressões simplificadas para o cálculo da condutividade térmica (Kodur e Sultan, 2003)

	Agregados de rocha granítica
$0 \leq T \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$	$k = 2.50 - 0.0034 \cdot T$
$200 < T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$k = 2.24 - 0.0021 \cdot T$
$400 < T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$k = 1.40$
	Agregados de rocha calcária
$0 \leq T \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$k = 1.80 - 0.0016 \cdot T$
$500 < T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$k = 1.20 - 0.0004 \cdot T$

2.4.2. Calor específico

Calor específico ou capacidade térmica do betão é a energia calorífica requerida para que um meio com uma unidade de peso aumente em uma unidade de temperatura. A energia calorífica (ou calor) é uma forma de energia que é directamente transferida de um corpo mais quente para um mais frio. Portanto, calor é transferência de energia calorífica de um corpo para o outro.

O calor específico de BRF para dois tipos de agregados é apresentado na Figura 8. O tipo de agregado influencia significativamente o calor específico do BRF a altas temperaturas. Da análise da Figura 8 verifica-se que, no betão constituído por agregados de calcário, o calor específico aumenta significativamente entre os 600 °C e os 850 °C, alcançando um valor máximo que é aproximadamente 10 vezes superior ao registado no BRF com agregados de rocha granítica.

A presença de fibras metálicas aumenta ligeiramente o calor específico do BRF entre os 0 e os 600 °C. Atribui-se este efeito ao facto da presença das fibras metálicas no betão diminuírem a fissuração e a sua progressão a baixas temperaturas. Contudo, assume-se a que a influência das fibras metálicas é reduzida. Baseados nos resultados experimentais, Kodur e Sultan apresentam expressões simplificadas que, por meio da resolução das mesmas, é possível obter o calor específico, c_c , em função da temperatura, T (Tabela 4), sendo ρ_c a densidade do betão.

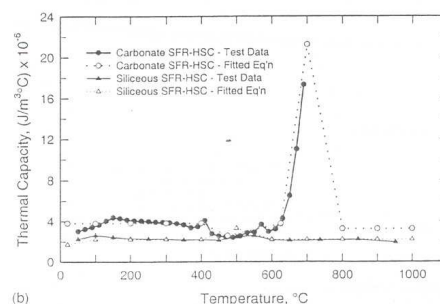


Figura 8 – Calor específico (Kodur e Sultan, 2003)

Tabela 4 – Expressões simplificadas para o cálculo do calor específico (Kodur e Sultan, 2003)

Agregados de rocha granítica	
$0 \leq T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (0.006 \cdot T + 1.60) \cdot 10^6$
$100 < T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = 2.20 \cdot 10^6$
$400 < T \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (0.011 \cdot T - 2.20) \cdot 10^6$
$500 < T \leq 600 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (-0.011 \cdot T + 8.80) \cdot 10^6$
$600 < T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = 2.20 \cdot 10^6$
Agregados de rocha calcária	
$0 \leq T \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = 3.81 \cdot 10^6$
$400 < T \leq 475 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (-0.0165 \cdot T + 10.41) \cdot 10^6$
$475 < T \leq 625 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (0.0079 \cdot T - 1.182) \cdot 10^6$
$625 < T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (0.02333 \cdot T - 142.06) \cdot 10^6$
$700 < T \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = (-0.1800 \cdot T + 147.25) \cdot 10^6$
$800 < T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c \cdot c_c = 3.25 \cdot 10^6$

2.4.3. Dilatação térmica

O coeficiente de dilatação térmica do betão pode ser definido como a variação da dimensão linear por unidade de comprimento dividida pela variação de temperatura. Para temperaturas entre os 20 e os 800 °C, a dilatação térmica do BRF com agregados de rocha granítica é superior à do BRF com agregados de rocha calcária. A dilatação térmica não é significativamente afectada pela presença de fibras metálicas. A relação entre a dilatação térmica do BRF e a temperatura, para dois tipos de agregados, é apresentada na Figura 9.

O tipo de agregado apresenta uma influência significativa na dilatação térmica. Para o BRF com agregados de rocha granítica, a dilatação térmica aumenta com a temperatura até cerca dos 700 °C, permanecendo depois constante. A dilatação térmica do BRF constituído por agregados de rocha calcária aumenta de forma gradual até aos 500 °C. Até aos 800 °C o BRF apresenta dilatação térmica similar à do betão comum. Acima deste valor, a dilatação térmica é superior, factor atribuído à presença das fibras metálicas, que continuam a dilatar.

Baseados nos resultados experimentais, Kodur e Sultan apresentam expressões simplificadas que, através da resolução das mesmas, é possível obter o coeficiente de dilatação térmica, α , em função da temperatura, T (Tabela 5).

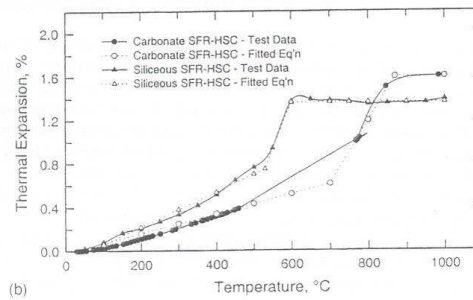


Figura 9 – Dilatação térmica (Kodur e Sultan, 2003)

Tabela 5 – Expressões simplificadas para o cálculo do coeficiente de dilatação térmica (Kodur e Sultan, 2003)

$0 \leq T \leq 530 \text{ } ^\circ\text{C}$	Agregados de rocha granítica
$530 < T \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\alpha = -0.0010 + 0.000016 \cdot T$
$400 < T \leq 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\alpha = -0.0386 + 0.000087 \cdot T$
	$\alpha = 0.0136$
$0 \leq T \leq 700 \text{ } ^\circ\text{C}$	Agregados de rocha calcária
$700 < T \leq 870 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\alpha = -0.0002 + 0.000009 \cdot T$
$870 < T \leq 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\alpha = -0.0345 + 0.000058 \cdot T$
	$\alpha = 0.0160$

2.4.4. Perda de massa

A perda de massa do betão é influenciada pelo tipo de inertes que o constitui, dado que depende da maior ou menor capacidade de absorção de água destes. Entre os 0 °C e os 800 °C, a perda de massa para o BRF é similar à verificada para o betão sem adição de fibras. A perda de massa relativa do BRF para dois tipos de agregados é apresentada na Figura 10, em função da temperatura.

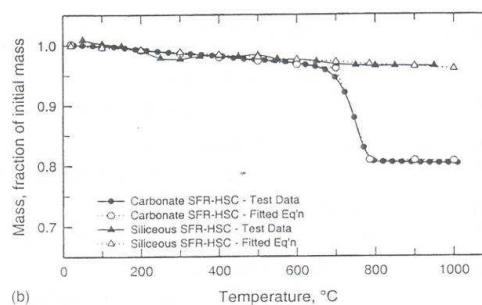


Figura 10 – Perda de massa relativa (Kodur e Sultan, 2003)

Baseados nos resultados experimentais, Kodur e Sultan apresentam expressões simplificadas que, por intermédio da resolução das mesmas, obtém-se a perda de massa relativa, M/M_0 , em função da temperatura, T (Tabela 6), sendo M a massa do provete à temperatura T e M_0 a massa inicial.

Tabela 6 – Expressões simplificadas para o cálculo da perda de massa relativa (Kodur e Sultan, 2003)

	Agregados de rocha granítica
$0 \leq T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$M/M_0 = 1.000 - 0.00004 \cdot T$
	Agregados de rocha calcária
$0 \leq T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$	$M/M_0 = 1.003 - 0.00006 \cdot T$
$700 < T \leq 785 \text{ }^\circ\text{C}$	$M/M_0 = 2.214 - 0.00179 \cdot T$
$785 < T \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$	$M/M_0 = 0.817 - 0.00001 \cdot T$

2.5. Comportamento do betão sob a acção do fogo

A acção do fogo em elementos de betão provoca vários tipos de degradação das suas propriedades.

2.5.1. Spalling

Spalling define-se como o destacar da superfície do betão devido à acção do fogo ou de temperaturas elevadas, tanto de forma explosiva como através da deterioração da matriz cimentícia (Hertz, 2003). Admite-se que a existência do *spalling* deve-se a duas diferentes causas: aumento de pressão dos poros existentes na micro-estrutura do betão, em resultado da evaporação da água livre; expansão térmica dos agregados.

Com o aumento da temperatura ambiente, a água livre ou absorvida, no interior do betão, tende a evaporar. Contudo, em betões de resistência elevada, esta evaporação é impedida pela baixa permeabilidade do betão, fazendo com que se alcancem pressões elevadas no interior do mesmo. Nas situações onde o aumento da temperatura é tal que a saída do vapor de água não é conseguida de forma suficiente, a pressão dos poros aumenta de forma significativa. Com o aumento da temperatura, a pressão no interior do betão pode exceder a tensão de rotura por tracção da matriz cimentícia. Este fenómeno poderá resultar num destacar do betão, de forma explosiva. Assim, quanto menor for a permeabilidade do betão, ou a sua relação água/cimento, maior será a sua susceptibilidade à ocorrência de *spalling*. Como será exposto na secção 2.5.5., a inclusão de fibras de polipropileno no betão de elevada resistência aumenta a permeabilidade deste quando aquecido, reduzindo, de forma significativa, a ocorrência de *spalling*.

Outro factor causador do *spalling* é a expansão térmica dos agregados no interior do betão. O betão é composto por aproximadamente 70% de agregados e de 30% da pasta de cimento hidratado. A pasta cimentícia retrai durante o aquecimento, enquanto que os agregados expandem, provocando uma degradação no interior do betão e um destacar gradativo da superfície do betão.

