

2º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio
Coimbra, Portugal, 29 de Maio a 1 de Junho, 2013

PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE BETÕES CORRENTES APÓS INCÊNDIO



**Cristina Calmeiro
dos Santos**

Professor Adjunto
Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Portugal



**João Paulo C.
Rodrigues***

Professor
UC - Coimbra
Portugal

Palavras-chave: betão; incêndio; propriedades mecânicas; residual.

SUMÁRIO

Com o objetivo de contribuir para uma melhor compreensão do comportamento do betão corrente submetido a elevadas temperaturas, desenvolveu-se um estudo experimental para avaliação das propriedades mecânicas residuais após ciclos de aquecimento/arrefecimento. Neste sentido, o trabalho laboratorial realizado compreendeu ensaios de resistência à compressão, resistência à tração direta, resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão e módulo de elasticidade. Estudaram-se duas composições de betão usadas na construção civil, uma constituída por agregados calcários (BC) e outra por agregados graníticos (BG). 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). Os resultados deste programa experimental mostram que a temperatura interfere negativamente no comportamento residual do betão, assim como o processo de arrefecimento aplicado, dado que quanto mais brusco este for maiores são os danos causados.

1. INTRODUÇÃO

O betão sujeito a temperaturas elevadas perde resistência. Propriedades como a resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade diminuem significativamente com a temperatura. Schneider demonstrou que o tipo de agregado, as condições de aquecimento/arrefecimento e o teor de humidade são os fatores com maior influência nas propriedades dos materiais constituintes do betão [1].

* Autor correspondente — Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Rua Luís Reis Santos. Polo II da Universidade. 3030-788 Coimbra. PORTUGAL. Telef.: +351 239 797237 Fax: +351 239 797242. e-mail: jpaulocr@dec.uc.pt

O comportamento das estruturas constituídas por materiais de matriz cimentícia é influenciado pela interação dos elementos constituintes do material e pelo estado de tensão-deformação aplicado, com a consequente possibilidade dos materiais fendilharem. As microfendas surgem essencialmente ao nível da pasta de cimento e ao nível da interface entre os agregados e a pasta de cimento, tendendo a desenvolver-se e degenerar em bandas de fendilhação (razão pela qual o betão tem um comportamento não linear) [2].

Mazars realizou ensaios de compressão efetuados com carregamento e descarga que permitiram verificar uma perda das propriedades mecânicas e deformações residuais devido à fissuração do betão [3]. A seleção do tipo de ensaio a aplicar deve ser determinada em função das condições reais que se pretendem simular. Assim, se os ensaios realizados a quente permitem avaliar o comportamento do betão em situação de incêndio, os ensaios realizados após arrefecimento mostram o comportamento do betão na situação de extinção do incêndio. Estes últimos apresentam-se importantes no estudo das propriedades residuais do betão (resistência, permeabilidade, módulo de elasticidade) [4 - 7]. Neste estudo realizaram-se ensaios durante a fase de arrefecimento, permitindo acompanhar a evolução da propriedade em estudo e analisar a influência das condições de arrefecimento como, por exemplo, a taxa de arrefecimento e o efeito do choque térmico.

O processo de extinção do incêndio também interfere na capacidade de resistência residual das estruturas de betão, como mostrou Schneider e Nägele [8]. A perda de resistência do betão quando arrefecido mediante jato de água é maior do que quando arrefecido ao ar. O processo de arrefecimento do betão pode levar ao surgimento de fissuração. Estes ensaios podem ser realizados imediatamente após o arrefecimento ou algum tempo após o mesmo [9].

No Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade de Coimbra desenvolveu-se um programa experimental para avaliar a influência do processo de extinção do incêndio na capacidade resistente residual das estruturas de betão normal. Estudaram-se duas composições de betão, uma constituída por agregados calcários e outra constituída por agregados graníticos, tendo-se realizado os seguintes ensaios: resistência à compressão; resistência à tração direta; resistência à tração com compressão diametral; resistência à flexão e módulo de elasticidade.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Composição do betão e provetes

As composições do betão quer com agregados calcários quer com agregados graníticos utilizaram cimento Portland (CEM) tipo II/A-L 42,5R (composição química: $SO_3 \leq 4\%$ e $Cl \leq 0.10\%$; resistência à compressão: 2 dias - 20MPa e 28 dias - 42.5MPa), superplastificante (SP) SIKA (Sikament®195R) e quatro tipos de agregados: areia fina (A1), areia grossa (A2), Brita 1 (B1) com a dimensão máxima de 12,7mm e Brita 2 (B2) com a dimensão máxima de 19,1mm. As proporções da mistura são apresentadas no Quadro 1.

Os provetes foram mantidos durante 24 horas na zona de betonagem, ou seja, em ambiente de laboratório, de modo a adquirirem endurecimento suficiente (presa) para poderem ser descofrados e transportados até à zona de cura. O período de cura foi de 28 dias. Para

determinar a classe de resistência do betão de acordo com a NP EN 206-1 [10], foram realizados ensaios de compressão após cura, cujos resultados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1: Composição do betão com agregados calcários (BC) e com agregados graníticos (BG) por m³

Composição do betão	CEM [Kg]	Água [dm ³]	SP [dm ³]	A1 [Kg]	A2 [Kg]	B1 [Kg]	B2 [Kg]	A/C
BC	300	166	3,30	364	495	505	377	0,56
BG	320	165	3,20	310	511	617	459	0,52

Quadro 2: Resultados dos ensaios de compressão do betão com agregados calcários (BC) e com agregados graníticos (BG)

Tipo de betão	f _c [MPa]	f _{cm} [MPa]	Classe de Resistência
BC	45,4	44,05	C30/37
	43,8		
	43,0		
BG	40,6	40,23	C30/37
	39,4		
	40,7		

O estudo da resistência residual à compressão e da resistência residual à tração direta foi realizado em provetes cilíndricos com 225mm de altura e 75mm de diâmetro, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. Para controlar a evolução da temperatura no interior dos provetes, estes foram providos com cinco termopares tipo K. A localização dos termopares nos provetes foi definida tendo por base as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [11] (Figura 1).

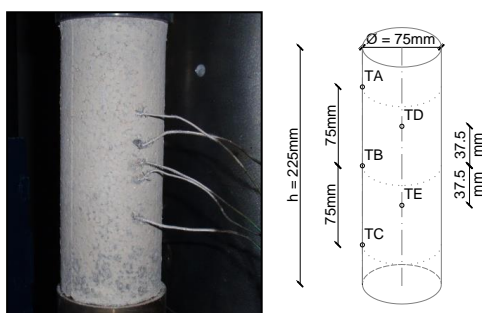


Figura 1: Provetes para o ensaio de resistência residual à compressão e à tração direta e localização dos termopares

Na determinação da resistência residual à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade residual utilizaram-se provetes cilíndricos com 150mm de diâmetro e 300mm de altura (Figura 2). Foram respeitadas as orientações da NP EN 12390-6 e do RILEM TC - 129 MHT [12, 13]. Para cada um dos níveis de temperatura a estudar foi testado um provete com termopares para monitorizar a evolução da temperatura no seu interior. A localização dos

termopares nos provetes foi definida tendo por base as recomendações do RILEM TC - 200 HTC [11] (Figura 2). Para medir o módulo de elasticidade residual foram aplicados três extensómetros em diretrizes diametralmente opostas do provete (TML tipo PFL-30-11).

