

PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE BETÕES NORMAIS E DE ALTA RESISTÊNCIA APÓS INCÊNDIO



Cristina Calmeiro dos Santos

Eq. Prof. Adjunto
Instituto Politécnico de Castelo Branco,
Portugal.
ccalmeiro@ipcb.pt



João Paulo C. Rodrigues

Professor,
Universidade de Coimbra, Portugal.
jpaulocr@dec.uc.pt

SUMÁRIO

O efeito das altas temperaturas no betão traduz-se numa diminuição das suas propriedades mecânicas residuais. Tal redução verifica-se quer no betão normal quer no betão de alta resistência. Neste estudo são apresentadas as alterações provocadas pela temperatura nas propriedades residuais - resistência à compressão, resistência à tracção, resistência à flexão e módulo de elasticidade - obtidas em ensaios experimentais com betão normal e confrontadas com os resultados existentes em bibliografia técnica de betão de alta resistência.

Palavras-chave: betão normal; betão de alta resistência; fogo; resistência; residual.

1. INTRODUÇÃO

Os vários estudos que têm vindo a ser desenvolvidos com betão de resistência normal mostram que as altas temperaturas degradam as 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 aquando submetido a elevadas temperaturas, permitindo assim a comparação com as alterações produzidas no betão normal.

Felicetti e Gambarova, entre outros, realizaram ensaios experimentais com betão de resistência normal, constatando que o comportamento à compressão do betão é profundamente afectado com o aumento da temperatura, principalmente no intervalo dos 100 aos 800°C. Mostraram ainda que com o aumento da temperatura os ramos ascendente e descendente do diagrama tensão-deformação tendem a igualar-se e 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.

Com o intuito de compreender as diferenças existentes entre o comportamento do betão normal e do betão de alta resistência, Diederichs, Kodur e Phan efectuaram estudos que lhes permitiram constatar a existência de diferenças bem definidas entre as propriedades destes dois tipos de betão sob o efeito de temperaturas elevadas. Mostraram 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 susceptível ao fenómeno spalling [3, 6, 7].

Phan e Kodur consideram que o spalling sofrido pelos betões de alta resistência, em condições de incêndio, é preocupante. O spalling deve-se essencialmente à baixa relação água/cimento. Este fenómeno gera uma perda de betão durante o incêndio, expondo as camadas mais profundas do betão a temperaturas elevadas, aumentando assim a taxa de transmissão de calor para as camadas internas da estrutura, chegando a afectar o aço [3, 8-12].

Os estudos efectuados por estes autores permitiram estabelecer três intervalos de temperatura em função do efeito na perda de resistência do betão. 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 capacidade 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 térmico do betão.

Ainda que ambos os betões sofram uma diminuição da sua capacidade resistente em situação de incêndio, resultados de ensaios experimentais conduzidos por vários autores mostram que 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 brusco da temperatura como acontece em situação de incêndio [13-15].

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 activas ultrafinas que são adicionadas à pasta de cimento Portland (uma vez que para se obter um betão de alta resistência é necessário adicionar 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 [16].

Autores como Bazant e Kaplan constataram 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 [17].

Deste modo, os diversos estudos realizados para estudar 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.

Neste artigo são apresentadas as alterações provocadas pela temperatura nas propriedades residuais do betão normal - resistência à compressão e módulo de elasticidade - e confrontadas com resultados existentes em bibliografia técnica de betão de alta resistência.

2. RESISTÊNCIA RESIDUAL À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos através do programa experimental desenvolvido permite concluir que a resistência residual à compressão do betão diminui em função da temperatura máxima a que este esteve sujeito. Esta diminuição é semelhante até aos 300°C para os níveis de carga considerados (0,3f_{cd} e 0,7f_{cd}) e para os dois tipos de agregados estudados (agregados calcários (BNC) e agregados graníticos (BNG)), como se pode observar na Fig. 1.

Para níveis de temperatura superiores aos 300°C, os provetes de betão calcário submetidos a um nível de carregamento de 0,3f_{cd} apresentaram uma maior redução da resistência residual à compressão. Verifica-se assim que o nível de carga de 0,7f_{cd} é mais favorável para o caso do betão calcário 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 betão calcário e 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}. Todos 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 (Fig. 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°C, situação que se inverte para níveis superiores de temperatura. Aos 500°C o betão calcário ainda apresenta 73% de resistência residual à compressão, enquanto o betão granítico apresenta uma perda total da sua capacidade de carga (Fig. 1).

