



## **PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE BETÕES PARA A REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS APÓS INCÊNDIO**

**Santos, Cristina Calmeiro<sup>1</sup>, Rodrigues, João Paulo C.<sup>2</sup>**

1: Instituto Politécnico de Castelo Branco, ISISE, ccalmeiro@ipcb.pt

2: Universidade de Coimbra, ISISE, jpaulocr@dec.uc.pt

### **SUMÁRIO**

O betão, por norma, tem um bom comportamento quando submetido a temperaturas elevadas como as decorrentes dum incêndio. Contudo as suas propriedades mecânicas a altas temperaturas e residuais após incêndio sofrem deterioração podendo, em situação extrema, levar ao colapso, parcial ou total do edifício. Tal redução verifica-se quer no betão normal quer no betão de alta resistência. Nesta comunicação são apresentadas as alterações provocadas pela temperatura nas propriedades mecânicas residuais após incêndio dos betões - resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade - obtidas em ensaios experimentais com betão normal e comparadas com os resultados existentes na literatura da especialidade para betão normal e de betão de alta resistência.

**Palavras-chave:** betão; propriedades mecânicas; residual, incêndio, resistência.

### **1. INTRODUÇÃO**

Vários estudos mostram que o betão de resistência normal, após sujeito a temperaturas elevadas, sofre uma redução nas suas propriedades mecânicas. De um modo geral apresentam-se valores de 25% para a perda de resistência à compressão para níveis de temperatura de 300°C e valores de 75% para temperaturas acima dos 600°C [1-4]. Usualmente poder-se-ia ter a ideia de que um betão de alta resistência apresentava características mais satisfatórias ao fogo quando comparado com o betão normal. Este facto conduziu à necessidade de realizar investigação no sentido de determinar as alterações ocorridas nas propriedades deste tipo de betão quando submetido a temperaturas elevadas, permitindo assim a comparação com as alterações produzidas no betão normal.

Felicetti e Gambarova realizaram ensaios experimentais com betão de resistência normal, constatando que o comportamento à compressão do betão é influenciado com o aumento da temperatura, principalmente no intervalo dos 100 aos 800°C. Mostraram ainda que com o aumento da temperatura o material torna-se mais dúctil [5]. De igual modo, também as propriedades mecânicas do betão de alta resistência sofrem alterações sob o efeito de altas temperaturas.

Diederichs, Kodur e Phan efetuaram estudos para determinar as principais diferenças entre o comportamento do betão normal e do betão de alta resistência. Constataram a existência de diferenças bem definidas entre as propriedades destes dois tipos de betão sob o efeito de temperaturas elevadas. Evidenciaram que a rotura do betão de alta resistência ocorreu a partir dos 150°C correspondente a uma perda significativa de resistência próxima dos 30%, enquanto o betão de resistência normal manteve a sua resistência até temperaturas muito próximas dos 350°C. Tal facto deve-se à microestrutura densa do betão de alta resistência a qual lhe confere uma baixa permeabilidade, dificultando a libertação do vapor de água dos poros quando aumenta a temperatura tornando o betão mais suscetível ao fenómeno spalling [3, 6, 7].

Kodur e Phan observam nos seus trabalhos que o spalling sofrido pelo betão de alta resistência, em condições de incêndio, deve-se essencialmente à baixa relação água/cimento. Este fenómeno gera um destacamento do betão durante o incêndio, expondo as camadas mais profundas deste material a temperaturas elevadas, aumentando assim a taxa de transmissão de calor para as camadas internas da estrutura, chegando a afetar o aço. Verificaram que, no intervalo 20-400°C, o betão de alta resistência, ao contrário do betão normal, mantém a sua resistência original; no intervalo 400-800°C, ambos os betões perdem a maior parte da sua resistência original, especialmente para níveis de temperatura acima dos 600°C devido à decomposição do silicato de cálcio hidratado gel (CSH), componente responsável pela resistência mecânica dos cimentos utilizados na construção civil. Acima dos 800°C a perda da resistência original para ambos os betões é quase total. Neste sentido, estes autores consideram que os trabalhos de investigação devem incidir naquilo que designam de intervalo crítico (400-800°C), de modo a reduzir a perda de resistência e melhorar o comportamento do betão a temperaturas elevadas [3, 7].

Resultados de ensaios experimentais conduzidos por vários autores mostram que, apesar de ambos os tipos de betão sofrerem uma diminuição da sua capacidade resistente em situação de incêndio, o betão de alta resistência apresenta uma maior redução da resistência e uma maior sensibilidade para o surgimento de spalling ou mesmo spalling explosivo quando submetido ao aumento da temperatura como acontece em situação de incêndio [8 -13].

A maior frequência com que o spalling ocorre no betão de alta resistência é justificada pela baixa relação água/cimento que torna a matriz muito compacta impedindo a libertação dos vapores formados durante o aquecimento. Mesmo para um betão com relação água/cimento na ordem dos 0,4 e agregados termicamente estáveis, o spalling explosivo continua a manifestar-se devido ao teor de partículas ativas ultrafinas que são adicionadas à pasta de cimento Portland (uma vez que para se obter um betão de alta resistência é necessário acrescentar aditivos minerais ou adjuvantes). Essas partículas preenchem os espaços vazios entre os grãos de cimento, tornando a estrutura da matriz mais compacta. A grande compactidade é a principal causa do spalling explosivo [14, 15].

Bazant e Kaplan demonstraram que como os coeficientes de dilatação térmica dos agregados e da pasta de cimento não são iguais, as variações de temperatura provocam movimentos térmicos diferenciais na massa do betão, o que pode produzir microfissuras ou até o surgimento do spalling [16].

Deste modo, os estudos realizados para analisar os efeitos das altas temperaturas nas propriedades mecânicas do betão conduziram a conclusões semelhantes: sob o efeito de altas temperaturas a resistência do betão diminui e desenvolvem-se condições propícias para o surgimento do spalling – nomeadamente no betão de alta resistência.

