

## BETÕES CORRENTES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO



**Hugo Caetano**  
Doutorando  
UC – Coimbra  
Membro do ISISE



**Cristina C. Santos**  
Professora da  
UC – Coimbra  
Membro do ISISE



**João P. Rodrigues\***  
Professor da  
UC – Coimbra  
Membro do ISISE

### RESUMO

Na área da engenharia civil, o comportamento ao fogo de estruturas de betão armado é de primordial importância no contexto da segurança estrutural, dada a probabilidade elevada de ocorrerem colapsos locais ou globais, com impactos consideráveis ao nível de perdas humanas e de prejuízos económicos. Esta temática é de tal forma importante, que desde os anos 40 que se tem vindo a estudar a influência das altas temperaturas no desempenho mecânico e térmico do betão. Neste artigo é feita uma revisão sobre as diferentes propriedades mecânicas, nomeadamente, resistência à compressão, à tração, à flexão e módulo de elasticidade, os parâmetros de que dependem e a relação entre os mesmos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Betão; altas temperaturas; propriedades mecânicas.

### 1. INTRODUÇÃO

O betão quando exposto a altas temperaturas sofre várias transformações físico-químicas que modificam a sua microestrutura causando perdas significativas na sua capacidade resistente [1]. Segundo Khoury G. A. [2] a degradação das propriedades mecânicas do betão com o aumento da temperatura pode ser atribuída a vários fatores: mudanças físico-químicas na pasta do betão; mudanças físico-químicas nos agregados; incompatibilidade térmica entre os

---

\* Autor correspondente – Dep. de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – Polo II, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra.

Telf.: +351 239 700600, Fax: +351 239 700688, E-mail: jpaulocr@dec.uc.pt

agregados e a pasta do betão; influência de outros fatores externos, nomeadamente o nível de temperatura, a taxa de aquecimento, o carregamento e as condições de fronteira entre o provete e o exterior, as quais influenciam a troca de humidade através das superfícies de exposição do provete.

Segundo Phan e Carino [3] o estudo das propriedades mecânicas do betão quando submetido a temperaturas elevadas pode ser efetuado por intermédio dos seguintes ensaios: (a) ensaio em provetes carregados durante o aquecimento; (b) ensaio em provetes não carregados durante o aquecimento; (c) ensaio de determinação das propriedades residuais em provetes não carregados durante o aquecimento e (d) ensaio de determinação das propriedades residuais em provetes carregados durante o aquecimento.

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

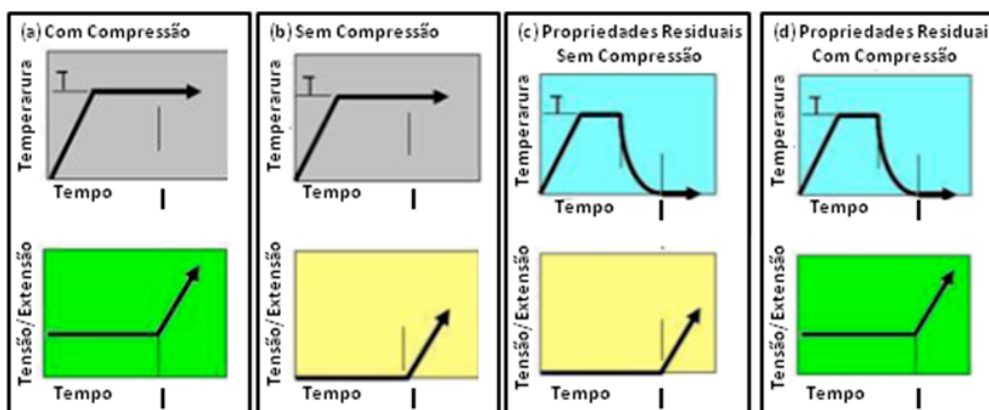


Figura 1: Regimes de temperatura e de carregamento durante os ensaios, [3].