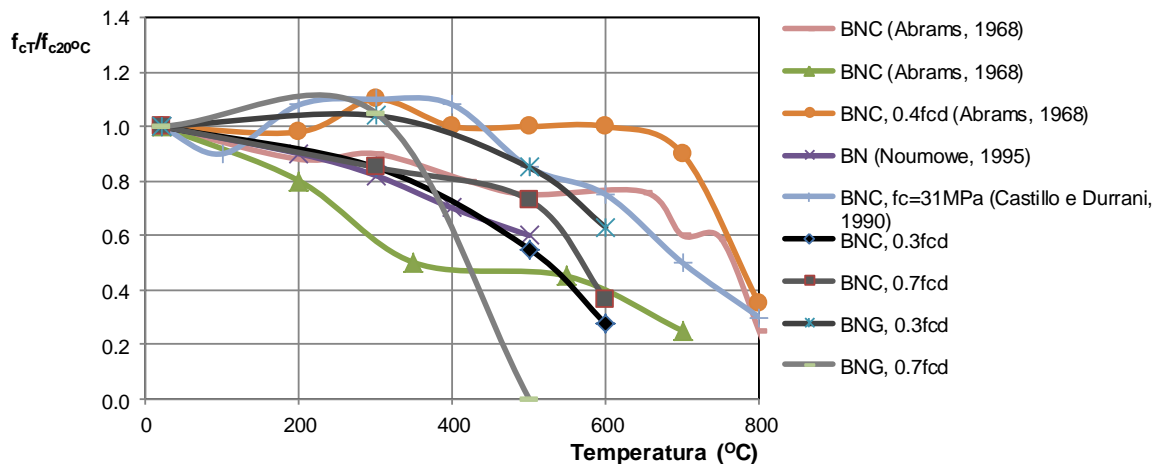


Figura 1. Resistência residual à compressão – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão normal da literatura existente [13, 15, 20].

Assim, pode-se afirmar que a natureza dos agregados afecta a degradação do betão. O uso de agregados graníticos associado ao nível de carregamento 0,3f_{cd}, aumenta em 30% a resistência residual à compressão aos 500°C quando comparado com o uso de agregados calcários (Fig. 1).

A Figura 1 mostra os resultados obtidos por outros autores relativamente à resistência à compressão residual de diferentes tipos de betão normal. Estes resultados mostram que o betão testado apresenta um comportamento similar, o valor residual da resistência à compressão diminui à medida que a temperatura aumenta. Além disso, os valores obtidos no estudo experimental apresentado seguem o mesmo padrão.

Autores como Khoury e Algar sublinham a influência benéfica do carregamento no betão normal sujeito a altas temperaturas, dado que coloca o betão em compressão compacta durante o aquecimento inibindo o desenvolvimento de fissuras. Verificaram que para o betão submetido ao aquecimento com carregamento até 20% da carga, a influência negativa da temperatura nas propriedades mecânicas do betão pode ser significativamente atenuada [18].

O efeito das elevadas temperaturas na resistência à compressão do betão normal depende essencialmente, segundo Schneider, dos seguintes factores: a relação agregado-cimento, sendo a redução menos significativa para misturas pobres em cimento; os diferentes tipos de agregados constituintes do betão, verificando-se um melhor comportamento no betão com agregados calcários e de densidade leve quando comparado com o betão de agregados siliciosos; a velocidade e o tipo de arrefecimento aplicado, constatando-se que os valores residuais da resistência à compressão são mais baixos que os valores equivalentes da resistência a altas temperaturas [19].

A diversidade de bibliografia existente sobre o comportamento do betão de alta resistência quando submetido a temperaturas elevadas apresenta resultados muito semelhantes. A resistência residual à compressão regista perdas significativas 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.