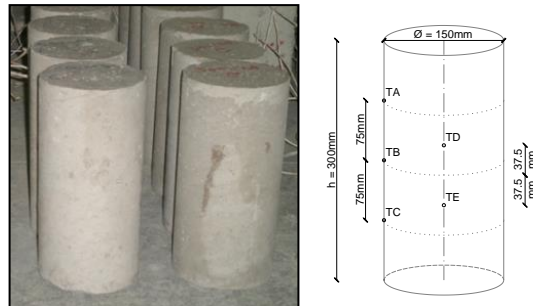


Figura 2: Provetes para o ensaio de resistência residual à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade e localização dos termopares

Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em provetes prismáticos com 150mm de lado e 600mm de altura em conformidade com a NP EN 12390-5 [14]. Um provete por cada série de ensaios foi provido com cinco termopares tipo K para controlar a evolução da temperatura no seu interior (Figura 3).

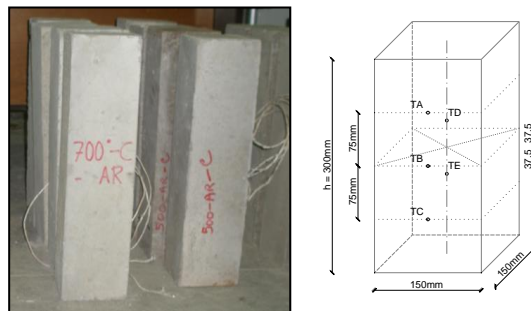


Figura 3: Provetes para o ensaio de resistência residual à flexão e localização dos termopares

2.2 Plano de ensaio

O trabalho experimental realizou-se em três fases: na primeira fase procedeu-se à preparação de todo o material necessário para a realização dos ensaios, obtenção de agregados a serem incorporados, bem como areia e cimento. A segunda fase experimental teve por objetivo avaliar os diferentes tipos de betões fabricados sob o ponto de vista do desempenho mecânico e da deformabilidade. A última fase do trabalho experimental foi reservada à avaliação do comportamento do betão quando exposto a diferentes níveis de temperatura máxima (300, 500, 700°C) e a diferentes níveis de carregamento (0,3 f_{cd} e 0,7 f_{cd} sendo f_{cd} o valor de cálculo da resistência à compressão do betão à temperatura ambiente). Foram realizados três ensaios por cada combinação de parâmetros.

No Quadro 3 apresentam-se resumidamente os ensaios realizados após sujeição do betão a ciclo de aquecimento/arrefecimento.

Quadro 3. Plano de ensaios

Ensaio residual	Forma e dimensões do provete [mm]	Nível de carregamento	Temperatura (°C)
resistência à compressão	cilíndrico, d=75:h=200	0,3f _{cd}	20, 300, 500, 700
		0,7f _{cd}	20, 300, 500, 700
resistência à tração direta	cilíndrico, d=75: h=200	-	20, 300, 500, 700
resistência à tração por compressão diametral	cilíndrico, d=150: h=300	-	20, 300, 500, 700
resistência à flexão	prismático, b=150: h=600	-	20, 300, 500, 700
módulo de elasticidade	cilíndrico, d=150: h=300	-	20, 300, 500, 700

2.3 Sistema e metodologia de ensaio

Para a concretização dos ensaios de resistência residual à compressão usou-se uma máquina universal de tração/compressão Servosis com capacidade de carga de 600kN, um forno cilíndrico com uma câmara de aquecimento de 90mm de diâmetro e 300mm de altura (temperatura máxima de 1200°C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530 (Figura 4a). Foram utilizados dois sistemas de ensaio similares, diferindo apenas no tipo de arrefecimento dos provetes: um conjunto de provetes foi sujeito ao arrefecimento ao ar e o outro conjunto arrefecido por jato de água (Figura 4b e 4c).

O procedimento de ensaio adotado respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 [11]. O provete foi submetido a um nível de carregamento de 0,3f_{cd} ou 0,7f_{cd}, o qual foi mantido constante durante o processo de aquecimento/arrefecimento. Quando se atingiu o nível de carregamento pretendido, o provete foi aquecido a uma taxa de 3°C/min, até ser obtido o nível de temperatura desejado. Foram testados três níveis de temperatura máxima (300, 500 e 700°C). Para controlo do betão, foram também testados provetes à temperatura ambiente.