## 2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 2.1 Resistência à Compressão

Das várias propriedades mecânicas do betão, a determinação da resistência à compressão é um dos parâmetros mais úteis no dimensionamento de uma estrutura de betão armado e pré-esforçado, pois normalmente este material é solicitado, principalmente, a esforços de compressão. Quando o betão é submetido a altas temperaturas ocorrem transformações físico-químicas que conduzem a alterações significativas das suas propriedades mecânicas.

Essas transformações devem-se a fatores como: composição do betão, a selagem do provete, as condições de humidade, o nível de carregamento durante o período de aquecimento, a taxa de aquecimento ou de arrefecimento, o tempo de exposição a temperaturas elevadas, o período de tempo após o arrefecimento antes da realização do ensaio de compressão e o número de ciclos térmicos [4]. Quando o betão é sujeito a temperaturas elevadas o volume apresenta também alterações de comportamento. Num primeiro instante, assiste-se ao fechamento dos poros e das microfissuras pré-existentes, conduzindo a uma contração global do volume do betão. A partir de 85% da tensão máxima, o betão dilata, aumentando acentuadamente o seu volume [5].

A resistência à compressão do betão quando sujeito a altas temperaturas depende de vários parâmetros. Segundo RILEM TC HTC [6] o tipo de agregado, o nível de carregamento, a taxa de evaporação e a selagem dos provetes são os parâmetros que mais afetam essa propriedade mecânica.

Segundo estudos experimentais de vários autores, [7, 8] constatou-se a existência de diferenças bem definidas entre as propriedades de betões correntes e betões de alta resistência quando sujeitos a temperaturas elevadas. Destes estudos concluíram que o betão de alta resistência começa a perder resistência a partir de níveis de temperatura mais baixos que o betão corrente, pois enquanto a rotura do betão de alta resistência ocorreu a partir de temperaturas de 150°C, correspondente a uma perda significativa de resistência próxima dos 30%, o betão de resistência normal manteve a sua resistência até temperaturas muito próximas dos 350°C.

Os autores explicam que esta diferença de comportamento se deve à densa microestrutura do betão de alta resistência (devido à baixa relação água/cimento) que, ao conferir-lhe baixa permeabilidade, dificulta a libertação do vapor de água dos poros quando aumenta a temperatura, tornando o betão mais suscetível ao fenómeno spalling. Acima dos 800°C a perda da resistência original para ambos os betões é quase total. No entanto, no intervalo de temperaturas de 400-800°C ambos os betões perdem a maior parte da sua resistência original, especialmente para temperaturas acima dos 600°C devido à decomposição do silicato de cálcio hidratado gel (CSH), componente responsável pela resistência mecânica dos cimentos. Além disso, Pimienta e Hager [1], verificaram que a redução da resistência à compressão do betão em função da temperatura é mais notória para os betões de alta resistência, principalmente a partir dos 300°C.

O betão quando exposto a altas temperaturas sofre alterações físicas e químicas, sendo a sua reação complexa devido à não uniformidade do betão constituído pela pasta de cimento e pelos agregados. Inicialmente, a vaporização da água livre ocorre entre os 100°C e os 140°C, provocando um aumento na pressão de vapor no interior do betão. A perda de água de hidratação do cimento ocorre no intervalo de 300 a 400°C, o que leva a uma perda na resistência e aparecimento de fissuras superficiais. Aos 400°C o hidróxido de cálcio, constituinte da pasta de cimento, começa a desidratar e gera mais vapor de água, conduzindo a uma redução significativa da resistência do material. Esta redução depende do tipo de agregado (silicioso ou calcário) e pode variar de 15 a 25%. Aos 550°C ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio e os agregados siliciosos aumentam de volume devido a transformações

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

minerais. Até 600°C, os agregados sofrem expansão térmica, dando origem a tensões internas que provocam desagregação no betão. A partir de 800°C, os agregados de origem calcária iniciam a sua decomposição, acentuando a redução da resistência do betão [9, 10].