2.5.2. Desidratação da pasta cimentícia

A desidratação do betão ocorre a menores temperaturas relativamente às requeridas para a existência de um *spalling* explosivo. Além da água perdida por secagem, surge também a humidade proveniente da desidratação da pasta. Aos 300 °C, a interligação entre C-S-H e a água começa a ser perdida. Com o aumento da temperatura, o hidróxido de cálcio existente na pasta cimentícia é convertido em óxido de cálcio e água, a qual evapora, resultando uma pasta mais frágil. Aos 900 °C, a estrutura C-S-H é completamente decomposta.

2.5.3. Perda de resistência

As elevadas temperaturas afectam severamente a resistência do betão (Moreno e Bizzo, 2004). No mesmo sentido, a alteração do módulo de elasticidade, E , em função do tempo e da temperatura são igualmente significativas. Aliás, a inspecção de estruturas após a actuação de um fogo passa muitas vezes pela análise da redução do módulo de elasticidade. Estas alterações podem ser directamente atribuídas ao aumento do dano por micro-fissuração nas zonas de transição entre a pasta e os agregados, contribuindo, para tal, a retracção motivada pelas temperaturas elevadas. A presença de fibras metálicas no betão não influencia, de forma significativa, a perda de resistência ocorrida pela exposição a elevadas temperaturas (Giaccio e Zerbino, 2005).

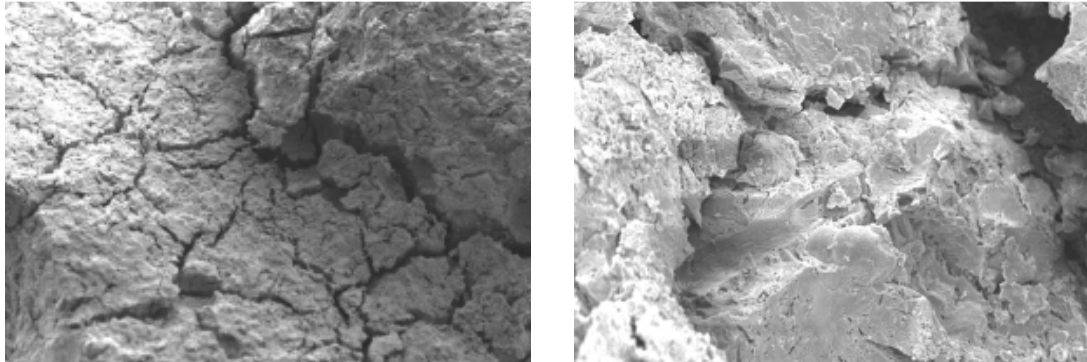
2.5.4. Alterações de coloração

Outro campo de investigação na área do fogo é a variação de cor do betão em função do aquecimento. Numa análise estrutural pós-fogo, a observação deste factor poderá dar importantes informações acerca da temperatura máxima ocorrida num incêndio. É identificada uma tonalidade rosada a cerca dos 250 °C. A coloração rosada altera-se para um laranja “tijolo” a cerca dos 600 °C. A temperaturas superiores surge uma alteração de laranja “tijolo” para cinzento, reportada entre os 600 °C e os 900 °C. Acima dos 900 °C, a cor do betão é amorfa.

2.5.5. Uso de fibras orgânicas/sintéticas

As fibras não metálicas (orgânicas ou sintéticas), em particular as fibras de polipropileno, podem, na maioria dos casos, reduzir de forma eficiente a ocorrência do *spalling* (Figura 11). Com o aquecimento do betão, as fibras de polipropileno derretem (cerca dos 170 °C), formando micro-canais no seio do betão (Georgali e Tsakiridis, 2005). Estes micro-canais irão permitir a evacuação

do vapor de água nos primeiros momentos do aquecimento, reduzindo o risco de *spalling*, de forma significativa (Kützing, 1999; Kalifa, 2001; Collignon, 2005; Mahasneh, 2005). Aumentando a quantidade de fibras no betão, o número de canais e poros irá também aumentar (Bilodeau, 2004).



a) Sem fibras

b) Com fibras de polipropileno

Figura 11 – Micrographs

2.6. Cenários de fogo normalizados

As características de um incêndio variam consideravelmente de caso para caso: a resposta estrutural depende da natureza do fogo. Contudo, de forma a uniformizar as investigações experimentais, surgiram curvas temperatura-tempo no sentido de simular o efeito do fogo à superfície da estrutura. Estas curvas são estabelecidas com base em fogos reais e são divididas em três categorias, dependendo da sua aplicação (edifícios, indústrias petro-químicas e túneis). Na Figura 12 apresentam-se as curvas mais utilizadas.

As curvas existentes são distintas, quer ao nível da taxa de aquecimento, da temperatura máxima, duração do tempo de ensaio e eventual existência de ramo de arrefecimento.

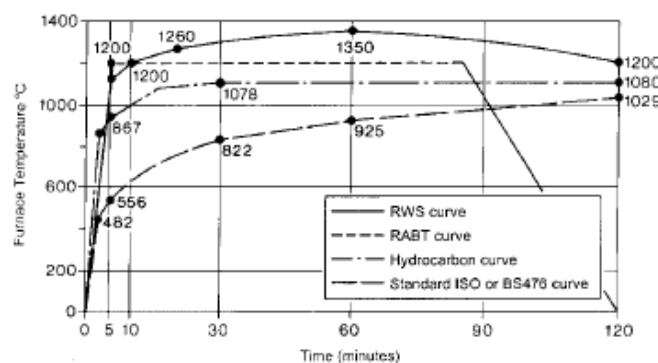


Figura 12 – Curvas temperatura-tempo

2.6.1. Edifícios

Os fogos em edifícios têm origem, tipicamente, em materiais como a madeira ou o papel. Para este tipo de fogos, a curva indicada é a ISO 834 (ou BS 476). Na curva referida, a temperatura aumenta dos 20 °C aos 842 °C após os primeiros 30 minutos (equivalente a uma taxa de aquecimento de 27.4 °C/min. Após esta altura, surge um ligeiro aumento até aos 1000 °C, num período de 120 min. Esta curva não inclui um ramo de arrefecimento. A elevação da temperatura ocorre de acordo com a Equação (1), onde t representa o tempo (minutos), T_0 a temperatura inicial (°C) e T a temperatura no instante t (°C).

$$T - T_0 = 345 \cdot \log(8t + 1) \quad 1)$$

Esta curva normalizada corresponde a um cenário de fogo severo. Contudo, não representa o cenário mais severo possível.

2.6.2. Indústrias petro-químicas

Na década de 1970, a Móbil, por intermédio da análise de vários fogos com origem em hidrocarbonetos, desenvolveu uma nova curva temperatura-tempo com um rápido aumento de temperatura nos primeiros 5 minutos do fogo até aos 900 °C (isto é, uma taxa de aquecimento de 176 °C/min), com um pico final nos 1100 °C. Este tipo de fogos tem origem normalmente em produtos petro-químicos.

2.6.3. Túneis

Mais recentemente, com a ocorrência de grandes fogos em túneis (Figura 13), admitiu-se a necessidade do estabelecimento de cenários de fogo mais severos. Surgiram, assim, duas novas curvas: a RWS e a RBT.

A curva RWS simula um fogo severo com origem em hidrocarbonetos, com um rápido acréscimo da temperatura até aos 1200 °C, com um pico nos 1350 °C depois de 60 minutos, diminuindo gradualmente até aos 1200 °C em 120 minutos. Esta curva tem como objectivo simular a energia libertada por um incêndio originado por contentores com combustíveis, em túneis, cujo valor se estima em 300 MW, num período de tempo de 2 horas. Contudo, as temperaturas máximas

atingidas durante os mais recentes fogos não atingiram os níveis da RWS. Neste sentido, a curva RWS apresenta-se como a solicitação por fogo mais severa em termos de aumento de temperatura inicial e temperatura máxima.

Por sua vez, a curva RBT representa um incêndio menos severo, alcançando a temperatura máxima de 1200 °C, durante uma hora, antes de arrefecer até à temperatura ambiente.



Figura 13 – Fogo em túneis

2.7. Classificação dos materiais (resistência ao fogo)

A avaliação e classificação da resistência ao fogo dos materiais podem ser efectuadas por métodos experimentais, prescritivos e/ou métodos baseados na performance.

2.7.1. Métodos experimentais

O ensaio experimental constituído pela actuação de um fogo, segundo uma curva standard temperatura-tempo (por exemplo, a ISO 834), sobre um elemento estrutural é o método mais dispendioso das três opções, particularmente para estruturas de grande dimensão. A qualquer elemento com características similares de construção, classe de resistência, e condições de suporte idênticas a um outro ensaiado experimentalmente, atribui-se as mesmas características de resistência ao fogo.

Os ensaios experimentais normalizados são usualmente efectuados em elementos estruturais independentes onde não é possível reproduzir a natureza e a magnitude das condições fronteira do elemento na situação real. Em alguns casos, a performance ao fogo dos elementos estruturais poderá ser muito diferente da de um simples elemento ensaiado experimentalmente. A preparação de um ensaio deste tipo é demorada, com custos relativamente elevados. Neste sentido, o ensaio de uma estrutura completa é uma situação limite.

2.7.2. Métodos prescritivos

O corrente dimensionamento ao fogo é largamente baseado na aplicação de métodos prescritivos onde o dimensionamento do projectista é feito com base em requerimentos pré-determinados, baseados em ocupações genéricas ou classes de riscos de incêndio. Os regulamentos prescritivos são rígidos e restritivos. Embora apresentem custos reduzidos, são os menos precisos de todos os métodos. O nível de segurança e confiança obtidos através da implementação deste tipo de métodos varia de forma significativa. Na maioria das vezes levam a resultados muito conservativos e economicamente ineficientes. Contudo, podem também levar a dimensionamentos que não estão pelo lado da segurança.

Neste tipo de métodos o projectista, recorrendo a recomendações em vigor, selecciona os requisitos que determinado sistema construtivo deverá ter para manter a sua funcionalidade durante um dado período. Esses períodos poderão ser de: 30, 60, 90 ou 120 min.

