

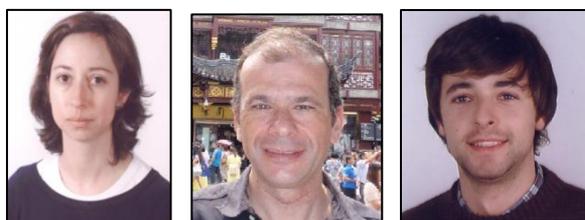
9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental
Aveiro, 15-17 de Out., 2014

MÉTODOS EXPERIMENTAIS NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE BETÕES A ALTAS TEMPERATURAS
EXPERIMENTAL METHODS ON THE DETERMINATION OF THE MECHANICAL
PROPERTIES OF CONCRETE AT HIGH TEMPERATURES

Santos, C. C.¹; Rodrigues, J.P.C.²; Caetano, H.²

¹ ISISE, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal

² ISISE, Universidade de Coimbra, Portugal



RESUMO

Até ao momento não existem ainda procedimentos padrão para ensaios a altas temperaturas no betão, pelo que têm sido realizados ensaios a temperaturas elevadas adaptados de ensaios à temperatura ambiente. Os ensaios têm-se dividido entre ensaios a altas temperaturas e residuais após aquecimento e arrefecimento. O primeiro procedimento é mais adequado para a determinação das propriedades mecânicas do betão durante um incêndio enquanto o segundo procedimento é usado para determinar a resistência residual do betão após incêndio. Nesta comunicação apresentam-se os resultados de ensaios realizados por diferentes autores para a determinação das propriedades mecânicas residuais do betão após aquecimento e arrefecimento. Os resultados apresentados dizem respeito a resistências residuais à compressão, tração e flexão e módulo de elasticidade. Os métodos de ensaio aplicados são devidamente descritos e os resultados obtidos são objeto de análises comparativas.

ABSTRACT

So far there are no standard procedures for testing concrete at high temperatures which have been conducted according to the ones at ambient temperature. The tests have been divided between tests at high temperatures and residual after heating and cooling. The first procedure is appropriate for determining the mechanical properties of concrete during fire while the second is used to determine the residual mechanical properties of concrete after fire. In this paper are presented the results of tests carried out by different authors for assessing the residual mechanical properties of concrete after heating and cooling. The results presented are respecting to residual compressive, tensile and flexural strength and elasticity modulus. The test methods are described and results obtained are compared.

1- INTRODUÇÃO

A influência das temperaturas elevadas nas propriedades mecânicas do betão tem sido objeto de estudo há várias décadas. Estes estudos podem ser divididos em dois domínios: ao nível do comportamento do material e ao nível do comportamento estrutural. Nos estudos efetuados ao nível do material, foi avaliada a influência da temperatura nas seguintes propriedades do betão: resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Em resultado destes estudos foram publicados diversos artigos científicos que serviram de base à elaboração de regulamentos na área das estruturas de betão submetidas a temperaturas elevadas (Schneider, 1988). Segundo este autor, a evolução das propriedades mecânicas do betão a temperaturas elevadas pode ser determinada segundo dois tipos de ensaios: ensaios em regime estacionário a uma determinada temperatura constante e ensaios em regime transitório com evolução constante da temperatura no tempo.

Em regime estacionário podem ser realizados quatro tipos de ensaios.

Ensaio tipo I: este ensaio é executado respeitando uma determinada variação de tensão, obtendo-se a resposta tensão-extensão, sendo por isso utilizado para avaliar a influência da temperatura no módulo de elasticidade, na resistência à compressão ou à tração (consoante o tipo de ensaio) e na extensão do colapso do provete de betão.

Ensaio tipo II: este ensaio é executado respeitando uma determinada variação da extensão, obtendo-se a resposta tensão-extensão, sendo por isso utilizado para avaliar a influência da temperatura, não somente nos valores das propriedades referidas para o ensaio tipo I, mas também na capacidade de dissipação de energia do material, dado que agora o ensaio pode captar o comportamento do

proвете desde a sua fase inicial até ao completo esgotamento da sua capacidade de carga residual.

Ensaio tipo III: nestes ensaios os provetes são aquecidos até à temperatura pretendida, sendo de seguida carregados até ser instalado um nível de tensão desejado. Durante o ensaio quer a temperatura quer a tensão são mantidas constantes, sendo registada a variação de extensão ao longo do tempo de execução do ensaio. Assim, executando ensaios para distintos níveis de temperatura, avalia-se a influência da temperatura na fluência do material.