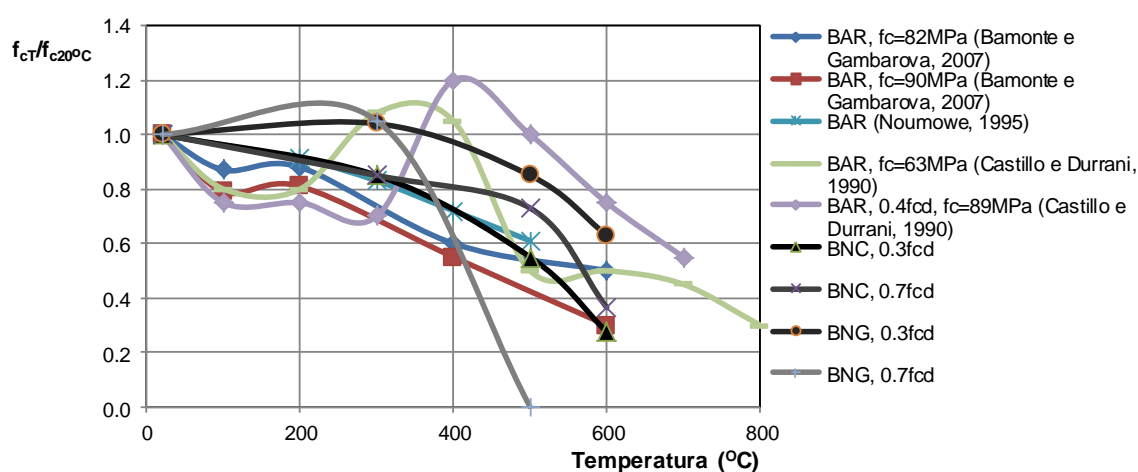


Figura 2. Resistência residual à compressão – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão de alta resistência da literatura existente [13, 20, 23].

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. As variações observadas pelos autores são graficamente apresentadas na Fig. 2.

Castillo e Durrani efectuaram 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 [13].

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 uma degradação da resistência residual à compressão similar para ambos os betões logo a partir da temperatura ambiente [20].

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 [9, 15, 21].

Pimenta 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 TRACÇÃO

De acordo com a Figura 3 e, independentemente do nível de temperatura atingido, o betão normal constituído por agregados graníticos apresentou um comportamento mais satisfatório para a resistência residual à tracção directa do que o betão normal com agregados calcários. A resistência à tracção directa diminui em função da temperatura máxima que o betão foi submetido. No entanto, esta redução é mais significativa em betão calcário.

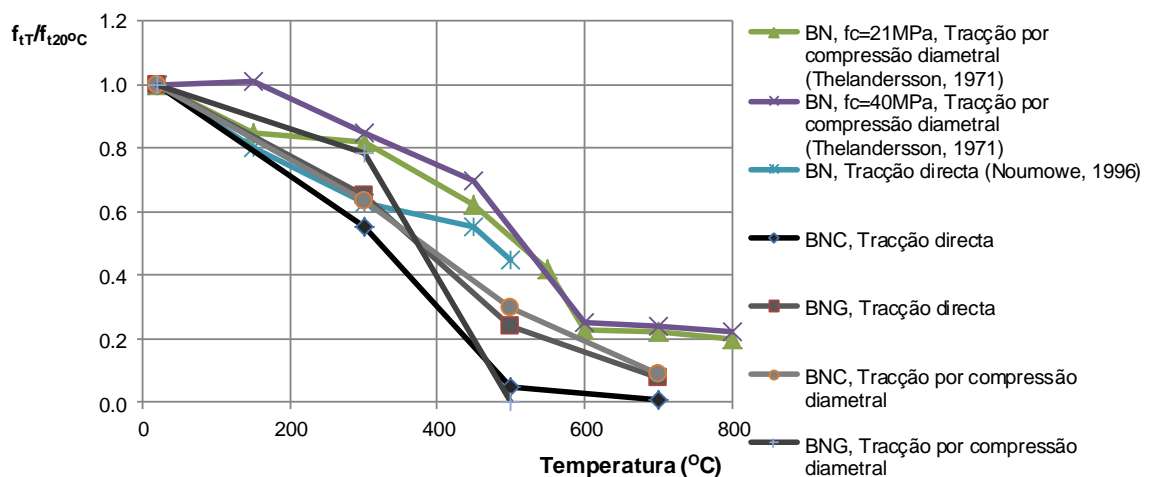


Figura 3. Resistência residual à tracção – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão normal da literatura existente [15, 20].