2.7.3. Métodos baseados na performance ao fogo

Os actuais softwares, baseados no método dos elementos finitos, podem simular condições estruturais que são difíceis de estudar em ensaios experimentais. Estando o modelo devidamente calibrado com resultados experimentais, esta forma de avaliação do comportamento ao fogo proporciona um dimensionamento eficiente com reduzidos custos, permitindo obter resultados mais rigorosos relativamente aos métodos já referidos. Um dado problema pode ser estudado para diferentes cenários de fogo, geometrias, propriedades dos materiais, solicitações e condições de suporte. Permitem uma melhor compreensão acerca do comportamento da estrutura quando sujeita ao fogo até ao seu eventual colapso.

2.8. Inspeção e avaliação de elementos estruturais afectados pelo fogo

A inspeção e avaliação de estruturas degradadas pela acção do fogo apresentam-se como complexas tarefas para o técnico avaliador. Existe uma ausência generalizada de ferramentas que permitam estimar a resistência dos variados elementos estruturais.

Como referido em pontos anteriores, é frequente a ocorrência de fogos em estruturas de betão, nomeadamente em edifícios, instalações fabris, túneis ou pontes. A determinação da profundidade de betão deteriorado é um dos maiores problemas na avaliação da segurança dos elementos

estruturais afectados pelo fogo. Esta informação é particularmente importante no estabelecimento dos futuros trabalhos de reparação e reforço a efectuar, ou na decisão acerca de uma eventual demolição.

Presentemente, a referida informação pode ser obtida através de uma análise microscópica do betão deteriorado. Contudo, a aplicação do método é relativamente complexa e apresenta algumas limitações na definição da “fronteira” entre o betão deteriorado e o não afectado. Outros métodos têm sido apresentados, baseados, nomeadamente, na determinação da absorção de água pelo betão afectado pelo fogo (Santos et al., 2002) e pela difracção de raios X e ultra sons (Lima et al., 2005).

3. Programa experimental

No presente ponto, expõe-se, em síntese, os resultados principais obtidos durante as várias campanhas experimentais efectuadas.

3.1. Selecção do tipo de fibra não metálica

O presente programa experimental foi efectuado com o intuito de se seleccionar um tipo de fibra não metálica a aplicar no BRF, no sentido de lhe aumentar a resistência ao fogo.

A composição adoptada para o betão é baseada na composição fornecida por uma empresa de pré-fabricação de aduelas para o revestimento de túneis (ver Tabela 7), empresa essa associada ao projecto FICOFIRE. Ressalva-se, contudo, a não utilização da Brita 2 devido às pequenas dimensões dos provetes. O presente programa experimental é constituído por nove séries distintas (*Referência, Ultrafiber, Dramix, Barchip F, AFC, Duomix, Duro-Fibril, Algodão e Polyester*), cada uma com 6 cubos de 100 mm de aresta e 6 vigas de 250 x 50 x 60 mm³ (ver Tabela 8).

Tabela 7 – Composição do betão

Componente	Dosagem adoptada (kg/m ³)
Cimento Tipo 1 42,5 R	380
Brita 2	---
Brita 1	1084
Bago de Arroz	311
Areia	506
Água	197.5
W/C	0.52
Aditivo SIKA HE 200 P	3.8 / 5.7
Fibras não metálicas	2
Fibras de aço	35

Tabela 8 – Séries experimentais

Fibras	Dosagem Recomendada (kg/m ³)	Fibra	
		Diâmetro	Comprimento
Ultrafiber	0.89	16 µm	2.1 mm
Asota AFC	2	45-56 µm	6 mm
Duro-Fibril	n/d		12 mm
Barchip F	9		
Duomix Fire	1,5	18 µm	6 mm
Polyester	n/d		25 mm
Algodão	n/d		25 mm
Dramix (metálicas)	n/d	0.5 mm	30 mm

3.1.1. Procedimento de betonagem

Apresenta-se, seguidamente, o procedimento de betonagem adoptado para a obtenção dos provetes.

1. Pulverizar o recipiente da misturadora com água e incliná-lo para permitir que toda a água drene;
2. Inserir a *Brita 1* e o *Bago de Arroz* no misturador;
3. Distribuir, de forma uniforme, a fibra nos agregados mais grossos (somente no caso das séries *Ultrafiber*, *AFC*, *Duro-Fibril*, *Barchip* e *Duomix Fire*);
4. Inserir 25% da água total da amassadura;
5. Iniciar o misturador;
6. Ao primeiro minuto, com o misturador em funcionamento, adicionar os agregados mais finos e, seguidamente, o *Cimento*;
7. Adicionar 50% da água;
8. Inserir o aditivo de forma uniforme;
9. Com a restante água, lavar o recipiente do aditivo e adicionar à mistura;
10. Misturar por três minutos, aproximadamente;
11. Inserir gradualmente as fibras com o misturador em funcionamento (somente no caso das séries *Algodão*, *Polyester* e *Dramix*);
12. Misturar por mais três minutos, aproximadamente;
13. Desligar o misturador;
14. Encher os moldes até meia altura e vibrar cerca de 7 segundos;
15. Completar o enchimento dos moldes e vibrar novamente cerca de 7 segundos.

Durante o procedimento de betonagem foi clara a aglutinação das fibras de *Algodão* e *Polyester*. A dispersão destas fibras no betão não foi satisfatória.

3.1.2. Ensaios efectuados

Antes da execução dos ensaios, todos os provetes foram pesados e medidos.

Metade dos provetes de cada série (3 vigas e 3 cubos) foram expostos à simulação do efeito do fogo, enquanto que os restantes não sofreram qualquer degradação devida à temperatura. Os provetes expostos à temperatura elevada foram novamente pesados e medidos. Finalmente, todos os provetes cúbicos foram ensaiados à compressão e os provetes “viga” foram ensaiados à flexão (Figura 14).

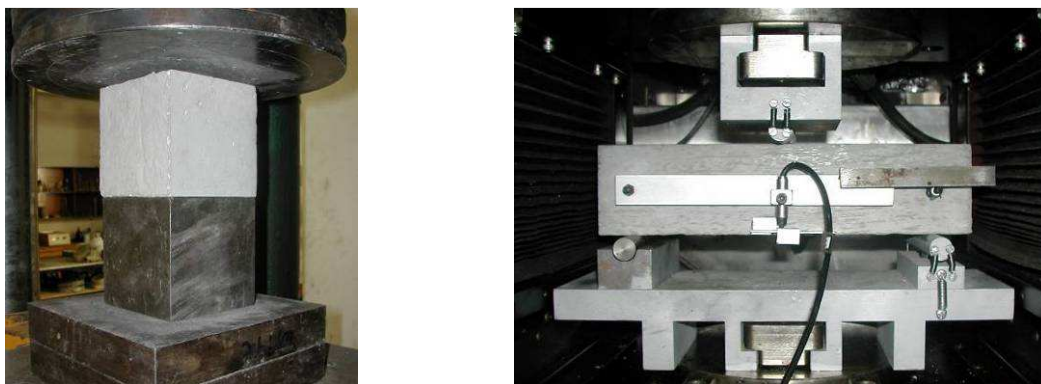


Figura 14 – Ensaios efectuados

3.1.3. Simulação do efeito do fogo

A simulação do efeito do fogo foi efectuada por intermédio da introdução dos provetes numa mufla (Modelo Troxler 4155B), como apresentado na Figura 15. Este equipamento possui uma balança interna que permite obter, por minuto de ensaio, a perda de massa relativa do provete e a temperatura no interior do equipamento.



Figura 15 – Simulação do efeito do fogo

O tempo de ensaio foi de 119 minutos, sendo a temperatura final variável entre os 719 °C e os 805 °C, variação esta provocada por irregularidades de funcionamento do equipamento. Uma curva tipo do acréscimo de temperatura com o tempo é apresentada na Figura 16.

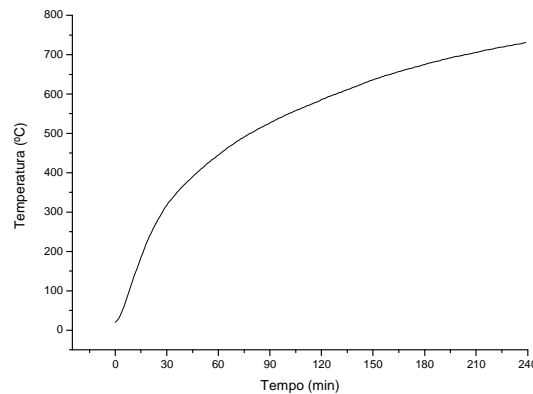


Figura 16 – Aumento da temperatura no interior do equipamento

Com o término do ensaio, a porta do equipamento foi aberta, aguardando-se o arrefecimento do interior do equipamento até, aproximadamente, os 250 °C. Os provetes foram, assim, retirados do interior do equipamento, repetindo-se o processo de pesagem e medição. Por fim, avaliou-se a resistência à compressão e o comportamento à tracção em flexão, conforme o tipo de provete. No momento do ensaio, os provetes cúbicos apresentavam uma temperatura na sua superfície aproximada de 150 °C e os provetes “viga” de 50 °C.

Por cada série de provetes efectuaram-se duas exposições à simulação do efeito do fogo (uma para os três cubos e outra para as três vigas); contudo, por limitações do equipamento, só foi monitorizado o peso de um dos provetes. Todos os provetes foram apoiados em tijolos refractários (ver Figura 17).



Figura 17 – Disposição dos provetes no interior do equipamento

3.1.4. Resultados

O efeito da exposição às elevadas temperaturas, no peso, volume e baridade dos provetes por série está apresentado na Figura 18.