Nesta comunicação são descritas quais as alterações provocadas pela temperatura nas propriedades mecânicas residuais após incêndio do betão normal - resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e módulo de elasticidade - e confrontadas com resultados existentes em bibliografia técnica para betão normal e betão de alta resistência.

O programa experimental estabelecido para avaliação das propriedades mecânicas residuais do betão normal após ciclos de aquecimento/arrefecimento foi realizado no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra.

Os procedimentos experimentais comportaram quatro etapas: uma primeira que pretendeu testar a resistência residual à compressão do betão; a segunda para caracterizar a resistência residual à tração do

betão; a terceira para definir resistência residual de flexão; a quarta para determinar a redução do módulo de elasticidade do betão. Todos os ensaios foram realizados após situação de incêndio.

Neste sentido, o trabalho laboratorial realizado compreendeu o estudo de duas composições de betão usadas na construção civil nacional, uma constituída por agregados calcários e outra por agregados graníticos. Os diferentes provetes de betão foram submetidos a dois tipos de arrefecimento (lento ao ar e brusco por jato água), dois níveis de carregamento ( $0,3f_{cd}$  e  $0,7f_{cd}$ ) e diferentes níveis de temperatura (20, 300, 500 e 700°C).

## 2. RESISTÊNCIA RESIDUAL À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos através do programa experimental desenvolvido permitem concluir que a resistência residual à compressão do betão diminui em função da temperatura máxima a que este esteve sujeito. Esta diminuição depende dos níveis de carga considerados, tipos de arrefecimento testados e de agregados estudados (agregados calcários (BC) e agregados graníticos (BG)), como se pode observar na Figura 1. Para níveis de temperatura superiores aos 300°C, os provetes de BC submetidos a um nível de carregamento de  $0,3f_{cd}$  apresentaram uma maior redução da resistência residual à compressão.

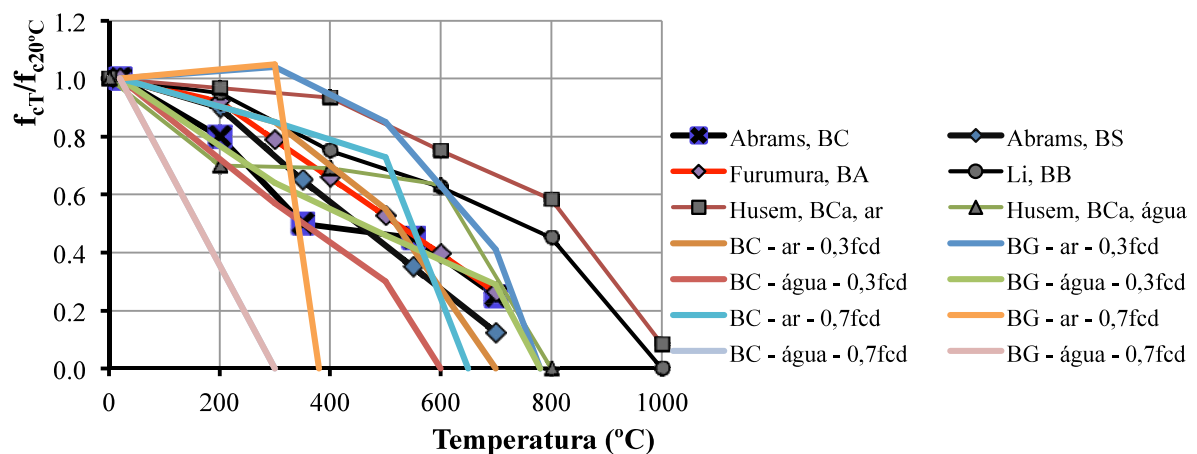


Figura 1. Resistência residual à compressão – comparação entre o betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão normal da literatura existente [17, 18, 19, 20].

Verifica-se que o nível de carga de  $0,7f_{cd}$  é favorável para o BC uma vez que permite reduzir a perda de resistência residual à compressão em função da temperatura máxima a que o betão esteve sujeito.

Para o BC, arrefecimento ao ar, considerando o nível de temperatura de 300°C, a resistência residual à compressão sofre um decréscimo na ordem dos 15% para ambos os níveis de carregamento. Na gama dos 500°C a redução foi de 45% para o nível de carga de  $0,3f_{cd}$  e 30% para  $0,7f_{cd}$ . Os provetes submetidos a temperaturas de 600°C sofreram rotura durante a fase de estabilização da temperatura, logo a resistência residual à compressão foi considerada nula. Alguns autores indicam valores de resistência para o nível de temperatura de 600°C, situação que não aconteceu com este betão. Este facto deve-se aos agregados usados na composição do betão que apresentam alguma instabilidade para estes níveis de temperatura (Figura 1).

A resistência residual à compressão para o nível de carregamento de  $0,7f_{cd}$  é substancialmente melhor no caso de agregados graníticos até aos  $300^{\circ}\text{C}$ , situação que se inverte para níveis superiores de temperatura. Aos  $500^{\circ}\text{C}$  o BC ainda apresenta 73% de resistência residual à compressão, enquanto o BG apresenta uma perda total da resistência.

Na Figura 1 compararam-se os resultados obtidos por outros autores com os obtidos no estudo realizado pelos autores desta comunicação, doravante designados por autores, relativamente à resistência residual à compressão de diferentes tipos de betão. Os resultados mostram que os betões ensaiados apresentam comportamento semelhante: observa-se a redução do valor da resistência residual à compressão com o aumento da temperatura.

Abrams testou a influência da temperatura sobre a resistência à compressão do betão normal. Realizou ensaios residuais sem carregamento durante o processo de aquecimento. Nos seus estudos utilizou betão constituído por agregados siliciosos (BS) e betão constituído por agregados de calcário (BC). Para o efeito utilizou provetes cilíndricos ( $15 \times 7,5$  cm), os quais foram submetidos a diferentes níveis de temperatura (no intervalo de 21 a  $871^{\circ}\text{C}$ ). Seguidamente os provetes foram arrefecidos lentamente ao ar até à temperatura ambiente. Após sete dias mantidos à temperatura ambiente foram submetidos ao ensaio de compressão.