Arioz [11] realizou um estudo sobre o efeito de altas temperaturas na resistência residual à compressão em várias misturas de betão com agregado de calcário britado e cascalho de rio. Notou-se que o efeito à exposição a temperaturas elevadas na resistência residual à compressão no betão com agregados de cascalho de rio é mais afetada do que nas misturas que contém agregados de calcário britado.

Jonaitis e Papinigis [12] concluíram, através de um estudo realizado sobre a influência de altas temperaturas e do carregamento a longo prazo na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do betão, que a alteração das propriedades descritas anteriormente não depende somente da exposição do betão a altas temperaturas mas também da ação do carregamento a longo prazo. Concluíram ainda que o decréscimo da resistência à compressão é inferior nas situações em que o betão é aquecido primeiro e só depois sujeito a um carregamento a longo prazo do que na situação em que é aquecido após ser sujeito a um carregamento.

Num estudo experimental levado a cabo por Aidoud e Benouis [13] sobre o efeito de altas temperaturas no comportamento em betões correntes e betões de alta resistência concluíram que para o intervalo de temperatura entre os 200 e os 400°C, a taxa de aquecimento é o principal fator responsável pela diminuição da perda de massa e da resistência mecânica (compressão, tração) para os dois tipos de betão. Concluíram também que, é neste mesmo intervalo de temperatura, que ocorre a diminuição mais acentuada do valor do módulo de elasticidade. Além disso, verificaram que a partir dos 600°C, os dois tipos de betão, apresentaram valores de resistência praticamente nulos, estando em concordância com outros trabalhos experimentais similares. Constataram ainda que, os betões de alta resistência são mais sensíveis e mais vulneráveis a altas temperaturas.

## **2.2 Resistência à Tração**

No que diz respeito a esta propriedade mecânica, não existem atualmente tantos estudos como para o caso da resistência à compressão. Com o aumento da temperatura verifica-se que a resistência à tração é mais suscetível aos efeitos da temperatura, apresentando uma redução mais acentuada do que na resistência à compressão. A resistência à tração é uma característica importante do betão em fenómenos como a fendilhação e a aderência das armaduras. No entanto, esta propriedade é afetada pelas características da composição, em especial pelo tipo de agregados [14, 15].

De uma forma geral, a resistência ao fogo de um elemento estrutural é dependente da geometria, do tipo de material a ser testado, da intensidade da carga aplicada e das características do próprio incêndio. O conhecimento desta propriedade permite estimar a carga à qual ocorre fissuração e caracterizar o fenómeno de spalling no betão, uma vez que o desprendimento das camadas de betão ocorre quando as tensões instaladas ultrapassam a resistência à tração do betão para a temperatura a que se encontra exposto [16]. Atualmente

recorre-se a ensaios destrutivos de tração direta e a ensaios destrutivos de tração indireta (compressão diametral) para se determinar a resistência à tração do betão. Os ensaios de tração direta apresentam valores de resistência à tração mais baixos que os resultados de compressão diametral. Segundo Thelandersson [17], os resultados obtidos por tração direta são mais próximos dos valores reais e com base nos seus trabalhos experimentais, verificou que tanto nos betões correntes como nos betões de alta resistência, a resistência à tração apresenta uma degradação semelhante com o aumento da temperatura.

Segundo Mazars [18] existem três fases no comportamento do betão à tração direta: na primeira fase, até cerca de 50% da tensão máxima, o comportamento do betão apresenta-se quase linear, pelo que o aparecimento de microfissuras na interface pasta de cimento/agregado é insignificante. Na segunda fase, até à tensão máxima, o comportamento do betão é não-linear, manifestando perda de rigidez e de coesão na interface pasta de cimento/agregados, originando microfissuras na pasta de cimento. Quando se atinge a tensão máxima surge a formação de microfissuras localizadas. Na última fase, o desenvolvimento de microfissuras localizadas conduz à rotura do material.