Ensaio tipo IV: nestes ensaios os provetes são aquecidos até à temperatura pretendida, sendo de seguida carregados até ser instalado um nível de extensão desejado. Durante o ensaio quer a temperatura quer a extensão são mantidas constantes, sendo registada a variação de tensão ao longo do tempo de execução do ensaio. Assim, executando ensaios para distintos níveis de temperatura, avalia-se a influência da temperatura na relaxação do material.

Em regime transitório podem ser realizados os seguintes tipos de ensaios:

Ensaio tipo V: ensaio com determinação da deformação total do provete, realizado para diferentes níveis de tensão constante. Neste tipo de ensaio é obtida a evolução da extensão total no tempo, sendo determinada a temperatura crítica para a qual ocorre a rotura do provete, bem como os valores da variação da fluência.

Ensaio tipo VI: ensaio com determinação das tensões totais do provete, quando submetido a uma extensão constante. Neste ensaio é obtida a evolução da tensão no tempo, para diferentes níveis iniciais de tensão ou de extensão. Também pode ser obtida a relação entre a tensão e a temperatura desenvolvida no aquecimento do provete. A escolha do tipo de ensaio depende, de uma forma geral, do tipo de propriedade em estudo e da situação para a

qual se pretende caracterizar essa propriedade.

2- INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BETÃO

Segundo Khoury G. A. (2000), a degradação das propriedades mecânicas do betão com o aumento da temperatura pode ser atribuída a quatro fatores: mudanças físico-químicas na pasta do betão; mudanças físico-químicas nos agregados; incompatibilidade térmica entre os agregados e a pasta do betão; influência de outros fatores externos, nomeadamente o nível de temperatura, a taxa de aquecimento, o carregamento e as condições de fronteira entre o provete e o exterior, as quais influenciam a troca de humidade através das superfícies de exposição do provete.

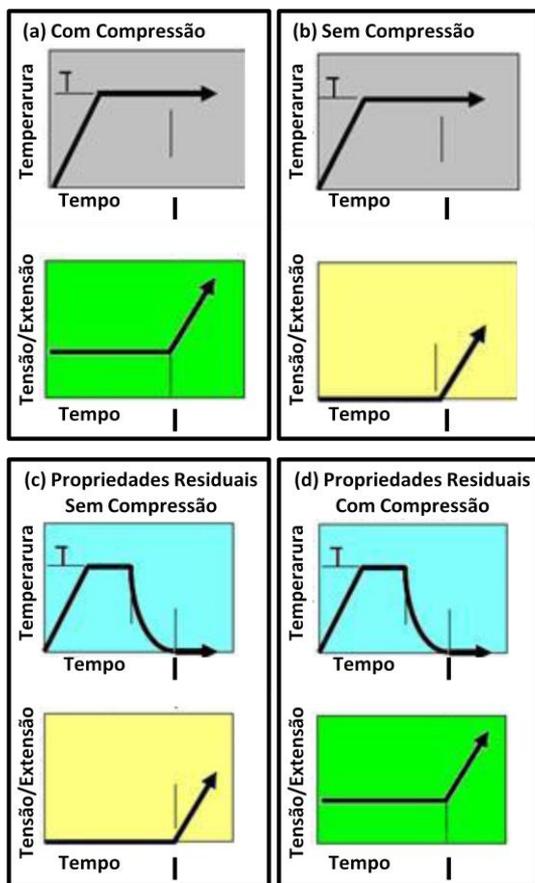


Fig. 1 – Regimes de temperatura e de carregamento durante os ensaios, Phan e Carino (2001).

Segundo Phan e Carino (2001), o estudo das propriedades mecânicas do betão quando submetido a temperaturas

elevadas pode ser efetuado por intermédio dos seguintes ensaios: (a) ensaio em provetes carregados durante o aquecimento; (b) ensaio em provetes não carregados durante o aquecimento; (c) ensaio de determinação das propriedades residuais em provetes não carregados durante o aquecimento e (d) ensaio de determinação das propriedades residuais em provetes carregados durante o aquecimento. O tipo de ensaio adequado para a determinação das propriedades mecânicas de um betão em situação de incêndio é o (a), em que os provetes são carregados durante o aquecimento, enquanto o ensaio do tipo (d) é o procedimento de ensaio mais adequado para determinar a resistência residual do betão tendo em vista a definição dos procedimentos de reparação de uma estrutura de betão após incêndio. Os ensaios referidos anteriormente encontram-se esquematizados na Fig. 1, para os diferentes regimes de temperatura e de carregamento.