A Figura 3 mostra graficamente o comportamento à tracção de diferentes tipos de betão normal estudados por diversos autores. Observa-se uma diminuição desta propriedade, semelhante aos resultados obtidos nos trabalhos experimentais desenvolvidos, isto significa que à medida que a temperatura aumenta, diminui a resistência à tracção.

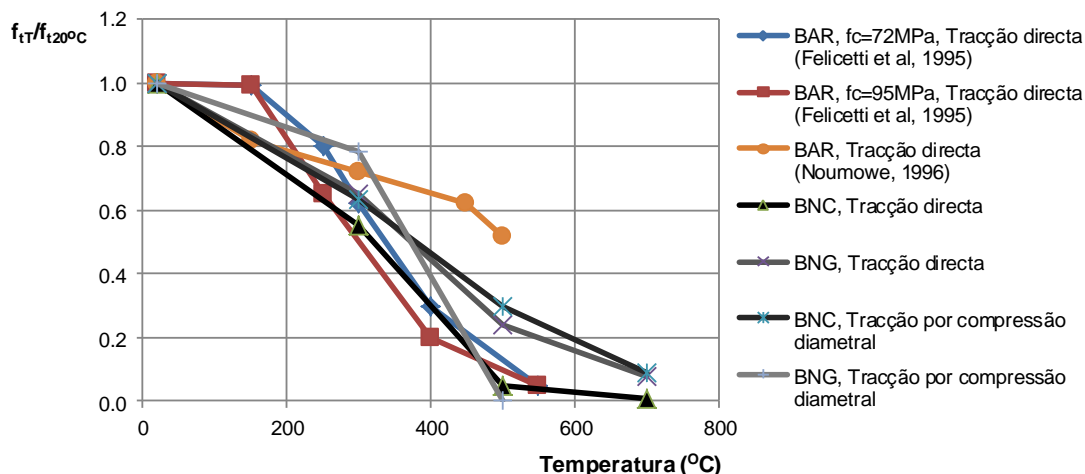


Figura 4. Resistência residual à tracção – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão de alta resistência da literatura existente [15, 20].

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

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 normal estudado perde cerca de 41% da resistência residual à flexão. Até este nível de temperatura, o betão granítico tem um melhor comportamento que o betão calcário. Para temperaturas acima dos 400°C, o betão calcário apresenta uma maior resistência à flexão que o betão granítico.

A Fig. 5 mostra que o betão normal da literatura, $f_c=40\text{MPa}$, apresenta uma perda de resistência à flexão quase linear à medida que a temperatura aumenta. Comportamento similar ao do betão calcário estudado. Verifica-se que aos 400°C, o betão normal estudado, quer o calcário quer o granítico, apresenta apenas cerca de 41% da sua resistência à flexão residual e o betão normal da literatura ainda tem cerca de 65%. Tal facto justifica-se pela mais baixa resistência que o betão normal em estudo apresenta ($f_c=37\text{MPa}$).

Da análise da Fig. 5 e da Fig. 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 $f_c=60\text{MPa}$ apresenta cerca de 80% da capacidade residual à flexão, enquanto o betão de alta resistência de $f_c=70\text{MPa}$ só apresenta cerca de 45% da sua capacidade residual à flexão.