Os resultados obtidos mostraram uma perda de resistência residual à compressão à medida que a temperatura aumentava. No entanto, essa perda foi mais elevada no betão constituído por agregados calcários (cerca de 40% da resistência residual à compressão) do que no betão constituído por agregados siliciosos (cerca de 30% da resistência residual à compressão) para temperaturas da ordem dos  $300^{\circ}\text{C}$ . Situação que se inverteu para temperaturas na ordem dos  $700^{\circ}\text{C}$ : enquanto o betão de agregados de calcário perdeu cerca de 75% da sua resistência residual à compressão, o betão constituído por agregados siliciosos perdeu 90% da sua resistência residual à compressão [17].

Comparando os procedimentos seguidos por Abrams com os do presente estudo, verifica-se que em ambos os trabalhos se testou o arrefecimento ao ar. No entanto, sublinham-se algumas diferenças de procedimento e de materiais. Os agregados usados nas misturas de Abrams não são da mesma constituição dos usados pelos autores. Por outro lado, os ensaios de Abrams foram realizados sem carregamento durante a fase de aquecimento enquanto os ensaios realizados pelos autores foram com carregamento ( $0,3$  e  $0,7f_{cd}$ ) durante a fase de aquecimento. As divergências que se verificam entre os valores obtidos por Abrams e os valores obtidos nos betões ensaiados pelos autores podem-se justificar pelas diferentes variáveis consideradas. Saliente-se o facto de o carregamento poder ser considerado um fator prejudicial à resistência residual à compressão do betão, bem como o tipo de agregado utilizado e respetivo comportamento quando submetido a temperaturas elevadas.

Furumura estudou o efeito da temperatura na resistência residual à compressão e no módulo de elasticidade no betão normal constituído por agregados de arenito (BA). Os provetes foram aquecidos lentamente e arrefecidos ao ar [18].

Os resultados obtidos por Furumura para o betão normal de agregados de arenito (BA) (resistência à compressão de 21MPa) são comparados com os resultados obtidos para o BC estudado pelos autores, para o arrefecimento ao ar e 30% de nível de carregamento. Na Figura 1 verifica-se que a curva do betão BA testado por Furumura segue a do BC estudado pelos autores para temperaturas até cerca de  $500^{\circ}\text{C}$ . Após esta temperatura, o BC sofre uma redução súbita na resistência residual à compressão em comparação com o BA, sendo o valor nulo para o BC e cerca de 25% para o BA.

Li et al realizaram estudos com betão normal constituído por agregados de basalto (BB), com uma resistência à compressão de 42,5MPa. Os autores testaram vários níveis de temperatura (200, 400, 600, 800 e 1000°C), efetuando os ensaios de modo residual após arrefecimento ao ar. Os ensaios foram realizados sem carregamento durante a fase de aquecimento [19].

Os resultados obtidos por estes autores são similares aos obtidos no presente estudo: até níveis de temperatura de 300°C, o comportamento do betão utilizado nos estudos de Li et al é semelhante ao do BC estudado pelos autores, embora o BG apresente um comportamento melhorado. A partir dos 700°C, o comportamento do betão basáltico é mais satisfatório do que o comportamento do BC e BG. As diferenças de valores obtidas entre os dois estudos podem-se justificar pelo facto de no presente estudo os ensaios terem sido efetuados com carregamento durante a fase de aquecimento e também pela diferente classe de resistência à compressão do betão assim como a sua constituição.

Husem desenvolveu estudos com betão normal (resistência à compressão de 34MPa), para determinar a influência da temperatura e do processo de arrefecimento na resistência residual à compressão do betão. O autor utilizou agregados calcários (BCa) e testou diferentes níveis de temperatura (200, 400, 600, 800 e 1000°C). Alguns provetes foram arrefecidos ao ar e outros por jato de água [20].

Nos estudos de Husem verificou-se que aos 300°C o betão calcário perdeu apenas 5% da resistência residual à compressão quando arrefecido ao ar e 30% quando arrefecido por jato de água. Para o nível de temperatura de 700°C, Husem verificou que o betão perdeu 30% da resistência residual à compressão quando arrefecido ao ar e 70% quando arrefecido por jato de água. No betão de estudo pelos autores, para este nível de temperatura e qualquer nível de carregamento e tipo de arrefecimento, o betão apresentou valores nulos para a resistência residual à compressão.

No que diz respeito ao betão de alta resistência este regista perdas significativas na resistência residual à compressão à medida que a temperatura aumenta. Este betão caracteriza-se por apresentar uma baixa relação água/cimento e por conter adições que, embora o tornem mais resistente, lhe conferem uma baixa permeabilidade. Em situação de incêndio, a reduzida permeabilidade dificulta a capacidade do vapor se libertar dos poros conduzindo ao aumento da pressão no interior da pasta de cimento. O aumento de pressão de vapor vai-se elevando à medida que a temperatura aumenta até que no limite os esforços internos são muito elevados causando o spalling.

A resistência residual à compressão no betão de alta resistência diminui à medida que a temperatura aumenta, tal como o comprovam vários estudos experimentais levados a efeito sobre esta temática (Figura 2).

Castillo e Durrani efetuaram um estudo com betão de alta resistência, submetido a vários níveis de temperatura (dos 100°C até aos 800°C) e com uma taxa de aquecimento de 7 a 8°C/min. Uns provetes foram ensaiados com um nível de carregamento de  $0,4f_{cd}$  enquanto outros provetes foram ensaiados sem carregamento. Concluíram que, para temperaturas superiores a 400°C, o betão tem um comportamento similar independentemente do nível de carregamento. Porém, para temperaturas entre 200 e 400°C o comportamento altera-se, apresentando os provetes carregados uma maior degradação da resistência à compressão. Constataram ainda que quanto maior for a resistência do betão maior será o seu grau de degradação em função das altas temperaturas. Esta constatação pode justificar-se pela maior compacidade que o betão de alta resistência apresenta [12].