2.1 - Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão é um dos parâmetros mais úteis no dimensionamento de uma estrutura de betão armado e pré-esforçado, pois este material é solicitado, principalmente, a esforços de compressão. Quando o betão é submetido a altas temperaturas ocorrem transformações físico-químicas que conduzem a alterações significativas das suas propriedades mecânicas. Segundo Khoury et al. (2002) essas transformações devem-se a fatores como: composição do betão, a selagem do provete, as condições de humidade, o nível de carregamento durante o período de aquecimento, a taxa de aquecimento ou de arrefecimento, o tempo de exposição a temperaturas elevadas, o período de tempo após o arrefecimento antes da realização do ensaio de compressão e o número de ciclos térmicos.

Segundo Picandet et al. (2001), quando o betão é sujeito a temperaturas elevadas o volume apresenta também alterações de comportamento. Num primeiro instante, assiste-se ao fechamento dos poros e das microfissuras pré-existent,

conduzindo a uma contração global do volume do betão. A partir de 85% da tensão máxima, o betão dilata, aumentando acentuadamente o seu volume.

Kodur e Sultan (1998) e Phan e Carino (1998), efetuaram estudos experimentais que lhes permitiram constatar a existência de diferenças bem definidas entre as propriedades de betões correntes e betões de alta resistência quando sujeitos a temperaturas elevadas. Dos seus estudos concluíram que o betão de elevada resistência começa a perder resistência a partir de níveis de temperatura mais baixos que o betão corrente, pois enquanto a rotura do betão de elevada resistência ocorreu a partir de temperaturas de 150°C - correspondente a uma perda significativa de resistência próxima dos 30%, o betão de resistência normal manteve a sua resistência até temperaturas muito próximas dos 350°C. Os autores explicam que esta diferença de comportamento se deve à densa microestrutura do betão de elevada resistência (devido à baixa relação a/c) que, ao conferir-lhe baixa permeabilidade, dificulta a libertação do vapor de água dos poros quando aumenta a temperatura, tornando o betão mais suscetível ao fenómeno *spalling*. Acima dos 800°C a perda da resistência original para ambos os betões é quase total. No entanto, no intervalo de temperaturas de 400-800°C ambos os betões perdem a maior parte da sua resistência original, especialmente para temperaturas acima dos 600°C devido à decomposição do silicato de cálcio hidratado gel (CSH), componente responsável pela resistência mecânica dos cimentos.

Pimienta e Hager (2002) desenvolveram um trabalho experimental para comparar o comportamento do betão corrente e do betão de elevada resistência. Da análise dos resultados verificaram uma redução da resistência à compressão do betão em função da temperatura, sendo esta mais notória para os betões de elevada

resistência, principalmente a partir dos 300°C.

A resistência à compressão do betão quando sujeito a altas temperaturas depende de vários parâmetros como o tipo de agregados (dimensão e natureza), razão água/cimento, tipo de ligante, tipo de adjuvante, tipo de superplastificante, modo de cura do betão, taxa de aquecimento do betão, natureza e quantidade de fibras, entre outros.

Na Tabela 1 podemos observar a influência de alguns parâmetros que afetam a resistência à compressão do betão a altas temperaturas, segundo as orientações do RILEM TC HTC (2004). Podemos verificar que o tipo de agregado, o nível de carregamento, a taxa de evaporação e a selagem dos provetes são os parâmetros que afetam mais a resistência do betão quando exposto a altas temperaturas.

Tabela 1 – Fatores que afetam o desempenho do betão a altas temperaturas, RILEM TC HTC (2004).

Parâmetros	Influência			Importância nas estruturas
	Alta	Média	Baixa	
Classe do Betão			+	Grande
Relação água/cimento			+	Grande
Agregados	+++			Média
Tipo de cimento		++		Média
Relação agregados/cimento		++		Média
Máxima dimensão dos agregados			+	Baixa
Nível de carregamento				$\sigma < 0,3 f_{ck}$
Taxa de aquecimento			+	T < 4 °C/min
Taxa de evaporação				Para T = 120°C
Idade do betão			+	t > 28 dias
Tipo de cura		++		Média

Georgali e Tsakiridis (2005) defendem que o processo de deterioração do betão ocorre quando é atingida uma temperatura de 380°C. A perda de água de hidratação do cimento ocorre no intervalo de 300 a 400°C, o que leva a uma perda na resistência e aparecimento de fissuras superficiais. Quando atingidos os 400°C, a perda de resistência é de 15 a 25%, dependendo do tipo de agregados, siliciosos ou calcários. Aos 550°C ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio. Até 600°C, os agregados sofrem expansão térmica, dando origem a tensões internas que provocam desagregação no betão. A partir de 800°C, os agregados de origem calcária iniciam a sua decomposição, acentuando a redução da resistência do betão.