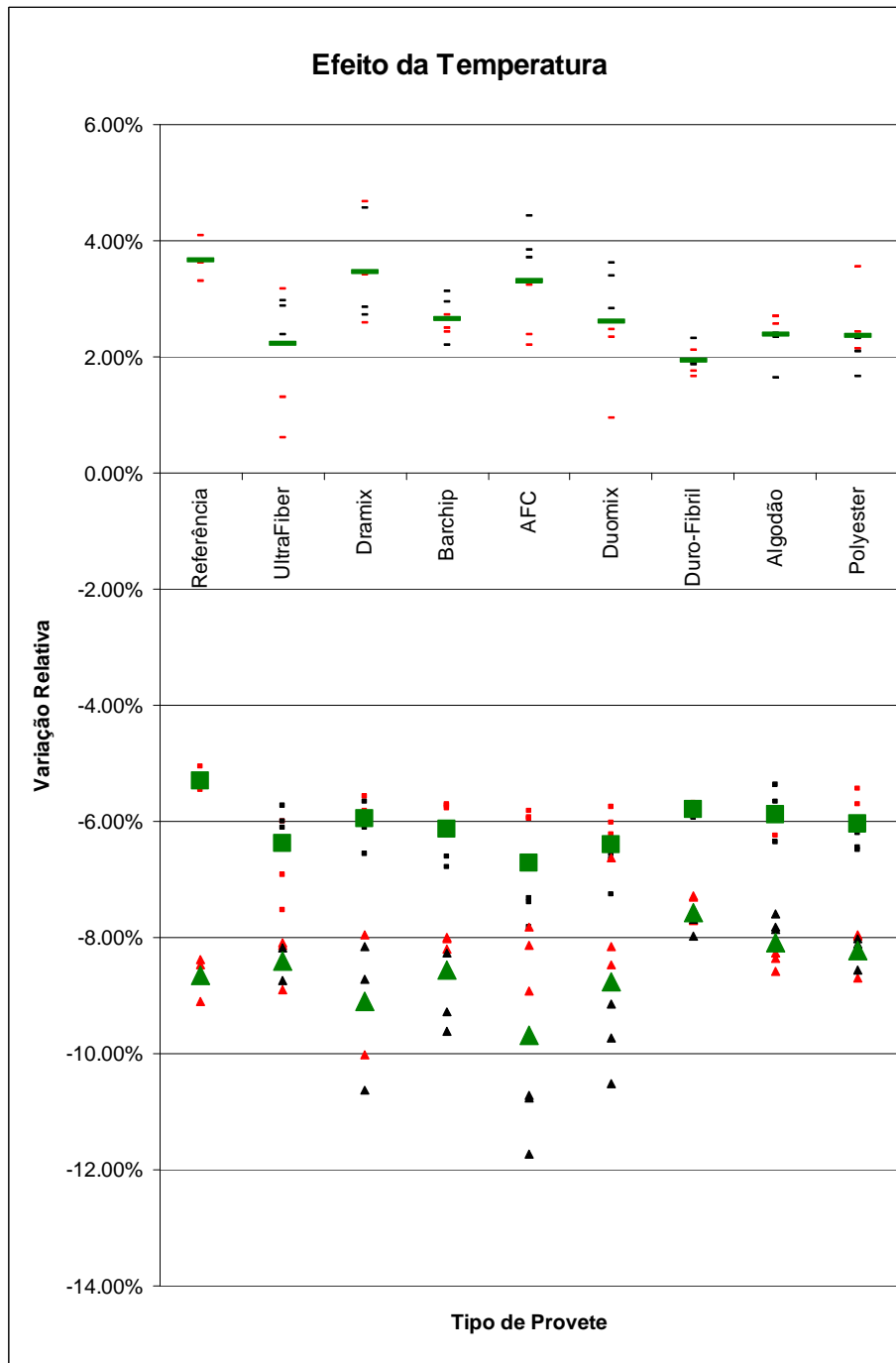


Figura 18 – Efeito da temperatura no peso (quadrados), volume (linhas) e baridade (triângulos) dos provetes (a preto – cubos; a vermelho – vigas)

Nas Figuras seguintes apresentam-se as curvas obtidas relacionando a temperatura com a perda de massa relativa, quer para os provetes “viga” (Figura 19), como para os provetes cúbicos (Figura 20). A inclusão das fibras não metálicas na composição do betão facilita a evaporação da água livre no betão. Os resultados obtidos comprovam esta afirmação, pois nas séries com a inclusão de fibras não metálicas há uma maior perda de massa relativa para uma menor temperatura.

Na Figura 20, a curva relativa à série *Referência* é interrompida pela explosão de um provete cúbico (Figura 21).

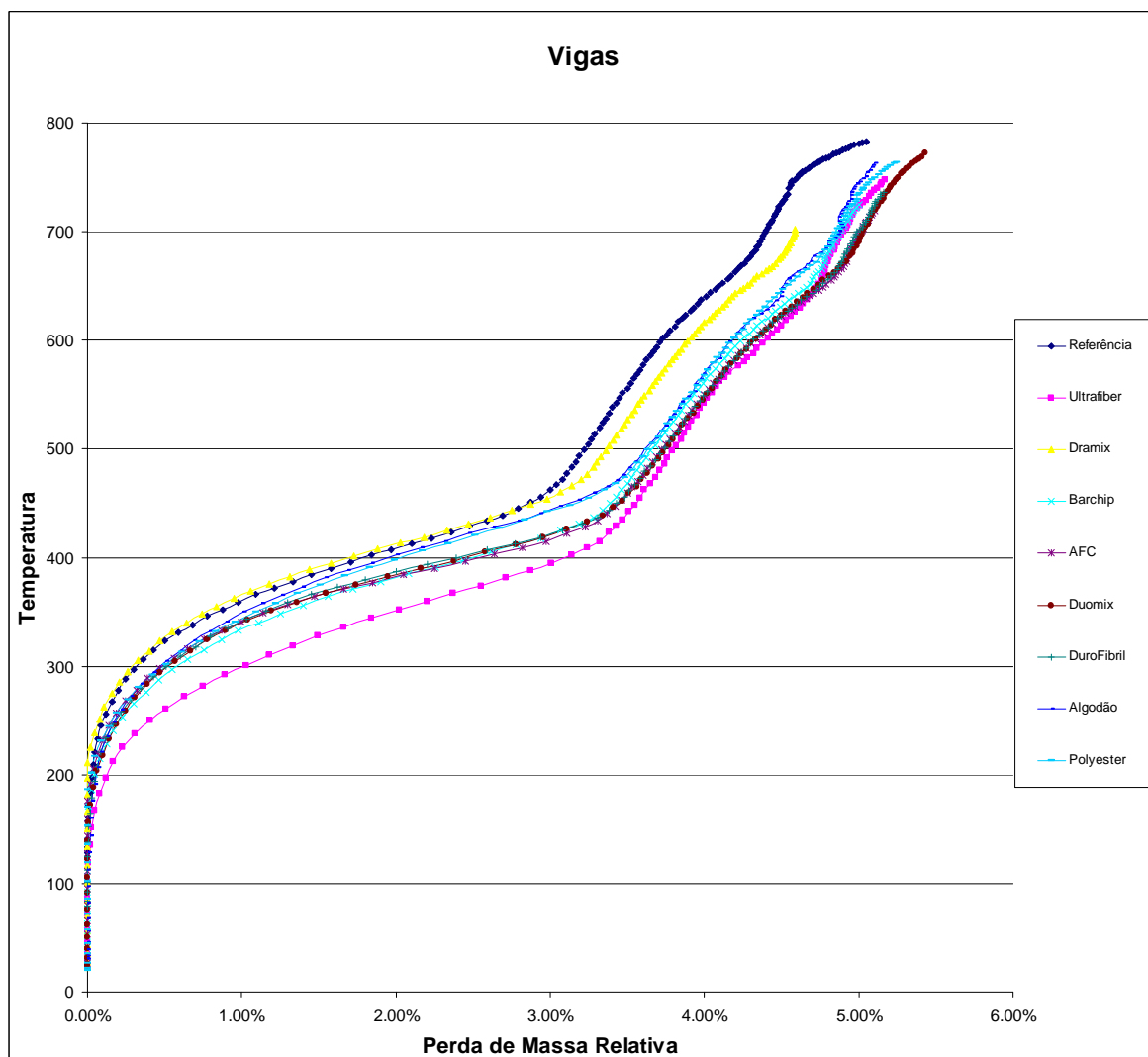


Figura 19 – Curvas temperatura-perda de massa relativa (vigas)