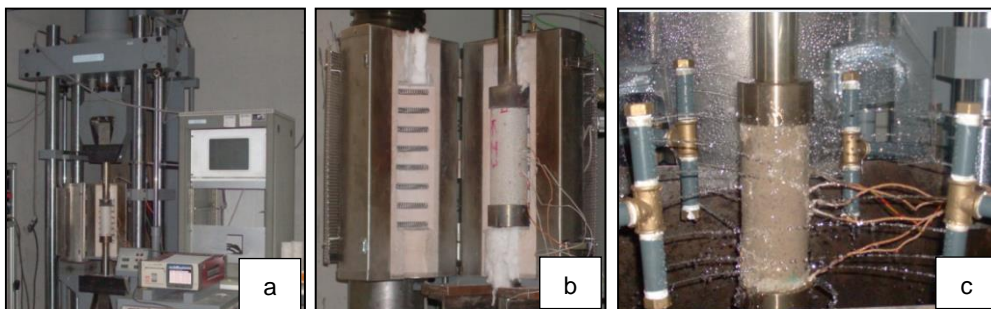


Figura 4: Resistência residual à compressão. a) Sistema de ensaio. b) Arrefecimento ao ar. c) Arrefecimento por jato de água

Considerou-se atingido o nível de temperatura desejado quando a temperatura média nos três termopares superficiais do provete em estudo igualou a temperatura do forno. A máxima

diferença da temperatura axial entre cada uma das três leituras da temperatura superficial não podia exceder 1°C aos 20°C, 5°C aos 100°C e 20°C aos 700°C. O provete foi mantido a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura, o provete foi arrefecido ao ar (Figura 4b), ou por jato de água (Figura 4c). Quando o provete atingiu a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizou-se o ensaio de compressão. A carga foi incrementada a uma taxa de 0,25kN/s até se atingir a rotura do provete.

A resistência residual à tração foi determinada recorrendo a ensaios de tração direta e a ensaios de tração por compressão diametral. Nos dois tipos de ensaios, os provetes foram aquecidos a uma taxa de 3°C/min, até se atingir o nível de temperatura pretendido. Para controlo do betão testaram-se provetes à temperatura ambiente e provetes sujeitos a três níveis de temperatura (300, 500 e 700°C). Os provetes foram mantidos à temperatura pretendida durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura, procedeu-se ao arrefecimento dos provetes. Um conjunto de provetes foram arrefecidos ao ar mediante a abertura da mufla, o outro conjunto foi arrefecido bruscamente mediante a aplicação de jatos de água. Quando se atingiu a temperatura ambiente (cerca de 20°C), realizou-se o ensaio de tração residual, aplicando uma carga de tração diretamente nos provetes, a uma taxa de 0,25kN/s, até à rotura (Figura 5).

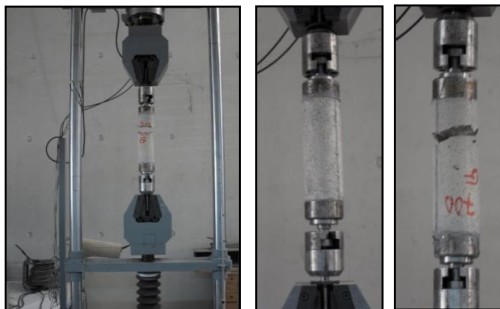


Figura 5: Resistência residual à tração direta - sistema de ensaio

Nos ensaios de resistência residual à tração direta, como se pode observar na Figura 5, utilizou-se uma máquina universal de tração Servosis com capacidade de carga até 600kN. Para submeter os provetes aos vários níveis de temperatura utilizou-se uma mufla (temperatura máxima de 1100°C). Para a aquisição de dados dos ensaios foi usado um data logger modelo TML TDS-530.