Sakra e El-Hakim (2005) estudaram o efeito da exposição accidental ao fogo, variando a temperatura entre 250 a 950°C, com o objetivo de determinar as propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de betão (agregados de barita, de brita e de ilmenite) quando utilizados em proteções de instalações nucleares. Estudaram também o efeito da pintura incolor de proteção ao fogo (tipo FR2 produzida por CMB LEYDE) e o método de arrefecimento (ar, água ou espuma) que deve ser utilizado de forma a minimizar os danos causados na estrutura de betão. Os autores concluíram que o betão constituído por agregados de ilmenite apresentou uma maior resistência a altas temperaturas quando comparado com o betão constituído por agregados de barita ou de brita. Em relação ao método de arrefecimento os autores concluíram que a utilização de espuma era mais apropriada em situação de incêndio, uma vez que a água provoca uma grande deterioração do betão. É aconselhável uma pintura de proteção contra o efeito das altas temperaturas para reduzir a perda de água a altas temperaturas e assegurar a segurança dos elementos de betão no caso de um incêndio accidental.

Arioz (2007) realizou um estudo sobre o efeito de altas temperaturas nas propriedades físicas e mecânicas de várias misturas de betão com cimento Portland, agregado de calcário britado e cascalho de rio. Foram estudadas quatro misturas moldadas em cubos de 70x70x70mm, com um tempo de cura de 28 dias em água, durante 6 dias em ar fresco e por fim levados ao forno durante 24 horas a uma temperatura de 105°C. Posteriormente, foram ensaiados a temperaturas entre os 200 e 1200°C durante 2 horas e de uma forma linear com uma taxa de aquecimento de 20°C/minuto. De seguida foram armazenados à temperatura ambiente durante 2 horas até se iniciarem os ensaios à compressão. Com os resultados obtidos o autor verificou que o efeito da exposição a temperaturas elevadas apresenta-se mais acentuado nas misturas de betão com agregados de cascalho de rio (agregado silicioso).

Fletcher et al. (2007) estudaram o comportamento de estruturas de betão ao fogo para verificarem os efeitos da temperatura na redução das propriedades mecânicas e na ocorrência de *spalling*. O betão quando exposto a altas temperaturas sofre alterações físicas e químicas, sendo a sua reação complexa devido à não uniformidade do betão constituído pela pasta de cimento e pelos agregados. Inicialmente, a vaporização da água livre ocorre entre os 100°C e os 140°C, provocando um aumento na pressão de vapor no interior do betão. Aos 400°C o hidróxido de cálcio, constituinte da pasta de cimento, começa a desidratar e gera mais vapor de água, conduzindo a uma redução significativa da resistência do material. Aos 575°C os agregados siliciosos aumentam de volume devido a transformações minerais e os calcários decompõem-se aos 800°C. A fissuração e o fenómeno de *spalling* ocorrem devido à diferente dilatação térmica da pasta de cimento e dos agregados. As alterações físicas e químicas sofridas no betão levam a uma forte redução da resistência à compressão a partir dos 650°C para betão leve, 660°C para betão com

agregados calcário e 430°C para betão com agregados siliciosos. Os autores concluíram que o comportamento do betão ao fogo não se encontra bem assinalado e precisa de uma pesquisa mais aprofundada. A resposta dos constituintes do betão ao aquecimento é fundamentalmente complexa na degradação das propriedades físicas, existindo uma forte variação, pois depende da composição, da humidade e da relevância dos parâmetros ambientais como, por exemplo, o tempo de duração do incêndio e a temperatura máxima que este atinge.

Mydina e Wang (2012) realizaram um estudo sobre o efeito de altas temperaturas em betões celulares. Este tipo de betão é considerado um material leve constituído por cimento Portland ou uma pasta de cimento (argamassa) com uma estrutura de poros uniformemente produzidos pela introdução de ar. O betão celular é de fácil produção, a sua densidade situa-se entre os 400 e os 1600 kg/m³ e apresenta bom isolamento térmico e acústico. Os autores consideraram para o estudo betão com densidade 650 e 1000 kg/m³, variando a temperatura de 20 a 600°C, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas do betão celular sujeito a altas temperaturas, nomeadamente a resistência de compressão cilíndrica, módulo de elasticidade e porosidade. Os autores concluíram que a perda de rigidez do material ocorreu aproximadamente aos 90°C, independentemente da densidade do material. A redução da densidade do betão celular conduz à redução da força e da rigidez do material. Na Fig. 2 e Fig. 3 é visível o estado dos provetes depois de ensaiados.