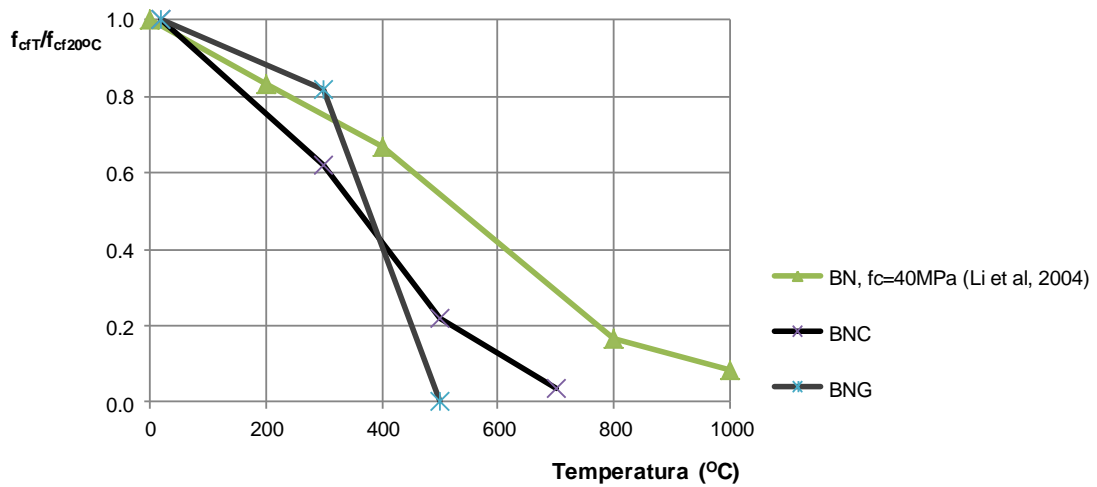


Figura 5. Resistência residual à flexão – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão normal da literatura existente [26].

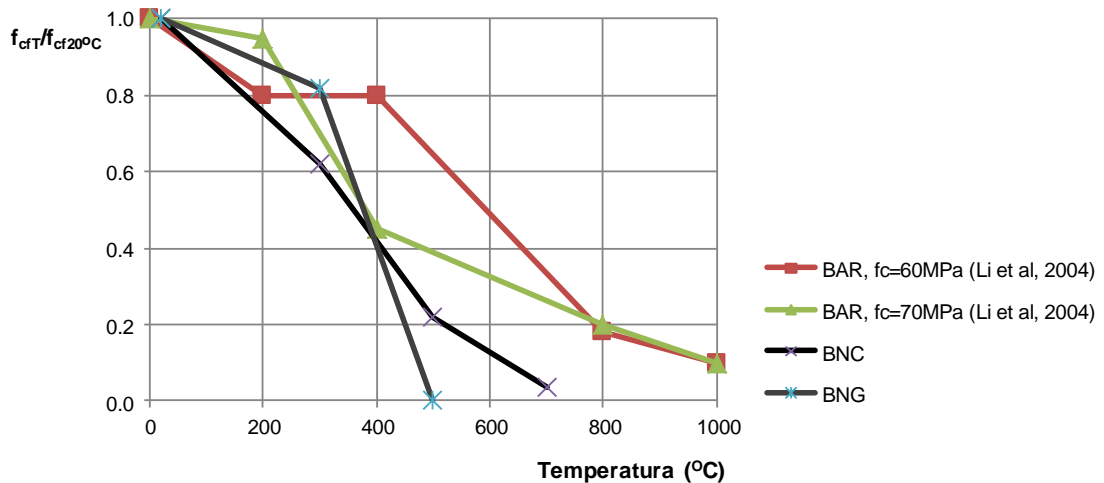


Figura 6. Resistência residual à flexão – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão de alta resistência da literatura existente [26].

5. MÓDULO DE ELASTICIDADE RESIDUAL

A variação do módulo de elasticidade do betão em estudo (Fig. 7 e 8) decresce com o aumento da temperatura. O módulo de elasticidade atinge valores muito baixos para níveis de temperaturas acima de 500°C . Verifica-se que o betão calcário e o betão granítico apresentam um comportamento similar para temperaturas até 350°C . Por exemplo, para o nível de 300°C , o betão calcário apresenta ainda 36% do seu módulo de elasticidade residual e o granítico apresenta 41%. Acima deste nível de temperatura o betão calcário apresenta um melhor desempenho, aos 500°C apresenta cerca de 13% e aos 700°C 8% do seu módulo de elasticidade residual.

Todavia, os provetes constituídos por betão granítico, 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. Esse facto justifica-se devido ao baixo grau de porosidade que os agregados graníticos apresentam [18]. Deste modo, conclui-se que o betão calcário tem um comportamento mais satisfatório que o betão granítico para temperaturas superiores a 500°C.