Devido à especificidade dos ensaios houve a necessidade de projetar umas peças metálicas que permitissem a ligação dos provetes à máquina do ensaio e a rotação livre dos provetes nas extremidades. A Figura 6 mostra o conjunto do sistema desenvolvido.

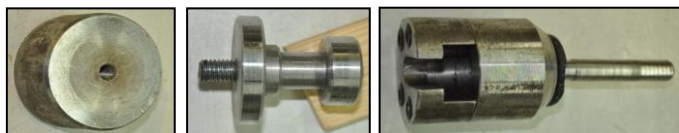


Figura 6: Resistência residual à tração direta - componentes do ensaio

Os ensaios de resistência residual à tração por compressão diametral respeitaram as orientações da NP EN 12390-6 [12]. O sistema de ensaio foi composto por uma máquina de tração universal Servosis com capacidade de carga até 600kN, um forno retangular Termolab com uma câmara de aquecimento (temperatura máxima de 1200°C) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-530 (Figura 7). Após ciclo aquecimento/arrefecimento, o provete foi colocado em posição central na máquina de ensaio e aplicanda a carga a uma velocidade constante de 0,04 a 0,06MPa/s, de forma contínua e sem choques, até à rotura do provete.



Figura 7: Resistência residual à tração por compressão diametral - sistema de ensaio



Figura 8: Resistência residual à flexão - sistema de ensaio

Os ensaios de resistência residual à flexão foram realizados seguindo a metodologia de ensaio similar à descrita para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Os ensaios foram realizados respeitando a norma NP EN 12390-5 [14]. Os ensaios efetuados foram do tipo flexão em três pontos (Figura 8). A carga foi aumentada a uma velocidade constante de 0,05MPa/s, sem choques e de forma contínua, até à rotura do provete.



Figura 9: Módulo de elasticidade residual - sistema de ensaio

O procedimento de ensaio do módulo de elasticidade residual seguiu as orientações do RILEM TC 129 - MHT [13]. O provete foi aquecido a uma taxa de 3°C/min até se atingir o nível de temperatura pretendido (300, 500 e 700°C). Após a estabilização da temperatura, os provetes foram arrefecidos (uns ao ar e outros por jato de água) e seguidamente submetidos a ensaios cíclicos, realizados sob controlo de força, para níveis de carga compreendidos entre 0,5MPa e $f_{c20^{\circ}\text{C}}/3$ da força de rotura estimada. A Figura 9 ilustra os dispositivos de ensaio utilizados.

3. RESULTADOS

Seguidamente apresenta-se a variação das propriedades mecânicas residuais do betão com agregados calcários (BC) e do betão com agregados graníticos (BG), em função da temperatura máxima de exposição, para os níveis de carregamento de $0,3f_{cd}$ e $0,7f_{cd}$.

A Figura 10 representa a variação da resistência residual à compressão do betão em função da temperatura e do nível de carga, para o arrefecimento no ar (Figura 10a) e para o arrefecimento por jato de água (Figura 10b).

Os resultados obtidos permitem concluir que, no caso do arrefecimento ao ar, a resistência residual à compressão do betão diminui em função da temperatura máxima a que esteve sujeito. Esta diminuição é semelhante até aos 300°C para os níveis de carregamento considerados ($0,3f_{cd}$ e $0,7f_{cd}$) e para os dois tipos de agregados em estudo. 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. Assim verifica-se que o nível de carregamento 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. 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 carregamento e do nível de temperatura atingido.