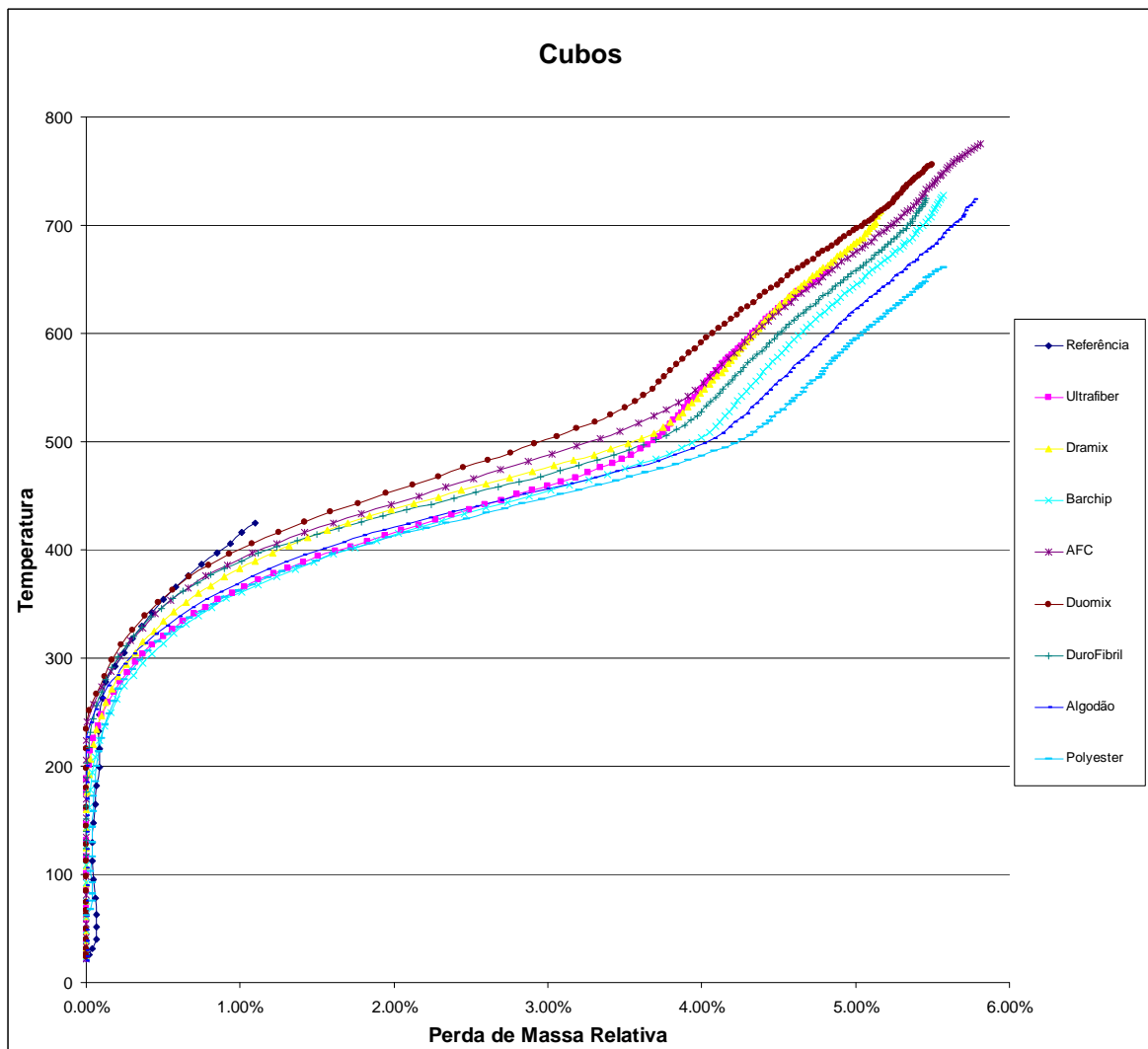


Figura 20 – Curvas temperatura-perda de massa relativa (cubos)



Figura 21 – *Spalling* explosivo ocorrido nos provetes cúbicos da série Referência

A resistência à compressão dos provetes por série está apresentada na Figura 22. A resistência de compressão residual surge na Figura 23. Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estão

apresentados nas Figuras 24 e 25, para os provetes expostos e não expostos ao efeito das temperaturas elevadas.

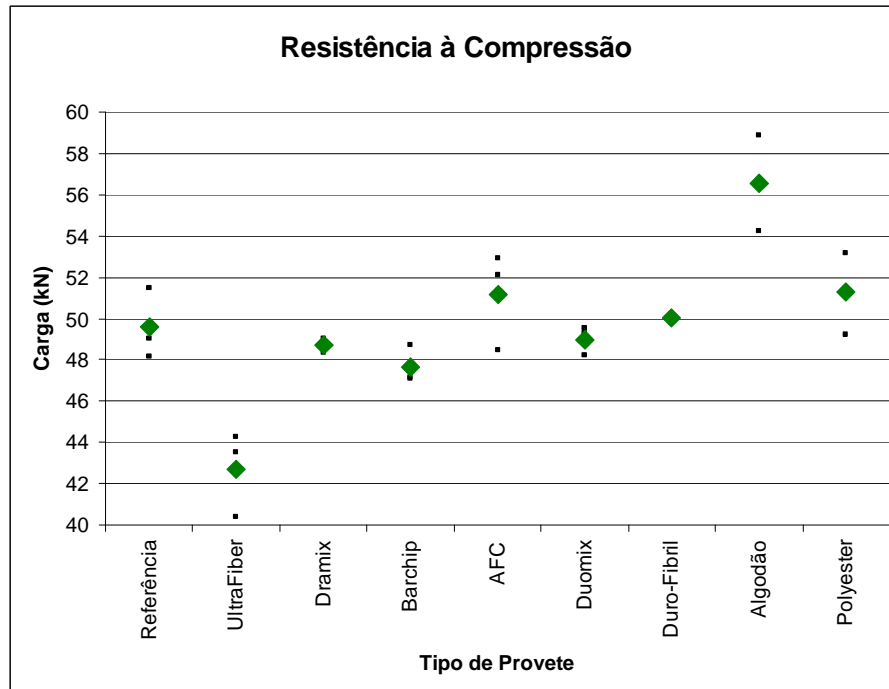


Figura 22 – Resistência à compressão (a preto – provete; a verde – valor médio)

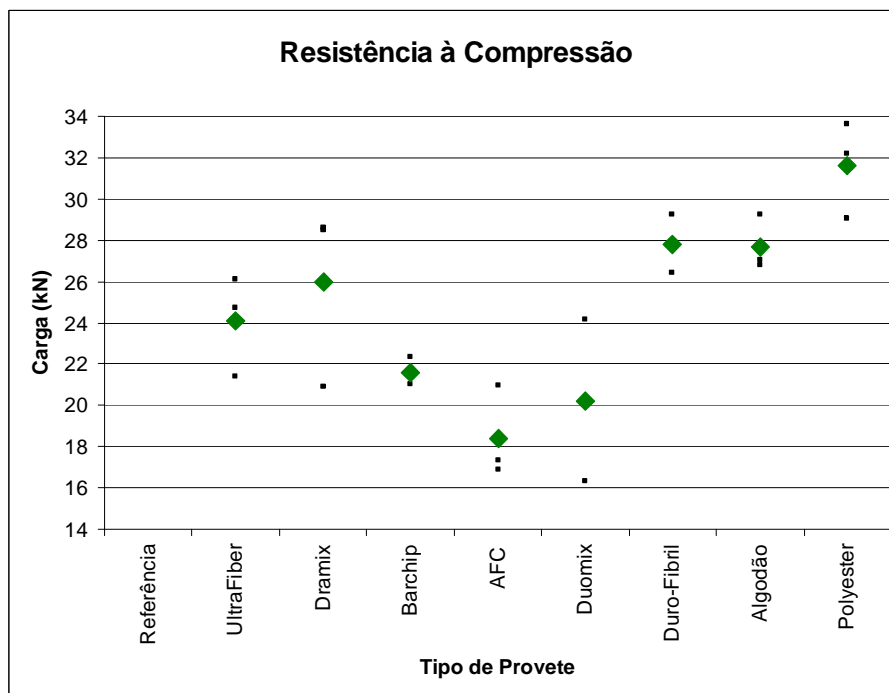


Figura 23 – Resistência à compressão residual (a preto – provete; a verde – valor médio)

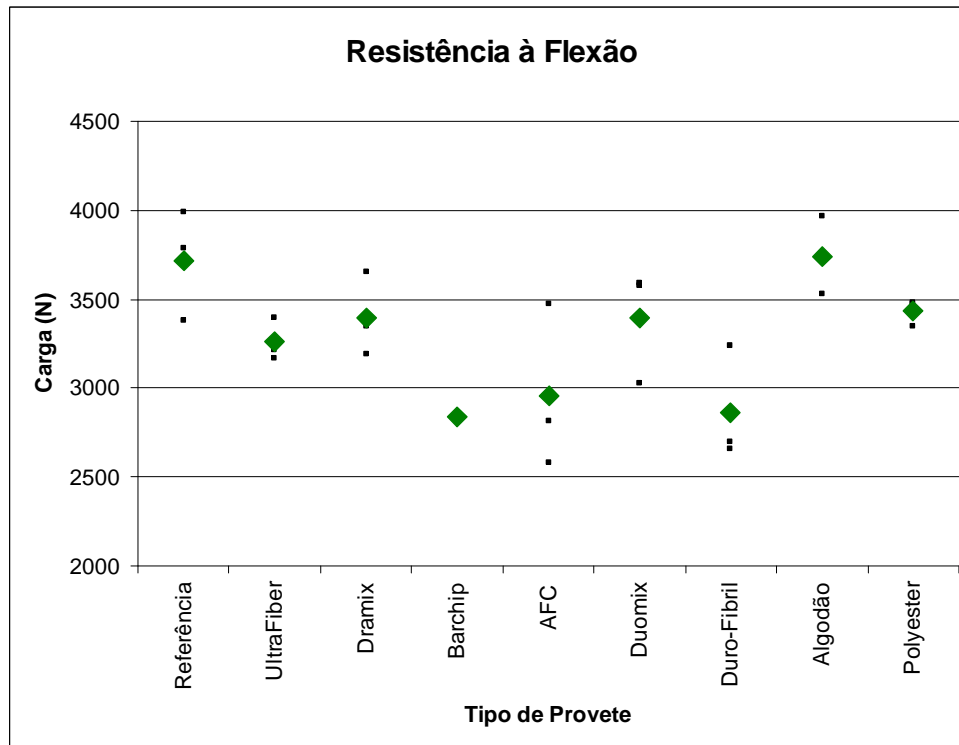


Figura 24 – Resistência à flexão (a preto – provete; a verde – valor médio)