Vários estudos [14, 15, 18, 19] permitem concluir que a resistência à tração é afetada pelas proporções da mistura e, de uma forma mais significativa, pelo tipo de agregado. Por exemplo, a diminuição da resistência à tração do betão composto por agregados calcários é duas vezes mais elevada que para o betão composto por agregados siliciosos aos 500°C. Segundo Santos C. [15] a redução da resistência residual à tração a altas temperaturas é independente do nível de temperatura atingido e do tipo de arrefecimento aplicado.

Na Figura 2 pode-se observar, a partir de trabalhos desenvolvidos por vários autores, o comportamento à tração de diferentes tipos de betão.

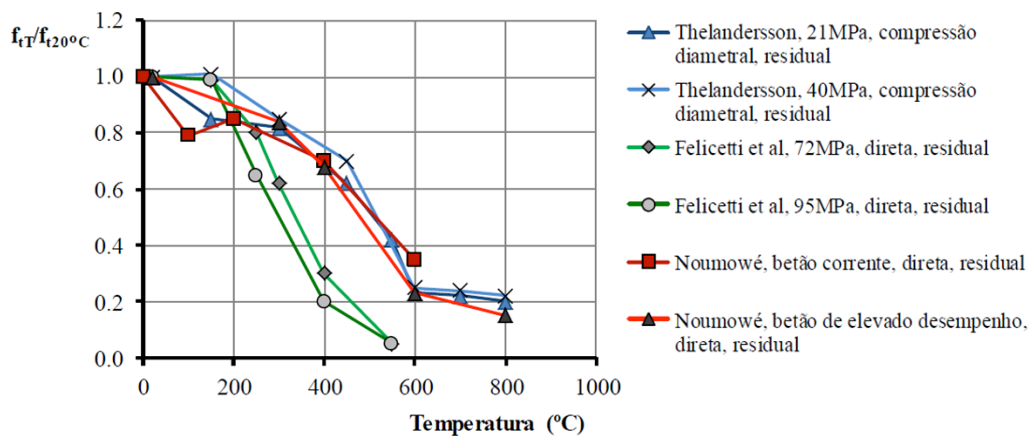


Figura 2: Resistência residual à tração direta e à tração por compressão diametral em função da temperatura, [20].

À semelhança com o que acontece com o valor de resistência à compressão e, em consonância com diferentes autores, Hager [20] verificou uma diminuição desta propriedade à medida que a temperatura aumenta.

### 2.3 Resistência à Flexão

Tal como sucede com as outras propriedades mecânicas do betão sujeito a altas temperaturas, também a resistência à flexão diminui à medida que a temperatura aumenta. Na Figura 3 é possível observar os resultados experimentais obtidos nos ensaios experimentais de resistência à flexão realizados por Li et al. [21] em provetes de betão corrente (C40) e de alta resistência (C60 e C70).

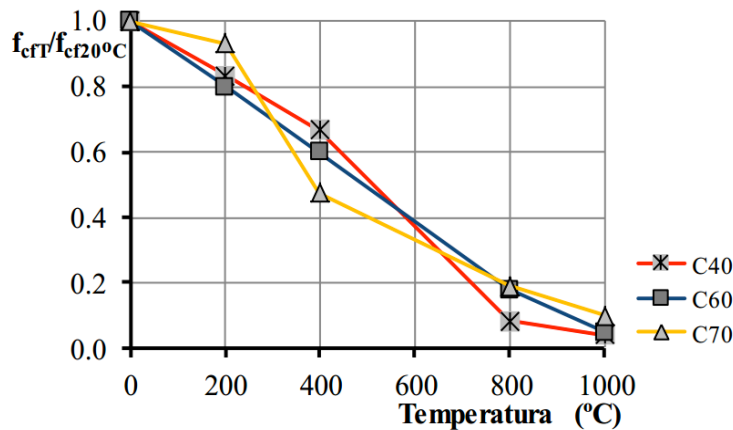


Figura 3: Resistência residual à flexão em função da temperatura do betão, [21].