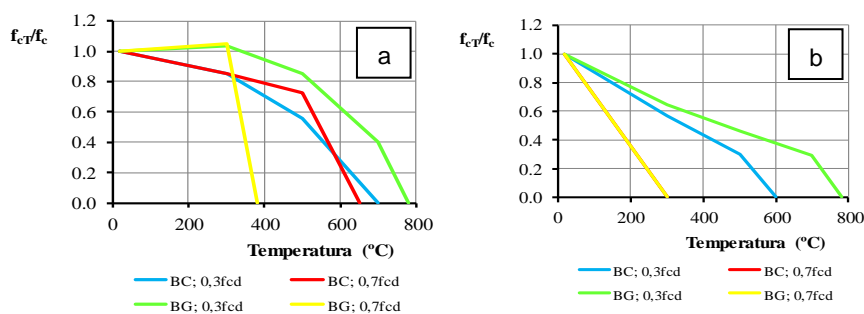


Figura 10: Resistência residual à compressão. a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jato de água

Os resultados obtidos no presente estudo são similares aos obtidos por outros autores, verificando-se a mesma tendência de diminuição da resistência residual à compressão do betão corrente com o aumento da temperatura [4, 15, 16, 17].

A Figura 11 mostra que a resistência residual à tração direta do betão diminui à medida que a temperatura a que esteve sujeito aumenta, sendo esta redução mais significativa no betão constituído por agregados calcários. Considerando os dois processos de arrefecimento aplicados, verificou-se que o betão, independentemente do tipo de agregado que o compõe, apresenta um melhor comportamento quando arrefecido ao ar do que por jato de água, em temperaturas na faixa dos 450-500°C. No entanto, esta situação inverte-se para altas temperaturas uma vez que o betão, tanto o betão calcário como o betão granítico, tem um melhor comportamento quando arrefecido por jato de água (Figura 11a e Figura 11b).

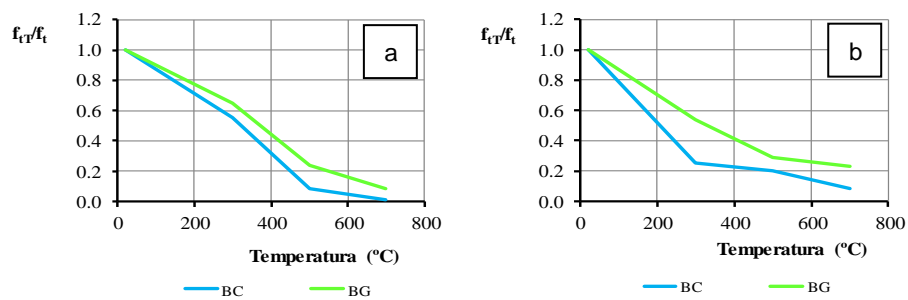


Figura 11: Resistência residual à tração direta. a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jato de água

Os valores da resistência residual à tração por compressão diametral mostram que, até temperaturas de 300°C, o betão granítico apresenta um melhor comportamento relativamente à tração por compressão diametral que o betão calcário, na situação de arrefecimento ao ar. Na situação do arrefecimento por jato de água e até temperaturas de 300°C, o comportamento do betão em estudo é muito similar. Para temperaturas superiores a 500°C verifica-se que o betão calcário tem um comportamento mais satisfatório que o betão granítico (Figura 12a e 12b).

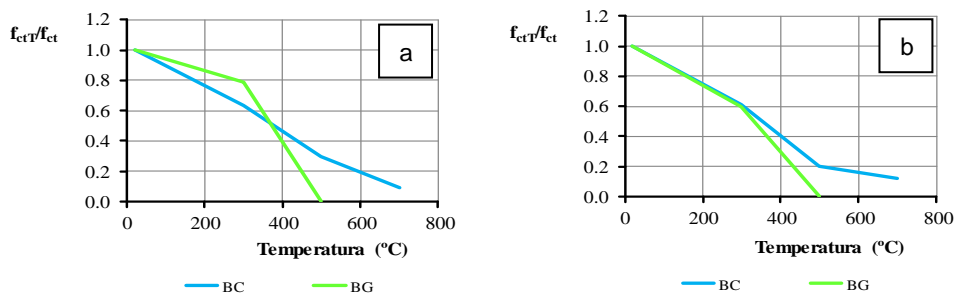


Figura 12: Resistência residual à tração por compressão diametral. a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jato de água

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 [1, 18].