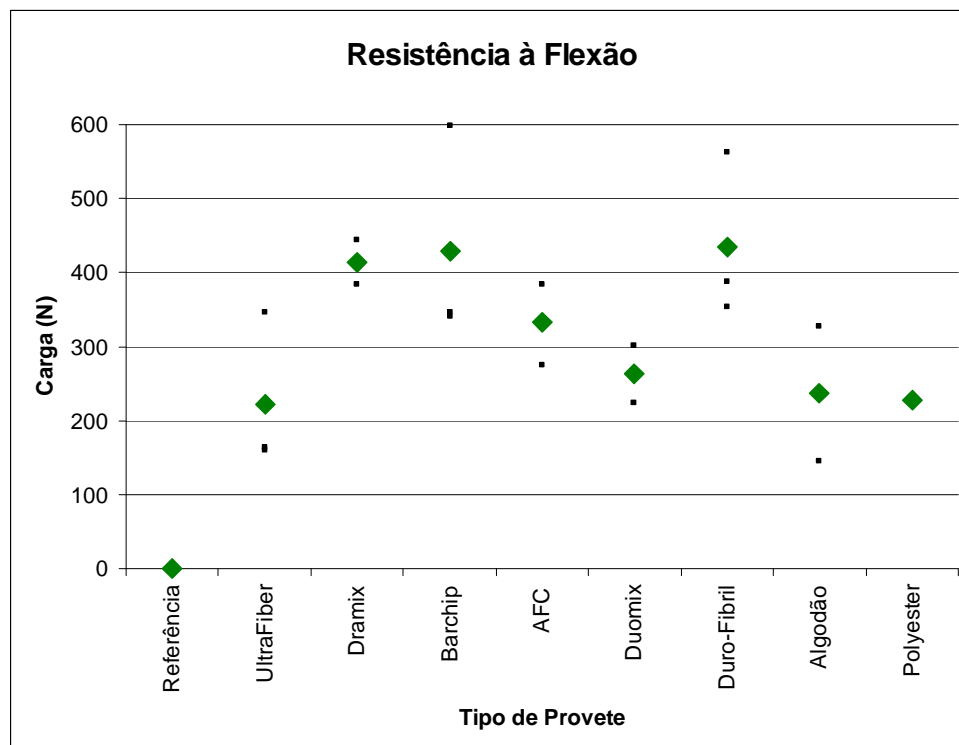


Figura 25 – Resistência à flexão residual (a preto – provete; a verde – valor médio)

3.2. Determinação do tempo necessário para a estabilização da resistência residual de compressão

Em ensaios anteriores foi possível constatar que, após terem sido solicitados a temperaturas elevadas, os provetes de betão sofriam alterações visíveis com o decorrer do tempo. Nas Figuras 26 e 27 são visíveis essas alterações, em provetes de uma campanha experimental anterior. Neste sentido, a análise dos resultados de resistência após a simulação do efeito do fogo deve ser feita com algumas reservas.



Após o ensaio

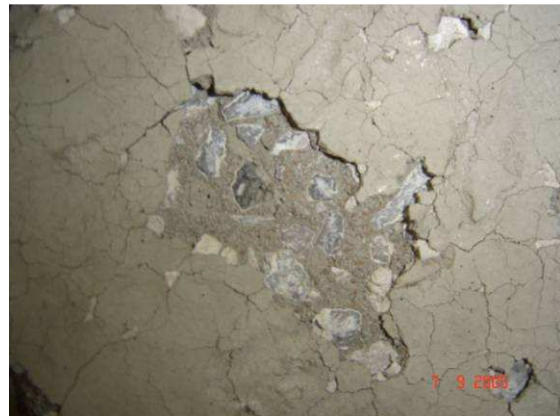


Após 24 horas

Figura 26 – Alterações visíveis após solicitação de temperatura elevada



Logo após a solicitação por temperaturas elevadas



Quatro dias após a solicitação por temperaturas elevadas

Figura 27 – Face do provete cúbico

Neste sentido, surge a necessidade de um estudo acerca da variação de resistência com o tempo, após os provetes terem sido submetidos a temperaturas elevadas. Este estudo permitiu determinar o número de dias necessários para a estabilização da resistência residual à compressão.

Foram moldados 6 provetes cúbicos (50 mm de aresta) de argamassa por série. As três séries efectuadas eram distintas na relação água / cimento (ver Tabela 9).

Tabela 9 – Composição dos provetes

Designação	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Razão a/c
a/c = 0.4	380	506	152	0.4
a/c = 0.5	380	506	190	0.5
a/c = 0.6	380	506	228	0.6

Todos os provetes foram pesados antes e após a exposição à simulação do efeito do fogo, efectuada mediante a introdução de todos os provetes na mufla, referida em 3.1.3.. A temperatura máxima atingida foi de 800 °C, sendo o tempo de exposição de 4 horas. Esta solicitação foi efectuada aos 28 dias de idade dos provetes.

Após a exposição à simulação do efeito do fogo, os provetes foram ensaiados à compressão (Figura 28) em diferentes dias após a solicitação por temperaturas elevadas: 1, 2, 3, 4, 7 e 11 (um por dia). Durante este período de tempo, os provetes permaneceram em sala climatizada.



Figura 28 – Ensaio de compressão

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão referidos estão apresentados nas Figuras 29 e 30.

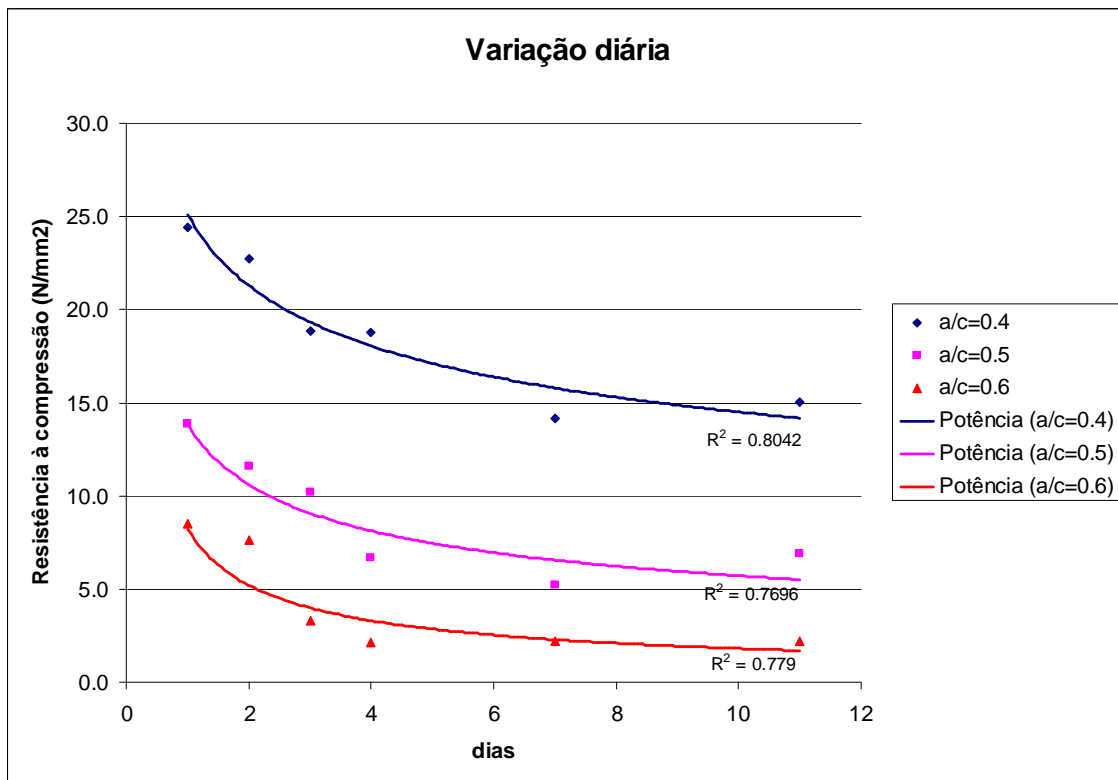


Figura 29 – Variação de resistência à compressão com o tempo

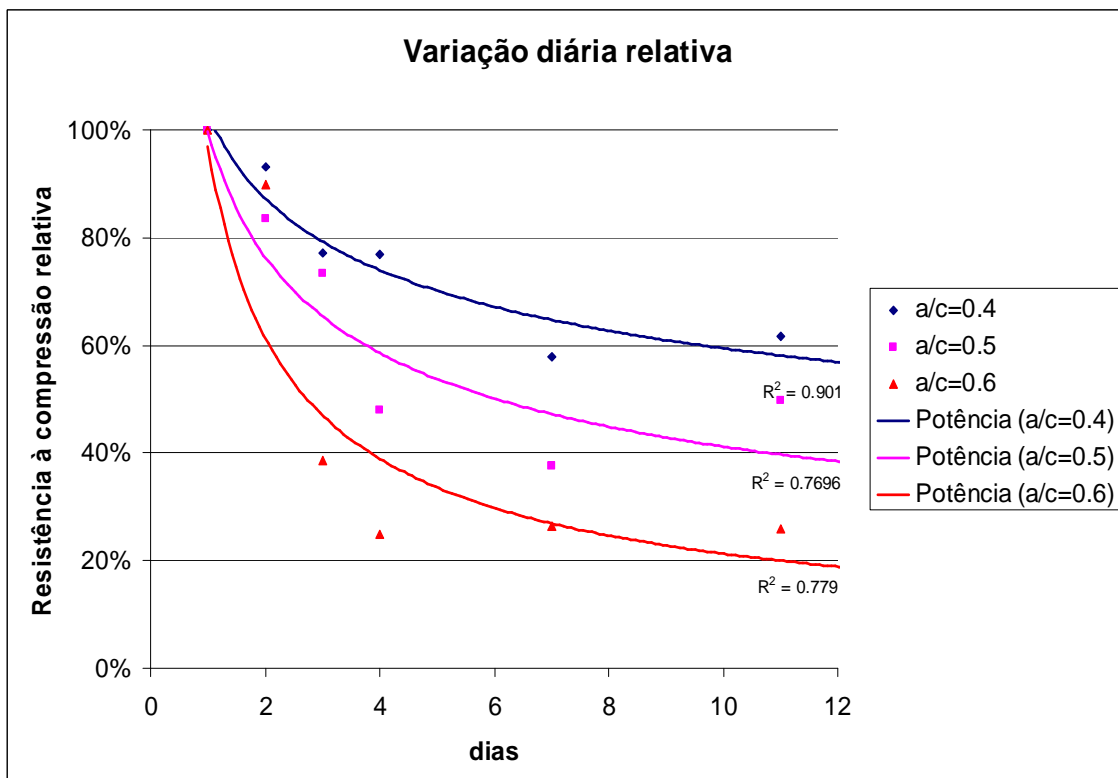


Figura 30 – Variação relativa de resistência à compressão com o tempo

A Figura 31 retrata as faces dos provetes no último dia de ensaio após a exposição às temperaturas elevadas (dia 11). Através de uma análise visual, constata-se que a degradação aumenta com o aumento da relação água cimento, igualmente verificado por intermédio dos resultados obtidos na Figura 30.