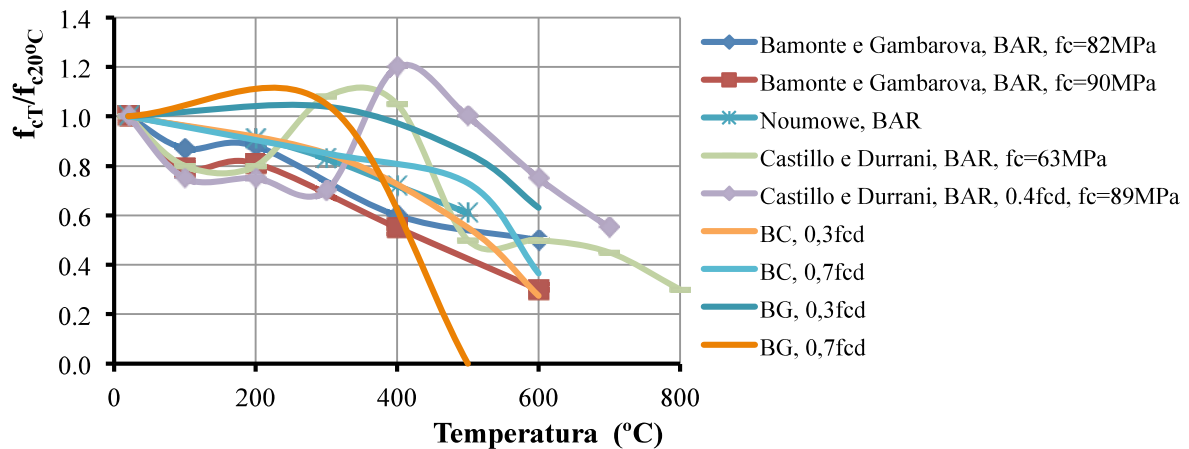


Figura 2. Resistência residual à compressão – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão de alta resistência da literatura existente [12, 21, 23].

Noumowe estudou a variação da resistência residual à compressão do betão de alta resistência e do betão normal em função da temperatura. Os ensaios foram realizados para uma taxa de aquecimento de 1°C/min. Da análise dos resultados, observou-se uma degradação da resistência residual à compressão similar para ambos os betões logo a partir da temperatura ambiente [21].

Long, Phan e Carino também testaram betões de resistência normal e de alta resistência. Os ensaios foram realizados em dois tipos de provetes prismáticos (100x100x100mm e 80x275x500mm) e dois tipos de provetes cilíndricos (diâmetro 28 mm e 160mm, altura 52mm e 320mm) para taxas de aquecimento entre 0,2 a 32°C/min. Foram realizados ensaios com e sem carregamento durante o aquecimento. Estes autores observaram durante o aquecimento uma maior degradação da resistência à compressão do betão de alta resistência em comparação com o betão normal, quer nos ensaios com carregamento, quer nos ensaios sem carregamento. Até aos 400°C, as perdas de resistência à compressão são maiores no betão de alta resistência. Acima dos 400°C, a perda de resistência é similar para ambos os betões [3, 14].

Pimienta estudou um betão de resistência normal e três betões de alta resistência. Da análise dos resultados verificou, à semelhança dos autores anteriores, uma redução da resistência à compressão do betão em função da temperatura, sendo esta mais notória para os betões de alta resistência principalmente a partir dos 300°C [22].

### 3. RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO

De acordo com a Figura 3 e, independentemente do nível de temperatura atingido, no caso dos betões ensaiados pelos autores, o betão normal constituído por agregados graníticos (BG) apresentou um comportamento mais satisfatório para a resistência residual à tração direta do que o betão normal com agregados calcários (BC). A resistência à tração direta diminui em função da temperatura máxima que o betão foi submetido. No entanto, esta redução é mais significativa no BC.

Se compararmos os resultados obtidos nos trabalhos experimentais levados a cabo por outros autores com os resultados obtidos neste estudo experimental verificamos que os valores obtidos evidenciam

uma diminuição da resistência residual à tração com o aumento da temperatura, como mostra graficamente a Figura 3.

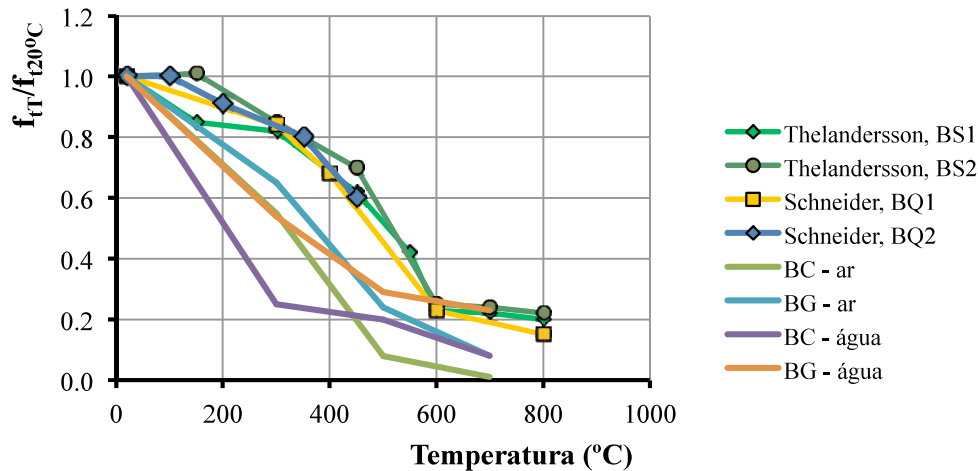


Figura 3. Resistência residual à tração – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão normal da literatura existente [2, 24].

Os resultados de um trabalho de investigação realizado por Thelandersson são objeto de comparação com os do presente estudo. Thelandersson testou dois tipos de betão constituídos por agregados siliciosos de resistência à compressão à temperatura ambiente de 25MPa (BS1) e 40MPa (BS2). Alguns provetes de betão foram submetidos a uma taxa de aquecimento elevada e outros a uma taxa mais baixa levando a um aquecimento lento. Quando atingida a temperatura de ensaio, os provetes foram arrefecidos lentamente ao ar no interior do forno até à temperatura ambiente. Os provetes foram aquecidos e arrefecidos sem carregamento. Verifica-se que o betão testado por Thelandersson apresentou um comportamento semelhante relativamente à redução da resistência residual à tração direta com a temperatura, ainda que essa redução tenha sido menor do que a obtida para o betão estudado pelos autores [24].