A Figura 13 apresenta os valores da resistência residual à flexão. Assim, para a temperatura de 400°C, os dois tipos de betão em estudo apresentam cerca de 40% da resistência residual à flexão no caso de arrefecimento ao ar e cerca de 30% no caso de arrefecimento por jato de água. Até este nível de temperatura, o betão granítico tem um melhor comportamento que o betão calcário. Para temperaturas acima dos 500°C, o betão calcário apresenta um comportamento mais satisfatório que o betão granítico, independentemente do tipo de arrefecimento aplicado.

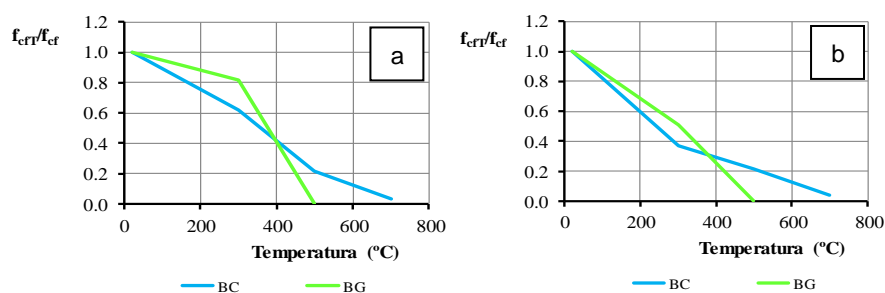


Figura 13: Resistência residual à flexão. a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jato de água

Os resultados do presente estudo são comparáveis com os obtidos por outros autores, os quais evidenciam que a resistência residual à flexão diminui com o aumento da temperatura [16, 17, 19].

A Figura 14 apresenta a variação do módulo de elasticidade residual em função do tipo de betão e do processo de arrefecimento aplicado, para os diferentes níveis de temperatura estudados. Como se verifica, o betão calcário e o betão granítico apresentam um comportamento idêntico para temperaturas até 350°C, qualquer que seja o tipo de arrefecimento aplicado. Para temperaturas superiores o betão calcário apresenta um melhor desempenho. Este desempenho é ainda mais evidente quando se aplica o arrefecimento ao ar.

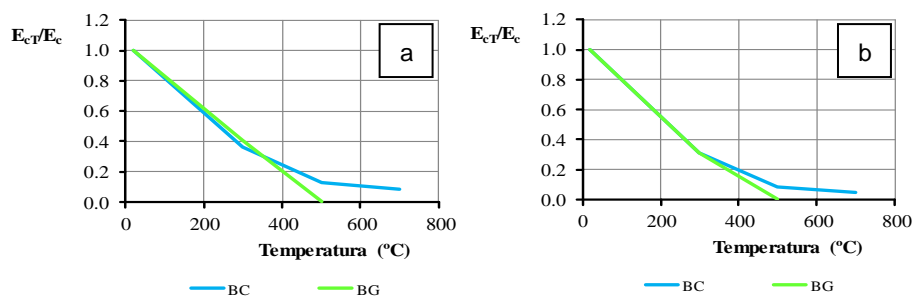


Figura 14: Módulo de elasticidade residual. a) Arrefecimento ao ar. b) Arrefecimento por jato de água

A comparação dos resultados obtidos no presente estudo experimental com os resultados obtidos por outros autores, permite constatar que a temperatura influencia a redução do módulo de elasticidade residual do betão. O tipo de agregado não é uma variável relevante na variação desta propriedade mecânica do betão [15, 19, 20].

4. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido permitiu concluir que as propriedades mecânicas residuais do betão, constituído por agregados calcários ou por agregados graníticos, sofrem alterações quando o betão é submetido a altas temperaturas. Considerando as variáveis testadas, verifica-se que:

1. a resistência à compressão do betão sofre uma redução substancial com o aumento da temperatura, nomeadamente para temperaturas acima dos 300°C;
2. o processo de arrefecimento interfere na redução da resistência à compressão do betão. 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 do nível de temperatura atingido. 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 $0,7f_{cd}$ e temperaturas acima de 400°C;
3. à medida que o nível de carga aumenta mais significativa é a influência do processo de arrefecimento na redução da resistência à compressão residual do betão. Comparando os dois processos de arrefecimento aplicados, verificou-se que essa influência é mais negativa no arrefecimento por jato de água;
4. a resistência residual à tração do betão também diminui 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, sendo essa redução é maior no betão calcário;
5. 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;
6. o módulo de elasticidade do betão diminui com o aumento da temperatura, independentemente do tipo de agregados constitutivos do betão e do método de arrefecimento aplicado (ainda que o arrefecimento por jato de água cause mais danos do que o arrefecimento ao ar).

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento à empresa Sika Portugal, S.A. pela oferta de adjuvantes e resina epóxi e à empresa Lena Agregados S.A. pelo fornecimento de agregados.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Schneider U. *Behaviour of concrete at high temperatures*. RILEM - report to committee nº 44 - PHT, Paris, 1982, 72 p.

- [2] Van Mier M. *Mode I fracture of concrete: discontinuous crack growth and crack interface grain bridging*. Cement and Concrete Research, Vol. 21, 1991, p. 1-15.
- [3] Mazars J. *A description of micro and macroscale damage of concrete structures*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 25, 1986, p. 729-737.
- [4] Abrams M. *Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F*". American Concrete Institute, SP-25, Temperature and Concrete, Detroit, 1971, p. 33-58.
- [5] Malhotra V, Wilson H, Painter K. *Performance of gravelstone concrete incorporating silica fume at elevated temperatures*. Proceedings of 1989 Trondheim, Norway. Conference, 1989, p. 1051-1076.
- [6] Diederichs U, Jumpannen U, Pentalla V. *Behavior of high strength concrete at elevated temperatures*. Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, Report 92, 1992, 72 p.
- [7] Noumowé AN. *Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances*. Doctoral Thesis, Institute National des Sciences Appliqués de Lyon, France, 1995, 231 p.
- [8] Schneider U, Nägele, E. *Repairability of fire damaged structures*. CIB W14 Report, 1989, 90 p.
- [9] Khoury GA. *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment*. Magazine of Concrete Research, Vol. 44, 1992, p. 291-309.
- [10] NP EN 206-1. *Concrete Part 1: Specification, performance, production and conformity*. 2007, 84 p.
- [11] RILEM TC - 200 HTC. *Mechanical Concrete Properties at High Temperature – Modeling and Applications*. Materials and Structures, Vol. 38, 2005, p. 913-919.
- [12] NP EN 12390-6. *Testing Hardened Concrete. Part 6: Tensile Splitting Strength of Test Specimens*. 2003, 14 p.
- [13] RILEM TC 129 - MHT. *Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures. Part 5: Modulus of Elasticity for Service and Accident Conditions*. Materials and Structures, Vol. 37, 2004, p 139-144.
- [14] NP EN 12390-5. *Testing Hardened Concrete. Part 5: Flexural Strength of Test Specimens*. 2009, 13 p.
- [15] 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.
- [16] Li, M.; Qian, C.; Sun, W. – *Mechanical properties of high-strength concrete after fire*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, p. 1001-1005.
- [17] 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.
- [18] Thelandersson, S. – *Effect of high temperatures on tensile strength of concrete*, Lund Institute of Technology, Division of Structural Mechanical and Concrete Construction, Neostyled, 1971, 27 p.
- [19] Lau, A.; Anson, M. - *Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, p. 1698-1707.
- [20] Kodur, V. R.; Harmathy, T. Z. - *Properties of building materials*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd edition, P.J. DiNunno, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 2002, p. 155-180.