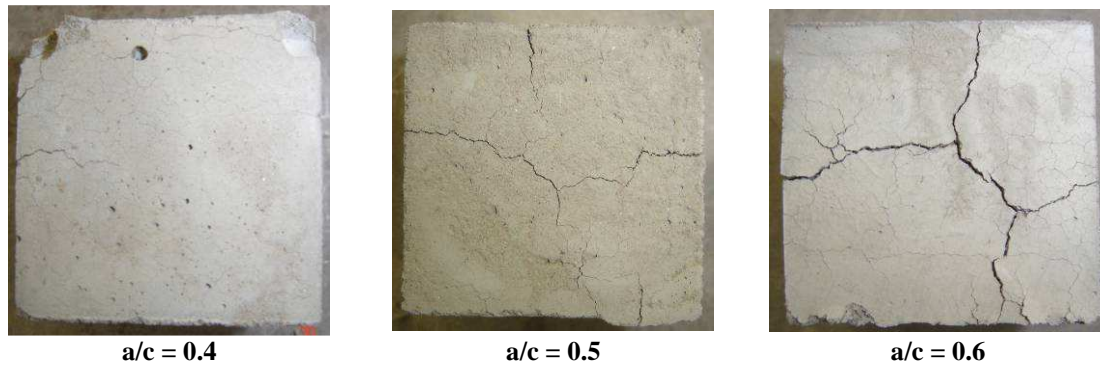


Figura 31 – Face dos provetes (dia 11)

É notório o decréscimo com o tempo da resistência residual à compressão em provetes solicitados por temperaturas elevadas. Este factor não deverá ser negligenciado na análise dos resultados experimentais.

Com base nos resultados experimentais, a estabilização da resistência residual acontece a partir do sétimo dia após a exposição à simulação do efeito do fogo. Neste sentido, em futuros ensaios dever-se-á adoptar um tempo de ensaio superior aos 7 dias (14 dias, por exemplo). A resistência residual de compressão é maior quanto menor for a relação água-cimento e, quanto menor for a relação água cimento menor será a perda de resistência residual de compressão com o tempo.

3.3. Dosagem necessária de fibras de polipropileno

A adição de fibras de polipropileno (PP) no betão de alta resistência é uma das alternativas utilizadas para evitar o *spalling* explosivo quando o betão é exposto a temperaturas elevadas. A referida adição de fibras PP apresenta-se como a solução mais simples, económica e eficiente.

As empresas fornecedoras de fibras de PP para o melhoramento do comportamento ao fogo do betão sugerem determinada dosagem (dependendo da marca, entre 1 a 2.5 kg/m³). Contudo, os valores propostos não estão otimizados para todas as classes de betão; por exemplo, a dosagem de

fibras de PP necessária para evitar o *spalling* do betão aumenta com o aumento da compacidade do betão.

O objectivo principal do presente programa experimental foi abordar a variação do comportamento do betão, solicitado ou não por temperaturas elevadas, com diferentes dosagens de uma mesma fibra de polipropileno. A marca comercial de fibras de polipropileno para melhoramento do comportamento ao fogo adoptada foi a *Duomix Fire*. O preço destas fibras, em Novembro de 2005, era de 4,5€/kg.

3.3.1. Provetes

Por cada série de provetes foram moldados dois cilindros (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura), em moldes metálicos. Com a variação da dosagem de fibras, variou-se também a dosagem do superplastificante, como referido na Tabela 10. Um dos provetes das série foi exposto à simulação do efeito do fogo (temperatura máxima de 700 °C).

Tabela 10 – Séries efectuadas

Designação	Dosagem em fibras de PP (kg/m ³)	Aditivo (%PC)
DUO00	0	1.5
DUO10	1.0	1.5
DUO15	1.5	2.0
DUO20	2.0	2.0
DUO25	2.5	2.0

3.3.2. Ensaios efectuados

No presente programa experimental foram efectuados ensaios com o objectivo de avaliar: a resistência à compressão; a resistência à compressão residual; o módulo de Young; e o módulo de Young residual. Atendendo ao risco de explosão no decorrer da exposição à simulação do efeito do fogo, os provetes foram colocados no interior de uma caixa em aço perfurada (ver Figura 32).



Figura 32 – Aparato de ensaio

3.3.3. Resultados

O ciclo de carga/descarga efectuado para a obtenção do módulo de elasticidade dos provetes está representado na Figura 33, para o caso dos provetes não expostos à simulação do efeito do fogo e, na Figura 34, para os provetes expostos à simulação do efeito do fogo. De referir que, atendendo a limitações do equipamento de ensaio utilizado, não foram efectuados os patamares previstos em 0.5 MPa.

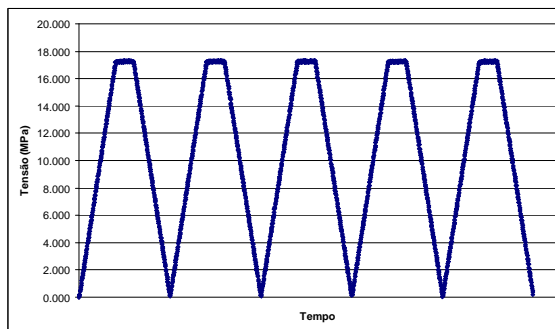


Figura 33 – Determinação do módulo de Young

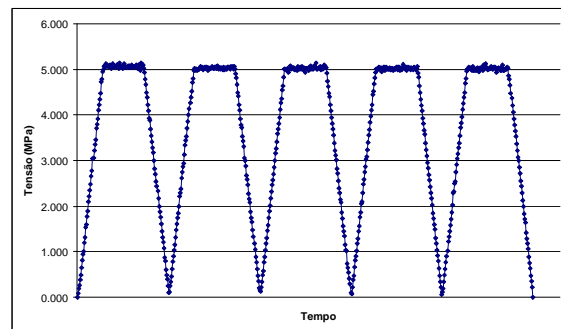


Figura 34 – Determinação do módulo de Young residual

Através dos resultados obtidos para a fase de carregamento (ver Figuras 35 e 37), obtiveram-se as equações das rectas equivalentes (ver Figuras 36 e 38). O valor adoptado para o módulo de Young foi o declive obtido para o quinto carregamento.

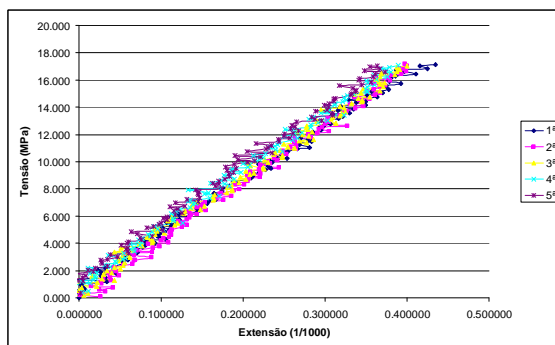


Figura 35 – Determinação do módulo de Young (carregamento para o DUO00)

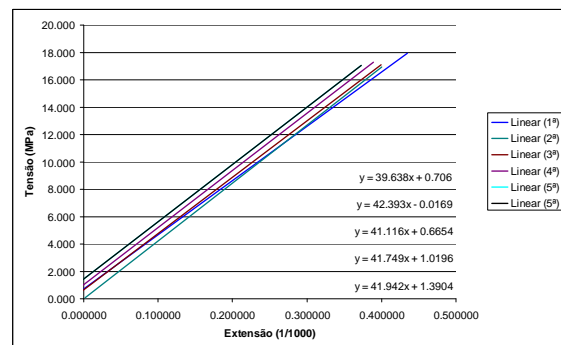


Figura 36 – Determinação do módulo de Young (ajuste por rectas)

Apresentam-se, seguidamente, os resultados obtidos para o módulo de Young (Figura 39) e para o módulo de Young residual (Figura 40). O provete DUO00 exposto à simulação do efeito do fogo explodiu no interior da mufla, no decorrer do ensaio.

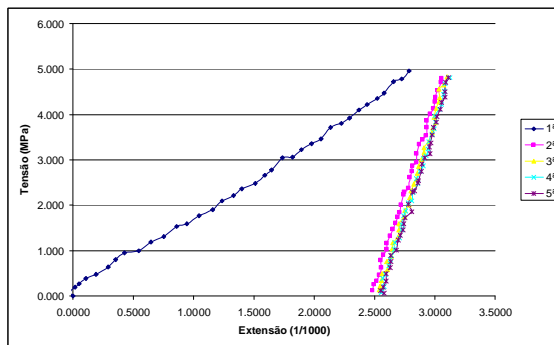


Figura 37 – Determinação do módulo de Young residual (carregamento para o DUO10)

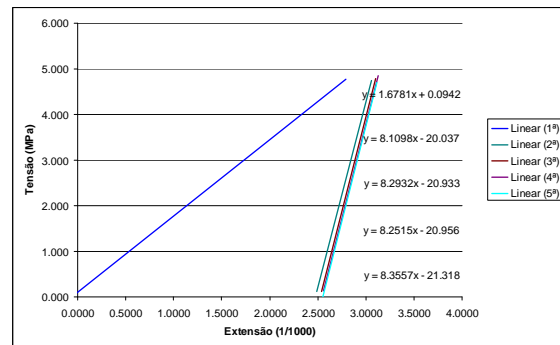


Figura 38 – Determinação do módulo de Young residual (ajuste por rectas)

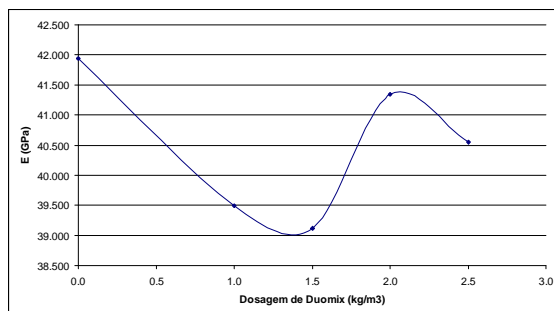


Figura 39 – Módulo de Young

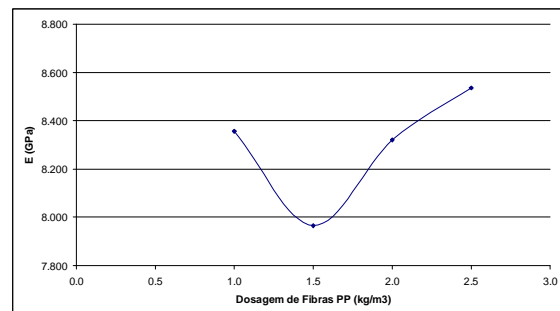


Figura 40 – Módulo de Young residual

Nas Figuras 41 e 43 apresentam-se as curvas tensão-extensão obtidas para os ensaios de resistência à compressão efectuados. A influência da dosagem de fibras de PP na resistência à compressão e na resistência de compressão residual está representada nas Figuras 42 e 44, respectivamente.