Thelandersson constatou que no intervalo de 0 – 300°C os dois tipos de betão testados perdem cerca de 20% da resistência residual à tração, enquanto no intervalo dos 300 – 600°C assiste-se a uma perda drástica de resistência à medida que a temperatura aumenta, perdendo aproximadamente 70 a 80% da sua resistência residual à tração. Thelandersson justifica esta diminuição devido ao efeito da desidratação do clínquer na pasta de cimento, à incompatibilidade térmica entre o cimento, a pasta e os agregados e devido à transformação do quartzo aos 575°C.

Comparando os resultados de Thelandersson com os obtidos pelos autores, verifica-se uma perda da resistência residual à tração mais significativa no betão destes para todos os níveis de temperatura. Tal facto pode-se justificar pela diferença de agregados estudados e pelo facto dos autores terem realizado os ensaios com carregamento durante a fase de aquecimento.

Os resultados de um trabalho de investigação realizado por Schneider também são comparáveis com os dos betões ensaiados pelos autores. Schneider estudou um betão constituído por agregados de quartzo com resistências à compressão à temperatura ambiente de 21.5MPa (BQ1) e 40.8MPa (BQ2) [2].

O trabalho desenvolvido por Schneider apresenta valores similares aos obtidos por Thelandersson. Aos 300°C as duas classes de betão perdem cerca de 15% da sua resistência residual à tração e aos 600°C perdem aproximadamente 75%. Tais valores apresentam-se similares aos obtidos no presente trabalho verificando-se, no entanto, uma perda mais acentuada justificada pelas diferenças da constituição do betão e pelo facto de se aplicar uma carga de compressão aos provetes durante a fase de aquecimento.

Da análise da Figura 4 verifica-se que a resistência residual à tração diminui à medida que a temperatura aumenta para todo o tipo de betão. Consta-se ainda que a resistência à tração varia de forma similar para os betões em estudo.

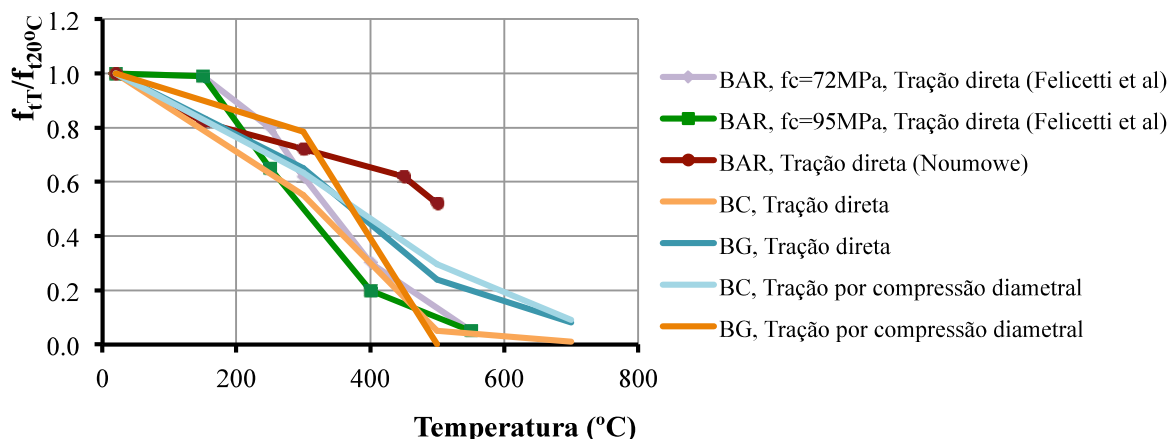


Figura 4. Resistência residual à tração – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão de alta resistência da literatura existente [5, 21].

#### 4. RESISTÊNCIA RESIDUAL À FLEXÃO

A resistência à flexão diminui com o aumento da temperatura. A Figura 5 mostra que, para o nível de temperatura de 400°C, o betão estudado pelos autores perde cerca de 41% da resistência residual à flexão. Até este nível de temperatura, o betão granítico (BG) tem um melhor comportamento que o betão calcário (BC). Para temperaturas acima dos 400°C, o BC apresenta uma maior resistência à residual flexão que o BG.

Os resultados dos betões ensaiados pelos autores são comparados com os de Li et al. Estes autores realizaram ensaios de resistência residual à flexão em betão constituído por agregados de basalto (BB). Os provetes foram aquecidos seguindo uma curva de aquecimento semelhante à curva ISO 834 e arrefecidos lentamente ao ar dentro do forno [19].

Comparando os resultados de Li et al com o BG estudado pelos autores, caso de arrefecimento ao ar, os valores da resistência residual à flexão foram semelhantes até 300°C e, após este nível de temperatura, os valores do BG diminuíram de forma brusca enquanto os valores do BB diminuíram lentamente.

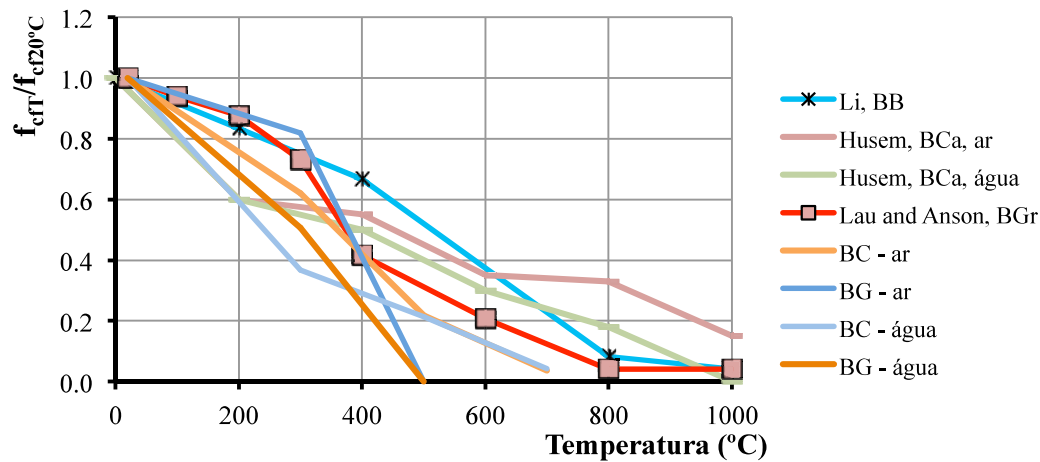


Figura 5. Resistência residual à flexão – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão normal da literatura existente [19, 20, 25].