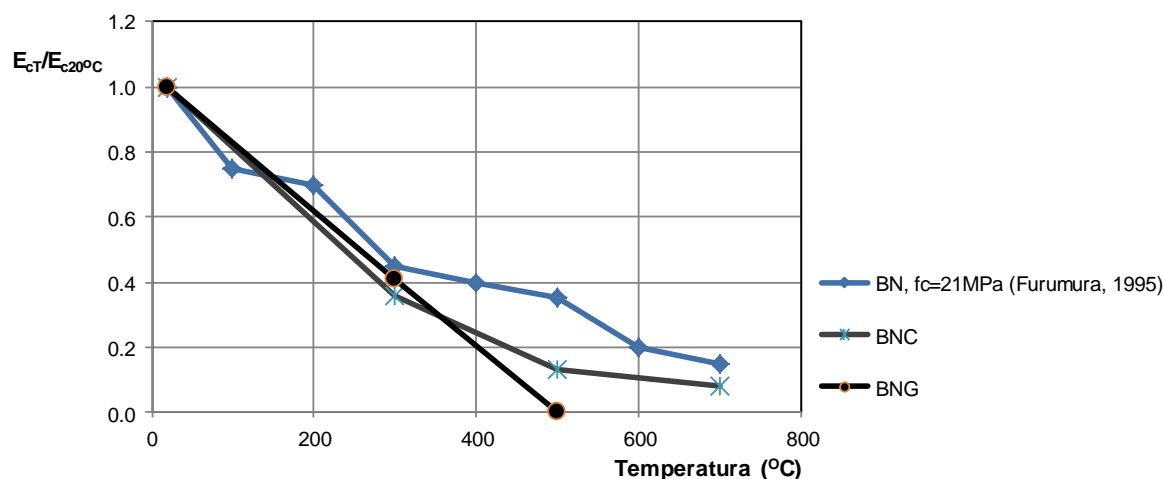


Figura 7. Módulo de elasticidade residual – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão normal da literatura existente [24].

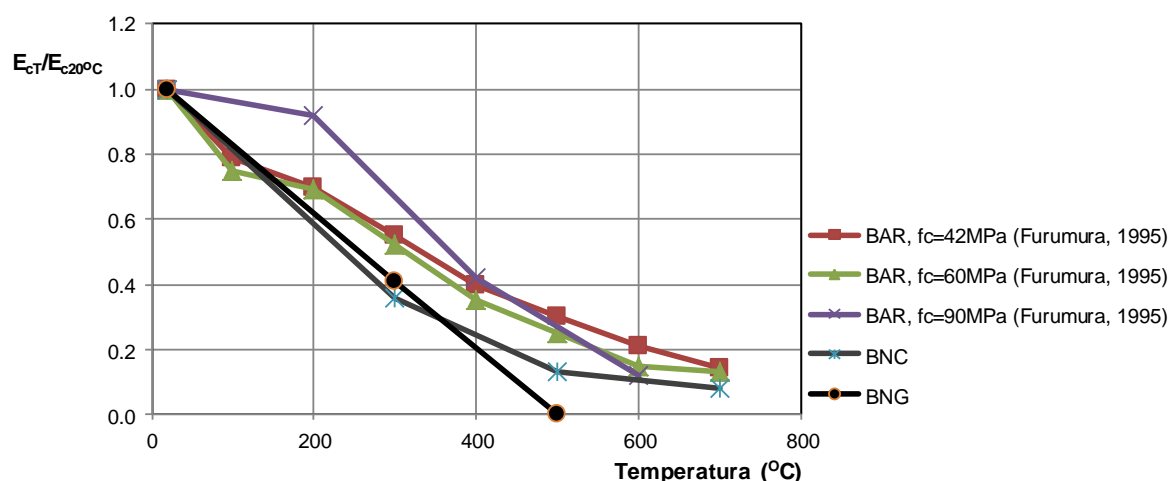


Figura 8. Módulo de elasticidade residual – comparação entre betão calcário (BNC), betão granítico (BNG) e betão de alta resistência da literatura existente [24].

Da análise da Fig. 8 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.

O aumento da temperatura afecta as propriedades elásticas do betão, conduzindo à redução do módulo de elasticidade. Ensaio realizados em provetes de betão aquecidos a 300°C levaram a uma redução de 40% no módulo de elasticidade, redução esta que subiu para 85% aos 600°C [4].

Furumura e outros investigadores realizaram ensaios para a determinação do módulo de elasticidade residual do betão. Estes ensaios foram realizados em provetes cilíndricos (diâmetro de 50mm e altura de 100mm) de betão de resistência normal e de alta resistência. A taxa de aquecimento aplicada foi de 1°C/min. Concluíram que a redução do módulo de elasticidade residual é independente da classe de resistência do betão [24].