Fig. 2 - Modos de rotura do betão de 650 kg/m³ de densidade para 20°C, 450°C e 650°C, Mydina e Wang (2012).



Fig. 3 - Modos de rotura do betão de 1000 kg/m³ de densidade para 20°C, 450°C e 650°C, Mydina e Wang (2012).

Jonaitis e Papinigis (2005) concluíram, através de um estudo realizado sobre a influência de altas temperaturas e do carregamento a longo prazo na resistência à compressão e no módulo da elasticidade do betão, que a alteração das propriedades descritas anteriormente não depende somente da exposição do betão a altas temperaturas mas também da ação do carregamento a longo prazo. Concluíram ainda que o decréscimo da resistência à compressão é inferior nas situações em que o betão é aquecido primeiro e só depois sujeito a um carregamento a longo prazo do que na situação em que é aquecido após ser sujeito a um carregamento. Verificaram também que para condições de serviço, o betão sujeito a ações de carregamento a longo prazo e a temperaturas elevadas, o fator de redução da resistência à compressão do betão em função da temperatura é menor do que o recomendado na EN 1992-1-2 (2004).

Santos (2012) desenvolveu um estudo experimental para determinação das propriedades mecânicas residuais após incêndio de betões de agregados calcários e graníticos. Para cada composição de betão testou dois níveis de carregamento (0,3 *f_{cd}* e 0,7 *f_{cd}*), dois tipos de arrefecimento (arrefecimento ao ar e arrefecimento por jato de água) e vários níveis de temperatura (20°C, 300°C, 500°C e 700°C). Concluiu que a resistência à compressão do betão sofre uma redução substancial com o aumento da temperatura. Ainda que a diminuição seja ligeira até temperaturas próximas dos

300°C, essa redução acentua-se para temperaturas superiores. O processo de arrefecimento apresenta uma influência também ela importante na redução da resistência residual à compressão dos betões ensaiados. O autor concluiu que o arrefecimento por jato de água provoca grandes reduções na resistência residual à compressão do betão mesmo para temperaturas relativamente baixas. Considerando os dois tipos de betão, constatou que nos provetes em que se aplicou o arrefecimento por jato de água, o betão calcário apresentou pior desempenho quando comparado com o betão granítico, independentemente do nível de carga e da temperatura atingida. No entanto, no caso do arrefecimento ao ar, os provetes constituídos por betão calcário recuperaram o seu desempenho quando comparados com o betão granítico para nível de carga $0,7 f_{cd}$ e temperaturas acima de 400°C. À medida que se aumentou o nível de carga maior foi a influência do processo de arrefecimento na redução da resistência residual à compressão do betão. Comparando os dois processos de arrefecimento aplicados, o autor verificou que essa influência é mais negativa no arrefecimento por jato de água.

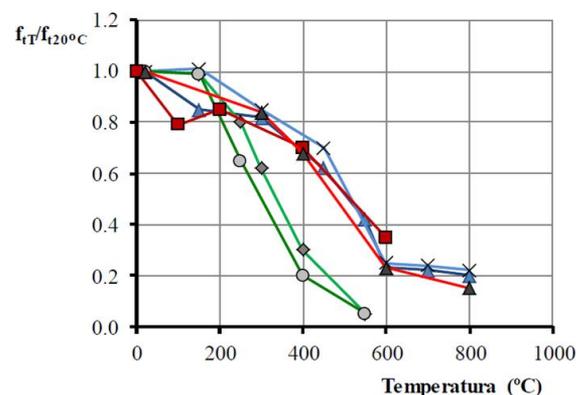
2.2 - Resistência à tração

De uma forma geral, a resistência ao fogo de um elemento estrutural é dependente da geometria, do tipo de material a ser testado, da intensidade da carga aplicada e das características do próprio incêndio. Segundo Neville (1995) o conhecimento desta propriedade permite estimar a carga à qual ocorre fissuração e caracterizar o fenómeno de *spalling* no betão, uma vez que o desprendimento das camadas de betão ocorre quando as tensões instaladas ultrapassam a resistência à tração do betão para a temperatura a que se encontra exposto. Atualmente recorre-se a ensaios destrutivos de tração direta e a ensaios destrutivos de tração indireta (compressão diametral) para se determinar a resistência à tração do betão.

Segundo Thelandersson (1972) os ensaios de tração direta apresentam valores para a resistência à tração mais baixos que os resultados de compressão diametral. No entanto, os resultados obtidos por tração direta são mais próximos dos valores reais.