Os resultados do BC estudado pelos autores são também comparáveis com os de Husem (betão arrefecido ao ar (BCa, ar) e em água (BCa, água)) [20]. No caso de arrefecimento ao ar o BC sofreu uma menor diminuição da resistência residual à flexão até aos 300°C. Após esta temperatura a diminuição do valor desta propriedade mecânica foi muito maior que no caso do betão ensaiado por Husem. No caso de arrefecimento por jato de água, a diminuição da resistência residual à flexão do betão ensaiado por Husem foi semelhante à diminuição apresentada pelo BC até aos 200°C. Para temperaturas superiores, a diminuição em função da temperatura foi maior para o BC do que para o betão ensaiado por Husem.

Lau e Anson realizaram ensaios para determinar a resistência residual à flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para betões normais e de alta resistência constituídos por agregados de granito, com e sem fibras de aço. Os provetes depois de aquecidos foram arrefecidos lentamente ao ar [25]. Os resultados da resistência residual à flexão do betão normal constituído por agregados de granito (BGr) ( $f_{cd} = 39\text{MPa}$ ) ensaiado por Lau e Anson são comparáveis com os do BG, arrefecido ao ar, ensaiado pelos autores. O betão de Lau e Anson apresenta valores muito semelhantes aos valores do BG até temperaturas de 400°C, após esta temperatura o BG apresentou uma grande redução sendo o valor nulo aos 500°C e o BGr apresentou uma redução pouco acentuada, sendo o valor quase nulo apenas aos 1000°C.

Da análise da Figura 5 e da Figura 6 verifica-se que, para temperaturas baixas (até níveis de 250°C), quanto maior a resistência do betão melhor é o seu comportamento relativamente à resistência à flexão. Situação que se inverte para temperaturas acima dos 250°C, em que quanto mais resistente for o betão maior é a redução da resistência à flexão. Por exemplo, para temperaturas de 400°C, o betão de alta resistência de  $f_{cd} = 60\text{MPa}$  apresenta cerca de 80% da resistência residual à flexão, enquanto o betão de alta resistência de  $f_{cd} = 70\text{MPa}$  só apresenta cerca de 45% de resistência residual à flexão.

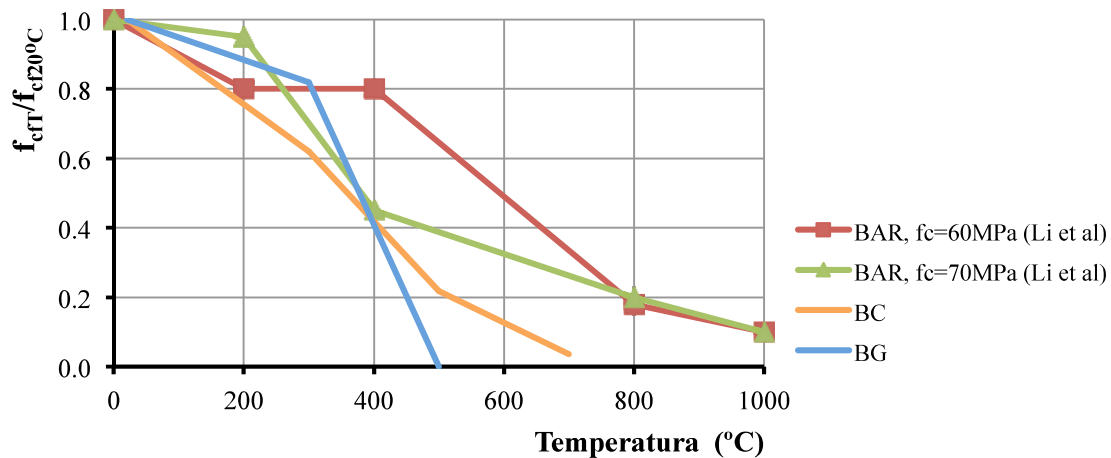


Figura 6. Resistência residual à flexão – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão de alta resistência da literatura existente [19].

## 5. MÓDULO DE ELASTICIDADE RESIDUAL

Na Figura 7 comparam-se os resultados obtidos no presente estudo experimental com os obtidos por outros autores. Consta-se que as curvas têm um desenvolvimento descendente similar, o que significa que a temperatura influencia a redução do módulo de elasticidade residual do betão. No entanto, o tipo de agregado do betão não é uma variável relevante na variação desta propriedade.

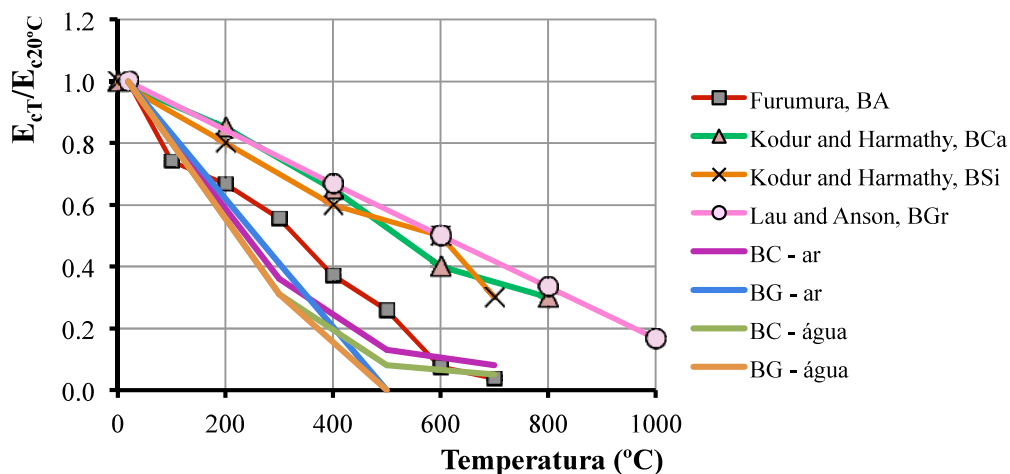


Figura 7. Módulo de elasticidade residual – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão normal da literatura existente [18, 25, 26].