Phan e Carino apresentam uma comparação da variação do módulo de elasticidade para vários tipos de betões, submetidos a altas temperaturas, sem carregamento durante a fase de aquecimento e arrefecimento. Observaram que a redução do módulo de elasticidade em função da temperatura é muito mais acentuada para os betões de alta resistência do que para os betões de resistência normal testados [9].

Lau e M. Anson realizaram um estudo com betões normais e de alta resistência sujeitos a altas temperaturas. Concluíram que, à semelhança dos autores anteriores, a redução do módulo de elasticidade em função da temperatura é muito mais acentuada para os betões de alta resistência do que para os betões de resistência normal [25].

6. CONCLUSÕES

A temperatura é uma variável que interfere 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 características melhoradas, embora os valores obtidos nos diferentes estudos demonstrem que o betão de alta resistência é mais afectado. Assim, a redução da resistência à compressão residual apresenta valores mais significativos no betão de alta resistência, no qual se verifica uma redução da tensão para valores de temperatura desde os 100°C, enquanto o mesmo só se verifica no betão normal para níveis de temperatura mais elevados.

A resistência residual à tracção do betão diminui à medida que a temperatura a que 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 tracção. No entanto esta redução é mais significativa no betão constituído por agregados calcários.

A resistência 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 diminuem com o aumento da temperatura. No entanto essa diminuição é menor quando o betão está sob o efeito de carregamento, apresentando o módulo de elasticidade maiores índices de redução que a resistência 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 ao fogo, ocorrendo danos significativos sob a acção de temperaturas elevadas. O aparecimento do spalling, resultante quer da acção das forças térmicas 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 objectivo de otimizar o comportamento do betão de alta resistência com a temperatura, actuando essencialmente na melhoria das propriedades como a compacidade e a permeabilidade as quais afectam negativamente o seu desempenho em situação de incêndio. Para o efeito alguns investigadores sugerem a adição de fibras de modo a actuar positivamente nas características químicas do betão conduzindo a uma melhoria das suas propriedades mecânicas.

6. 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, p. 23-27.
- [2] Schneider, U. - *Behaviour of concrete at high temperatures*. Edited by Beuth, Berlin, 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, American Society of Civil Engineers, vol.10, 1998, p. 58-64.
- [4] Smith, L.M. - The assessment of fire damage to concrete structure. Thesis, Paisley College of Thecnology, supplied by the British Lybrary, 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. - *Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature*. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, vol.10, 1998, p. 58-64.
- [9] Phan, L.T.; Carino, N.J. - *Fire performance of High Strength Concrete*. ASCE/SEI structures congress, Philadelphia, 2000, 9 p.
- [10] Cheng, F.P.; Kodurz, 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Castillo C, Durrani A.J. - *Effect of transient high temperature on high-strength concrete*. ACI Mater J, 1990, p. 47-53.
- [14] 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, AC1 SP-114, Detroit, USA, 1989, p. 1013-1049.
- [15] Hager, I. - *Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques*. Tese de Doutoramento, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2004, 183 p.
- [16] Aitcin, P.C.- *The durability characteristics of high performance concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, vol.25, 2003, p. 409-420.
- [17] Bazant, P.Z., Kaplan, M.F. - *Concrete at high temperatures. Material, properties and mathematical models*. England, 1996, 412 p.
- [18] Khoury, G A. - *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment*. Magazine of Concrete Research, vol.44, 1992, p. 291-309.
- [19] Schneider, U. - *Concrete at high temperatures – general review*. Fire safety journal, vol.13, no.1, 1988, p. 55-68.

- [20] Noumowe et al. – *Transient heating effect on high strength concrete*, Nuclear Engineering and Design, Elsevier, vol.235, 1996, p. 99–108.
- [21] Chan, S. Y. N.; Sun, X. L. - *Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete*. Construction and Building Materials, vol.14, 2000, p. 261–266.
- [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] Furumura, F. - *Mechanical Properties of HSC at High Temperatures*. Proceedings, 4th Weimar Workshop on HSC: Material Properties and Design, Hochschule fur Architekturund Bauwesen (HAB), Weimar, Germany, 1995, p. 237-254.
- [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] Li, M. et al. – *Mechanical properties of high-strength concrete after fire*. Cement and Concrete Research, vol.34, 2004, p. 1001–1005.