Neste estudo, verificou-se que a resistência à flexão do betão de alta resistência (C70) sofre uma redução de 16,3% para temperaturas acima dos 800°C. No entanto, acima dos 1000°C apenas 7,4% da resistência é mantida. A resistência à flexão do betão de alta resistência (C60 e C70) diminui mais acentuadamente do que a do betão corrente (C40), especialmente no intervalo dos 200 aos 400°C.

Husem [22] estudou a variação da resistência à flexão de betões correntes e de alta resistência, expostos a diferentes níveis de temperatura (200, 400, 600, 800 e 1000°C) e procedendo, posteriormente, ao seu arrefecimento ao ar ou por jato de água. A resistência à flexão dos provetes de betão foram comparados uns com os outros e ainda com provetes à temperatura ambiente (ver Figura 4).

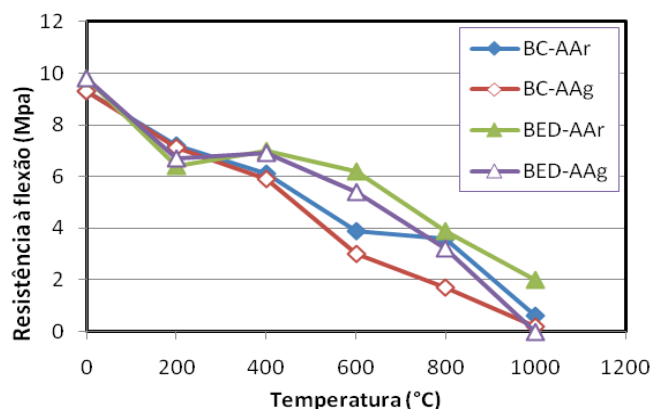


Figura 4: Variação da resistência à flexão residual em função da temperatura e do processo de arrefecimento aplicado; BC-AAr – Betão corrente arrefecido ao ar; BC-AAg – Betão corrente arrefecido por jato de água; BED-AAr – Betão de alta resistência arrefecido ao ar; BED-AAg – Betão de alta resistência arrefecido por jato de água, [22].

Este autor concluiu que o betão corrente e o de alta resistência, após exposição a temperaturas elevadas, apresentou uma diminuição da resistência residual à flexão com o aumento da temperatura. Verificou ainda que a redução na resistência residual à flexão é maior nos provetes arrefecidos por jatos de água. Estes resultados estão em sincronia com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão conduzidos por Li et al. [21].

Os ensaios experimentais realizados por Santos C. [15] mostram que a resistência residual à flexão sofre alterações em função do tipo de arrefecimento aplicado. O arrefecimento ao ar tem um efeito menos acentuado quando comparado com o arrefecimento por jato de água, independentemente da constituição do betão. Todavia, o uso de agregados calcários melhora o comportamento à flexão quando comparado com agregados graníticos.

## 2.4 Módulo de Elasticidade

Em relação ao módulo de elasticidade, vários autores [12, 13, 15] concluíram que há uma redução do módulo de elasticidade em função do aumento da temperatura, devendo-se esta redução a principalmente a uma rotura nas ligações internas entre a pasta de cimento e os agregados. Bamonte e Gambarova [23] acrescentam ainda que a redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura é independente do tipo de betão ensaiado. Esta redução é influenciada pelo módulo de elasticidade inicial, pelo teor de água, pela natureza dos agregados do betão e pela taxa de aquecimento [14].

No entanto, num estudo realizado por Kodur e Halmathy [24] sobre a evolução do módulo de elasticidade em betões correntes e com diferentes tipos de agregados (siliciosos e calcários), concluíram que o tipo de agregado não apresenta grande influência na variação do módulo de elasticidade em função da temperatura, uma vez que as curvas de evolução do módulo de elasticidade têm um desenvolvimento muito semelhante.