O módulo de elasticidade atinge valores muito baixos para níveis de temperaturas acima de 500°C. Verifica-se que o betão calcário (BC) e o betão granítico (BG), estudado pelos autores, apresentam um comportamento similar para temperaturas até 350°C. Por exemplo, para o nível de 300°C, o BC apresenta ainda 36% do seu módulo de elasticidade residual e o BG apresenta 41%. Acima deste nível

de temperatura o BC apresenta um melhor desempenho, aos 500°C apresenta cerca de 13% e aos 700°C apresenta 8% do seu módulo de elasticidade residual (Figura 7).

Todavia, os provetes constituídos por BG, para níveis de temperatura igual ou superior a 500°C, apresentam valores nulos para o módulo de elasticidade residual, uma vez que os provetes durante o processo de aquecimento sofreram fissuração e spalling. Este facto justifica-se devido ao baixo grau de porosidade que os agregados graníticos apresentam [17]. Deste modo, conclui-se que o BC tem um comportamento mais satisfatório que o BG para temperaturas superiores a 500°C.

Os resultados do módulo de elasticidade residual obtidos por Furumura em betão normal constituído por agregados de arenito (BA) são comparáveis neste trabalho com os do BC, arrefecidos ao ar. A forma da curva de variação do módulo de elasticidade residual em função da temperatura é semelhante para ambos os betões, no entanto entre os 200 e os 600°C o betão estudado por Furumura apresentou uma diminuição menor que o BC [18].

Kodur e Harmathy apresentaram os resultados do módulo de elasticidade residual de um betão normal constituído por agregados siliciosos (BSi) e de um betão normal constituído por agregados de calcário (BCa) [26]. O BSi e o BCa são comparáveis com o BG e BC, ensaiado pelos autores, para o arrefecimento ao ar, respetivamente (Figura 7). A diminuição desta propriedade mecânica em função da temperatura apresentou-se muito semelhante para ambos os betões ensaiados por Kodur e Harmathy e menor para os betões ensaiados no presente estudo.

Os resultados do módulo de elasticidade residual do betão granito (BGr) ensaiado por Lau e Anson [25] são comparáveis com os resultados obtidos para o betão BG ensaiado neste trabalho. Os resultados de Lau e Anson são muito semelhantes aos de Kodur e Harmathy.

Na Figura 8, faz-se uma comparação dos betões ensaiados pelos autores, para arrefecimento ao ar, com betões de alta resistência ensaiados por Furumura [18] e verifica-se que o módulo de elasticidade diminui à medida que a temperatura aumenta independentemente do tipo de betão. Consta-se ainda que, até aos 400°C, a classe de resistência do betão é uma variável a ter em conta no estudo do módulo de elasticidade residual, uma vez que quanto maior for a resistência do betão, melhor é o seu comportamento quando comparado com betões de resistência inferior. A partir dos 400°C o módulo de elasticidade varia de forma similar para os betões em estudo.

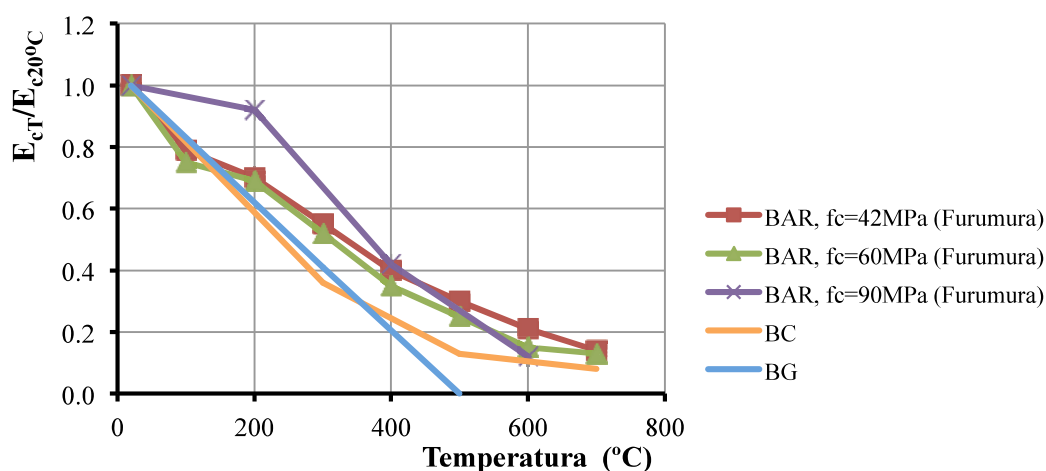


Figura 8. Módulo de elasticidade residual – comparação entre betão calcário (BC), betão granítico (BG) e betão de alta resistência da literatura existente [18].

## 6. CONCLUSÕES

As temperaturas elevadas interferem negativamente no comportamento residual do betão, conduzindo a uma redução das suas propriedades mecânicas. Esta relação temperatura-degradação da resistência verifica-se tanto no betão normal como no betão de alta resistência, embora os valores obtidos nos diferentes estudos demonstrem que o betão de alta resistência é mais afetado. Assim, a redução da resistência à compressão residual apresenta valores mais significativos no betão de alta resistência, logo a partir dos 100°C, enquanto o mesmo só se verifica no betão normal para níveis de temperatura mais elevados.