Segundo Mazars (1986) existem três fases no comportamento do betão à tração direta: na primeira fase, até cerca de 50% da tensão máxima, o comportamento do betão apresenta-se quase linear, pelo que o aparecimento de microfissuras na interface pasta de cimento/agregado é insignificante. Na segunda fase, até à tensão máxima, o comportamento do betão é não-linear, manifestando perda de rigidez e de coesão na interface pasta de cimento/agregados, originando microfissuras na pasta de cimento. Quando se atinge a tensão máxima surge a formação de microfissuras localizadas. Na última fase, o desenvolvimento de microfissuras localizadas conduz à rotura do material.

Vários estudos permitem concluir que a resistência à tração é afetada pelas proporções da mistura e, de uma forma mais significativa, pelo tipo de agregado. Por exemplo, a diminuição da resistência à tração do betão composto por agregados calcários é duas vezes mais elevada que para o betão composto por agregados siliciosos aos 500°C.



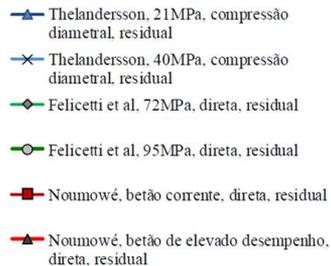


Fig. 4 - Resistência residual à tração direta e à tração por compressão diametral em função da temperatura Hager (2004).

Na Fig. 4 pode-se observar, a partir de trabalhos desenvolvidos por vários autores, o comportamento à tração de diferentes tipos de betão, em que constata uma diminuição desta propriedade à medida que a temperatura aumenta.

Santos (2012) nos seus estudos verificou que a resistência residual à tração do betão diminuiu com o aumento da temperatura. O estudo desta propriedade mecânica mostrou que a composição do betão (mistura e natureza de agregados) é uma variável que influencia essa diminuição em virtude das transformações térmicas ocorridas nos seus componentes. Constatou que essa redução é maior no betão calcário do que no betão granítico, independentemente do nível de temperatura atingido e do tipo de arrefecimento aplicado.

2.3 - Resistência à flexão

Tal como sucede com as outras propriedades mecânicas do betão sujeito a altas temperaturas, também a resistência à flexão diminui à medida que a temperatura aumenta. Os resultados obtidos nos ensaios experimentais de resistência à flexão realizados por Li et al. (2004) em provetes de betão corrente (C40) e de elevada resistência (C60 e C70), verificou-se que a resistência à flexão do betão de elevada resistência (C70) sofre uma redução de 16,3% para temperaturas acima dos 800°C. No entanto, acima dos 1000°C apenas 7,4% da resistência é mantida. A resistência à flexão do betão de elevada resistência (C60 e C70) diminui mais acentuadamente do que a do betão corrente

(C40), especialmente no intervalo dos 200 aos 400°C. Na Fig. 5 é possível observar os resultados experimentais referidos anteriormente.

Husem (2006) estudou a variação da resistência à flexão do betão corrente e de elevada resistência, expostos a diferentes níveis de temperatura (200, 400, 600, 800 e 1000°C) e seguidamente procedeu ao seu arrefecimento. Para o efeito submeteu uns provetes ao arrefecimento ao ar e outros ao arrefecimento mediante jato de água. A resistência à flexão dos provetes de betão foram comparados uns com os outros e ainda com provetes à temperatura ambiente (ver Fig. 6).

Este autor concluiu que o betão corrente e o de elevada resistência, após exposição a temperaturas elevadas, apresentam uma diminuição da resistência à flexão com o aumento da temperatura. Verificou ainda que a redução é maior nos provetes arrefecidos em água.

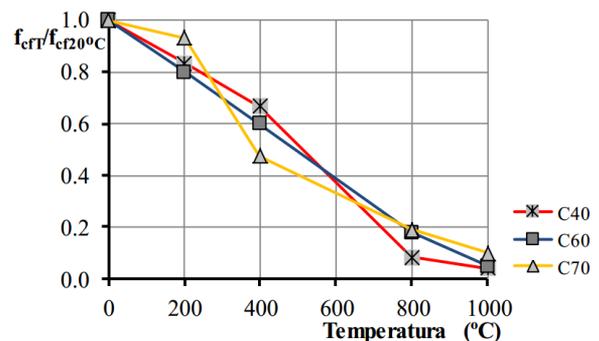


Fig. 5 - Resistência residual à flexão em função da temperatura do betão Li et al. (2004).