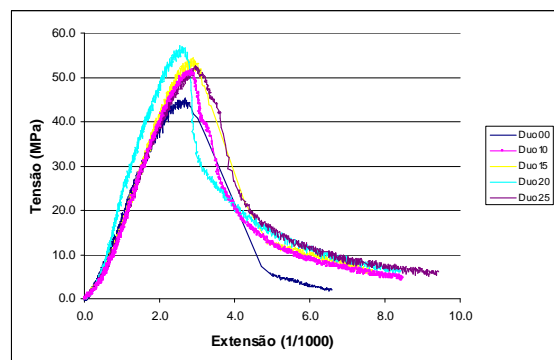


Figura 41 – Resistência à compressão (σ - ϵ)

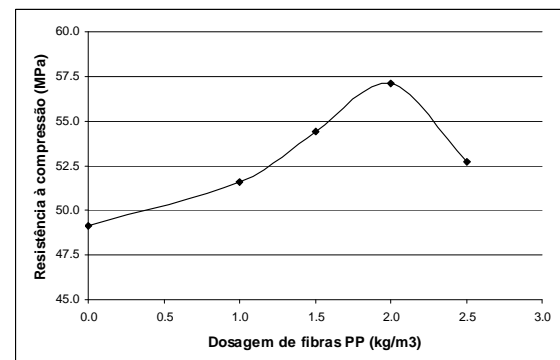


Figura 42 – Resistência à compressão

Apesar do reduzido número de ensaios, estes permitiram constatar que, para os provetes não expostos à simulação do efeito do fogo: a presença de fibras de PP poderá originar um aumento da resistência à compressão, comparativamente a um betão sem a presença do referido tipo de fibra; a variação do módulo de elasticidade, diferente da variação da resistência à compressão, não permite

retirar conclusões sobre a influência da dosagem de fibras. Contudo, a dosagem de fibras de polipropileno não parece ser relevante no módulo de elasticidade do betão.

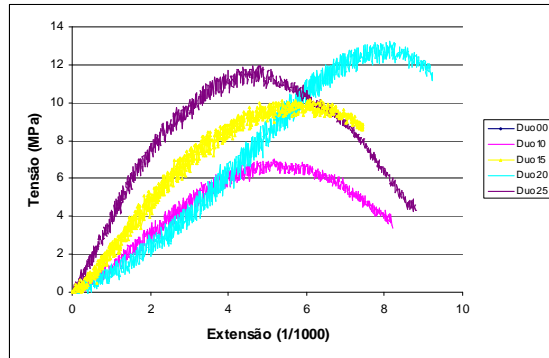


Figura 43 – Resistência à compressão residual (σ - ϵ)

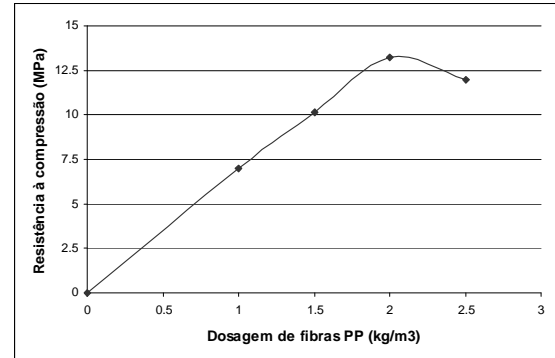


Figura 44 – Resistência à compressão residual

Relativamente aos provetes solicitados por temperaturas elevadas, realça-se que: a presença de fibras de PP é essencial para evitar o *spalling*. A dosagem de 1 kg/m^3 foi suficiente, embora o estado de degradação do betão e a resistência à compressão obtida faça concluir que a dosagem óptima em fibras de polipropileno rondará os $2,0 \text{ kg/m}^3$; de forma um pouco mais evidente, os provetes com maior dosagem em fibras de PP, depois da acção do fogo, apresentam superior resistência à compressão; os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade permitiram concluir que a redução do mesmo é evidente após a solicitação por temperaturas elevadas (de 40 GPa para 8 GPa, aproximadamente). Não foi possível, contudo, constatar variações de resultados acerca da influência da dosagem de fibras no módulo de elasticidade residual.

4. Conclusões

Dos resultados obtidos nos programas experimentais efectuados pode-se constatar que:

- A adição de fibras de PP é uma solução adequada, simples, económica e eficiente para o melhoramento do comportamento ao fogo do betão, nomeadamente evitando o *spalling* explosivo do recobrimento dos elementos estruturais;
- A inclusão de fibras não metálicas conduz a uma redução da trabalhabilidade. Neste sentido, a dosagem de aditivo aumentará com a dosagem em fibras não metálicas;
- O algodão e o polyester apresentam-se como alternativas pouco viáveis. A dispersão de fibras no betão não é satisfatória, levando a aglutinação das mesmas e, deste modo, ao surgimento de pontos frágeis no seio do betão;
- Os ensaios de resistência somente deverão ser efectuados 14 dias após a exposição à simulação do efeito do fogo, dado que a estabilização do valor desta propriedade só é alcançada ao final do referido período de tempo;
- Com o passar do tempo após a exposição à simulação do efeito do fogo, uma pasta cimentícia com menor razão água/cimento apresenta menor redução de resistência residual de compressão;
- Não foi possível detectar o efeito de diferentes dosagens de fibras de PP no módulo de Young do betão, nem mesmo no módulo de Young residual do betão;
- A presença de fibras de PP conduz a um ligeiro acréscimo na resistência à compressão do betão. Relativamente à resistência residual de compressão, o efeito das fibras é mais claro, conseguindo-se um significativo acréscimo de resistência residual à compressão.
- A dosagem óptima em fibras de PP para a classe desejada de resistência do betão (entre 50 a 70 MPa) é, de aproximadamente, 2 kg/m³.

Agradecimentos

Aos autores do presente relatório agradecem o apoio dado pela FCT, Spie Batignolles, DuroEuropa e Civitest.



Bibliografia

Bilodeau, A., Kodur, V. and Hoff, G. (2004). "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, pp. 163-174.

Collignon, C. (2005). "Spalling test of concrete prisms with buckeye fibers following a standard fire curve (ISO 834)", Final Report, Construction Products Division – Fire Section, January.

Georgali, B. and Tsakiridis, P. (2005). "Microstructure of fire-damaged concrete. A case study", *Cement & Concrete Composites*, n.º 27, pp. 255-259.

Giaccio, R. and Zerbino, R. (2005). "Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete", *Materials and Structures*, n.º 38, April, pp. 335-342.

Hertz, K. (2003). "Limits of spalling of fire-exposed concrete", *Fire Safety Journal*, n.º 38, pp. 103-116.

Kalifa, P., Chéné, G. and Gallé, C. (2001). "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. From spalling to microstructure", *Cement and Concrete Research*, n.º 31, pp. 1487-1499.

Kodur, V. and Sultan, M. (2003). "Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, N.º 2, April, pp. 101-107.

Kooiman, A., van der Veen, C. and Djorai, M. (1999). "Steel fibre reinforced concrete segments in the second Heineoord Tunnel", *fib Symposium*, Prague, Czech Republic, 13-15 October, Session 5: Research and Innovation within a project.

Kützing, L. (1999). "Fire resistance of high performance concrete with fibre cocktails", *LACER* n.º 4., pp. 185-191.

Lima, R., Caetano, L., Silva, R., Gastal, F., Filho, L. (2005). "Difracção de raios-X e ultra-som: usando ensaios não-destrutivos para análise de estruturas sinistradas", *Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto*, Volume III, IBRACON, pp. 64-75.



Mahasneh, B. (2005). “The effect of addition of fiber reinforcement on fire resistant composite concrete material”, *Journal of Applied Sciences*, n. ° 5, pp. 373-379.

Moreno, A. e Bizzo, L. (2004). “Estudo do comportamento do concreto sob o efeito de temperaturas elevadas”. *Encontro Nacional Betão Estrutural*, pp. 661-668.

Ramos, G., Gettu, R., Aguado, A., Garcia, T., Lillo, C. F., Oliver, R. (2003). “Utilización de fibras de acero en la nueva línea 9 del Metro de Barcelona.”, *Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras de aço*, DEC-UM, Portugal, pp. 10.1-10.42.

Santos, J., Branco, F. and Brito, J. (2002). “Assessment of concrete structures subjected to fire – the FBTest”, *Magazine of Concrete Research*, 54, n.º 3, pp. 203-208.

Suter, R. (2004). “La recherche appliquée dans le développement de structures – les voussoirs de tunnels”, *Journée d’étude “Béton à Fibres – Performances et Perspectives”*, Juin, pp. 63-89.