A resistência residual à tração do betão diminui à medida que a temperatura a que este esteve sujeito aumenta. Este dado não se pode dissociar da constituição do betão (quantidades da mistura e natureza dos agregados), dado que as transformações térmicas sofridas nos seus constituintes interferem negativamente na capacidade resistente à tração. No entanto esta redução é mais significativa no betão constituído por agregados calcários.

A resistência residual à flexão diminui com o aumento da temperatura independentemente do tipo de betão. No entanto, o uso de agregados de calcário apresenta um comportamento melhor quando comparado com os agregados de granito.

De igual modo, o aumento da temperatura provoca a redução do módulo de elasticidade residual do betão. A constituição do betão bem como a classe de resistência não interferem significativamente na redução desta propriedade.

Tanto a resistência à compressão como o módulo de elasticidade residuais diminuem com o aumento da temperatura. No entanto essa diminuição é menor quando o betão está sob o efeito de carregamento, desde que não excessivo, apresentando o módulo de elasticidade residual maiores índices de redução que a resistência residual à compressão.

As propriedades do betão de alta resistência, nomeadamente a grande densidade e a baixa permeabilidade, fazem com que este tipo de betão apresente uma diminuta resistência mecânica com as altas temperaturas, ocorrendo danos significativos. O aparecimento do spalling, resultante quer da ação das forças de origem térmica provocadas por fortes oscilações de temperatura, quer da acumulação da pressão de vapor no interior do betão, é um dos principais riscos resultantes da exposição do betão a altas temperaturas.

É neste sentido que se têm vindo a realizar trabalhos experimentais com o objetivo de otimizar o comportamento do betão de alta resistência com a temperatura, atuando essencialmente na melhoria das propriedades como a compacidade e a permeabilidade as quais afetam negativamente o seu desempenho em situação de incêndio. Para o efeito alguns investigadores sugerem a adição de fibras de modo a atuar positivamente nas características do betão conduzindo a uma melhoria das suas propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Ghan, Y. N. et al. - *Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Composites, vol.21, 1999, pp. 23-27.
- [2] Schneider, U. – *Behaviour of concrete at high temperatures*. Ed. Beuth, Berlim, 1982, 122 p.

- [3] Phan, L.T.; Carino, N.J.- *Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, USA, vol.10, 1998, p. 58-64.
- [4] Smith, L.M. – *The assessment of fire damage to concrete structure*. Thesis, Paisley College of Technology, vol.2, 1983.
- [5] Felicetti, R.; Gambarova, P.G. - *The Residual Tensile Properties of Performance Siliceous Concrete Exposed to High Temperature*. Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures, HERMES Science Publications, Paris, 1999, p. 167-186.
- [6] Diederichs, U.; Jumppanen, U.M.; Schneider, U. - *High temperature properties and spalling behavior of high strength concrete*. Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design, Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB), Weimar, Germany, 1995, p. 219-236.
- [7] Kodur, V.K.R.; Sultan, M.A. - *Structural behavior of high strength concrete columns exposed to fire*. Proceedings of International Symposium on High Performance and Reactive Powder, Sherbrooke, QC, 1998, p. 217-232.
- [8] Phan, L.T.; Carino, N.J. - *Fire performance of High Strength Concrete*. ASCE/SEI structures congress, Philadelphia, 2000, 9 p.
- [9] Cheng, F.P.; Kodur, V.K.R., Wange, T.C. - *Stress–strain curves for high strength concrete at elevated temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, vol.16, 2004, p. 84–90.
- [10] Chan, Y.N.; Luo, X.; Sun, W. - *Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C*. Cement and Concrete Composites, vol.30, 2000, p. 247–251.
- [11] Chan, Y.N. et al - *Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Composites, vol.21, 1999, p. 23-27.
- [12] Castillo C, Durrani A.J. - *Effect of transient high temperature on high-strength concrete*. ACI Mater J, 1990, p. 47-53.
- [13] Jahren, P.A. - *Fire resistance of high strength/dense concrete with particular references to the use of condensed silica fume – a review*. In Proceedings of the Third International Conference, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-114, Detroit, USA, 1989, p. 1013-1049.
- [14] Hager, I. - *Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques*. Tese de Doutorado, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2004, 183 p.
- [15] Aitcin, P.C.- *The durability characteristics of high performance concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, vol.25, 2003, p. 409-420.
- [16] Bazant, P.Z., Kaplan, M.F. - *Concrete at high temperatures. Material, properties and mathematical models*. England, 1996, 412 p.
- [17] Abrams, M. - *Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F”*. American Concrete Institute, SP-25, Temperature and Concrete, Detroit, 1971, p. 33-58.
- [18] Furumura, F. - *Mechanical Properties of HSC at High Temperatures*. Proceedings, 4th Weimar Workshop on HSC: Material Properties and Design, Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB), Weimar, Germany, 1995, p. 237-254.
- [19] Li, M. et al. – *Mechanical properties of high-strength concrete after fire*. Cement and Concrete Research, vol.34, 2004, p. 1001–1005.
- [20] Husem, M. - *The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete*. Fire Safety Journal, vol. 41, 2006, p. 155-163.

- [21] Noumowe et al. – *Transient heating effect on high strength concrete*, Nuclear Engineering and Design, Elsevier, vol.235, 1996, p. 99–108.
- [22] Pimienta, P.; Hager, I. - *Mechanical behaviour of HPC at high temperature*. 6th International Symposium on Utilisation of High Strength/high Performance Concrete. Leipzig, 2002, p. 16-20.
- [23] Bamonte, P.; Gambarova, P. G. – *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, 2007, p. 59-68.
- [24] Thelandersson, S. - *Effect of high temperatures on tensile strength of concrete*. Lund Institute of Technology, Div. of Structural Mechanical and Concrete Construction, Neostyled, 1971, 27 p.
- [25] Lau A., Anson M. - *Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete*. Cement and Concrete Research, vol.36, no.9, 2006, p. 1698-1707.
- [26] Kodur, V. R.; Harmathy, T. Z. - *Properties of building materials*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd edition, P.J. DiNenno, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 155-180.