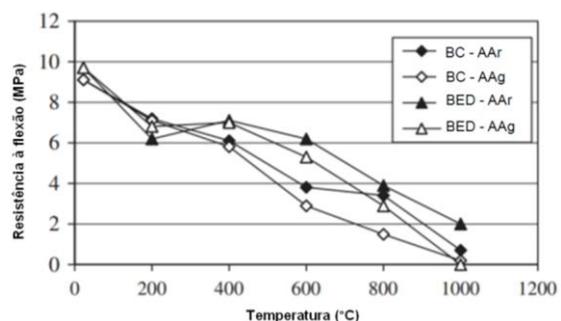


Fig. 6 - Variação da resistência à flexão residual em função da temperatura e do processo de arrefecimento aplicado; BC-AAr – Betão corrente arrefecido ao ar; BC-AAg – Betão corrente arrefecido em água; BED-AAr – Betão de elevado

desempenho arrefecido ao ar; BED-AAg – Betão de elevado desempenho arrefecido em água, Husem (2006).

Também os resultados dos ensaios de resistência à flexão conduzidos por Li et al., 2004 estão em sincronia com os resultados de outros estudos de investigação.

Os ensaios experimentais realizados por Santos (2012) mostram que a resistência residual à flexão sofre alterações em função do tipo de arrefecimento aplicado. O arrefecimento ao ar tem um efeito menos acentuado quando comparado com o arrefecimento por jato de água, independentemente da constituição do betão. Todavia, o uso de agregados calcários melhora o comportamento à flexão quando comparado com agregados graníticos.

2.4 - Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade (ou módulo de Young) é um parâmetro mecânico dos materiais que depende da sua composição química (ou microestrutura) e pode ser obtido pela razão entre a tensão exercida no material e a deformação (extensão) sofrida pelo mesmo. Genericamente a tensão corresponde a uma força ou carga, por unidade de área, aplicada sobre um material, e a extensão é a relação entre a dimensão do material após a aplicação da carga e a sua dimensão original. No caso concreto dos betões, o módulo de elasticidade depende da porosidade dos agregados e da pasta cimentícia, pois teores de humidade mais baixos conduzem a uma hidratação deficiente da pasta de cimento e a ligações mais fracas entre esta e os agregados, assim como a uma menor compactidade. A evaporação da água de amassadura conduz a microfissuração, devido à retração do betão e à redução da sua rigidez, afetando o módulo de elasticidade, Coutinho (1988).

Tal como os estudos conduzidos por Santos (2012) permitiram concluir, o comportamento das estruturas depende do módulo de elasticidade do betão e este é

fortemente influenciado pela temperatura e pelo tipo de agregado usado na composição do betão. Com base nos resultados obtidos por Santos, verificou-se que o módulo de elasticidade não é muito sensível ao método de arrefecimento aplicado. No caso do betão calcário, o aumento da temperatura de 300 para 500°C registou uma redução de aproximadamente 23% para o arrefecimento ao ar e para o arrefecimento por jato de água. O betão granítico, para os mesmos níveis de temperatura, registou uma redução de cerca de 40% para os dois processos de arrefecimento. Contudo, o arrefecimento mediante jato de água registou os valores mínimos do módulo de elasticidade em todas as tipologias de betão.

Schneider (1988) considera que a redução do módulo de elasticidade com a temperatura deve-se principalmente a uma rotura nas ligações internas entre a pasta de cimento e os agregados. Esta redução é influenciada pelo módulo de elasticidade inicial, pelo teor de água, pela natureza dos agregados do betão e pela taxa de aquecimento. Num complemento da conclusão de Schneider, Hertz (2005) justifica a redução do módulo de elasticidade com o facto dos agregados siliciosos terem uma expansão térmica maior que os agregados de calcário, provocando maiores danos; a resistência relativa do betão diminuiu à medida que a temperatura aumenta, observando-se para temperaturas de 1200°C a completa decomposição da mistura de betão.

Num estudo experimental realizado por Phan e Carino (2001) comparou-se a variação do módulo de elasticidade residual para betões de resistência normal e de alta resistência sujeitos a altas temperaturas, sem qualquer tipo de carregamento durante a fase de aquecimento do ensaio. Nesse estudo, os autores verificaram uma redução mais acentuada no módulo de elasticidade residual do que no módulo de elasticidade a altas temperaturas, para os dois tipos de betão em estudo. E verificaram que havia uma redução mais acentuada do módulo de elasticidade em função da temperatura, nos

betões de alta resistência do que nos betões de resistência normal.

Estudos realizados por Bamonte e Gambarova (2007) permitiram concluir que o módulo de elasticidade diminui à medida que a temperatura aumenta, independentemente do tipo de betão.

3- CONCLUSÕES

O tipo de ensaio a realizar em betão armado a elevadas temperaturas, depende do cenário de incêndio que se pretende simular, se durante a ocorrência de um incêndio ou após a extinção de um incêndio (resistência residual) e das propriedades mecânicas que se pretende avaliar.

Dos vários estudos experimentais apresentados neste artigo, pode-se concluir que o efeito das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do betão (resistência à compressão, à tração, à flexão e módulo de elasticidade) provoca uma diminuição da capacidade resistente do betão.

Além disso, também é possível constatar que, das propriedades mecânicas apresentadas, os betões de alta resistência quando sujeitos a altas temperaturas tendem a sofrer reduções de resistência mais acentuadas quando comparados com betões correntes nas mesmas condições. Esta situação verifica-se, tanto em função da temperatura ao longo do ensaio experimental, como em resistência residual.

4- REFERÊNCIAS

Arioz, O. (2007). "Effects of elevated temperatures on properties of concrete". *Fire Safety Journal*, vol. 42, Elsevier, pp. 516–522.

Bamonte, P.; Gambarova, P.G. 2007. High-temperature resistance and thermal properties of self-compacting concrete: preliminary results. *International Workshop Fire Design of Concrete Structures – From*

Materials Modelling to Structural Performance, Portugal, p. 59-68.

Coutinho, S. (1988). "Fabrico e propriedades do betão". *Laboratório-Nacional-de-Engenharia-Civil*, Lisboa.

EN 1992-1-2 (2004) "Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design".

Fletcher, I. A., Welch, S., Torero, J. L., Carvel, R. O., Usmani, A. (2007). "Behaviour of concrete structures in fire". *Thermal Science*, vol. II, 2, pp. 37-52.

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

Hager, I. (2004). "Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques". *Tese de Doutoramento, da Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, França*

Hertz, K. D. (2005). "Concrete strength for fire safety design". *Magazine of Concrete Research*, vol. 57, 8, pp. 445-453.

Husem, M. (2006). "The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete". *Fire Safety Journal*, vol. 41, 2, pp. 155-163.

Jonaitis, B., Papinigis, V. (2005). "Effect of long-term loading and fire temperature on mechanical properties of concrete". *Journal of Engineering and Management*, vol. XI, pp. 283-288.

Khoury, G. A. (2000). "Effect of fire on concrete and concrete structures". *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 2, pp. 429-447

Khoury, G. A., Majorana, C. E., Pesavento, F., Schrefler, B. A. (2002). "Modelling of heated concrete". *Magazine of Concrete Research*, vol. 54, 2, pp. 77-101.

Kodur, V. R., Sultan, M. A. (1998). "Structural behaviour of high strength". *International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete*, Quebec.

Li, M., Qian, C., Sun, W. (2004). Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n.6, p. 1001-1005.

Mazars, J. (1986). "A description of micro and macroscale damage of concrete structures". *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 25, pp. 729-737.

Santos C.C. Rodrigues J.P.C., Caetano H.

- Mydina, M. a. O., Wang, Y. C. (2012). "Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures". *Construction and Building Materials*, vol. 26, Elsevier, pp. 638–654.
- Neville, M. 1995. *Properties of concrete*. 4th edition, Longman Group Limited, England, 844 p.
- Phan, L. T.; Carino, N. J. (1998). "Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature" *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 10, pp. 58-64.
- Phan, L. T.; Carino, N. J. (2001). "Mechanical properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures", NISTIR 6728, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
- Picandet, V., Khelidj, A., Bastian, G. (2001). "Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete". *Cement and Concrete Research*, vol. 31, Pergamon, pp. 1525–1532.
- Pimienta, P., Hager, I. (2002). "Mechanical behaviour of HPC at high temperature". 6th International Symposium on Utilisation of High Strength/high Performance Concrete, Leipzig.
- Rilem Tc Htc (2004). "Behaviour of Concrete at High Temperatures- Part 1 - Ordinary Concrete".
- Sakra, K., El-Hakim, E. (2005). "Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties". *Cement and Concrete Research*, vol. 35, Elsevier, pp. 590–596.
- Santos, C. C. (2012). "Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Betões Normais". Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Schneider, U. (1988). "Concrete at high temperatures: A general review". *Fire Safety Journal*, vol. 13, pp. 55-68.
- Thelandersson, S. (1972). "Effect of high temperatures on tensile strength of concrete". *Nordisk Betong*, vol. 2, pp. 1-28.