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

Segundo Coutinho [25] o módulo de elasticidade depende da porosidade dos agregados e da pasta cimentícia, pois teores de humidade mais baixos conduzem a uma hidratação deficiente da pasta de cimento e a ligações mais fracas entre esta e os agregados, assim como a uma menor compacidade. A evaporação da água de amassadura conduz a microfissuração, devido à retração do betão e à redução da sua rigidez, afetando o módulo de elasticidade.

Os estudos conduzidos por Santos C. [15, 26] permitiram concluir que o comportamento das estruturas depende do módulo de elasticidade do betão e este é fortemente influenciado pela temperatura e pelo tipo de agregado usado na composição do betão. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o módulo de elasticidade não é muito sensível ao método de arrefecimento aplicado (ao ar ou por jato de água).

No caso do betão calcário, o aumento da temperatura de 300 para 500°C registou uma redução de aproximadamente 23% para o arrefecimento ao ar e para o arrefecimento por jato de água. O betão granítico, para os mesmos níveis de temperatura, registou uma redução de cerca de 40% para os dois processos de arrefecimento. Contudo, o arrefecimento mediante jato de água registou os valores mínimos do módulo de elasticidade em todas as tipologias de betão [15]. Hertz [27] justifica a redução do módulo de elasticidade com o facto dos agregados siliciosos terem uma expansão térmica maior que os agregados de calcário, provocando maiores danos.

Num estudo experimental realizado por Phan e Carino [28] compararam a variação do módulo de elasticidade residual para betões de resistência normal e de alta resistência sujeitos a altas temperaturas, sem qualquer tipo de carregamento durante a fase de aquecimento do ensaio. Nesse estudo, os autores verificaram uma redução mais acentuada no módulo de elasticidade residual do que no módulo de elasticidade a altas temperaturas, para os dois tipos de betão em estudo. E constataram que havia uma redução mais acentuada do módulo de elasticidade em função da temperatura, nos betões de alta resistência do que nos betões de resistência normal.

### **3. CONCLUSÕES**

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

Nos ensaios com e sem carregamento durante o aquecimento, constata-se uma redução mais acentuada nos valores de resistência à compressão, à tração e módulo de elasticidade dos betões de alta resistência, em comparação com os betões de resistência moderada.

Além disso, tanto para a resistência à compressão como para resistência à compressão residual, verifica-se, também, uma redução mais acentuada nos valores de resistência à compressão em betões de alta resistência do que em betões correntes. Esta diferença de comportamento se deve à densa microestrutura do betão de alta resistência (devido à baixa relação água/cimento) que, ao conferir-lhe baixa permeabilidade, dificulta a libertação do vapor de água dos poros quando aumenta a temperatura, tornando o betão mais suscetível ao fenómeno spalling.

Além disso, para o intervalo de temperatura entre os 200 e os 400°C, a taxa de aquecimento é o principal fator responsável pela diminuição da perda de massa e da resistência mecânica dos betões.

No que se refere ao desenvolvimento da resistência à tração verifica-se que esta é mais suscetível aos efeitos da temperatura, apresentando uma redução mais acentuada do que na resistência à compressão. Verifica-se que, tanto nos betões correntes como nos betões de alta resistência, a resistência à tração apresenta uma degradação semelhante com o aumento da temperatura. Além disso, a resistência à tração é afetada pelas proporções da mistura e, de uma forma mais significativa, pelo tipo de agregado.

No que diz respeito à resistência à evolução do módulo de elasticidade quando sujeita a altas temperaturas, conclui-se que este depende do valor do módulo de elasticidade inicial, da taxa de aquecimento, da pasta de cimento do betão e teor de água. Com base nos estudos experimentais apresentado anteriormente, conclui-se que há uma redução mais acentuada no módulo de elasticidade residual do que no módulo de elasticidade a altas temperaturas e que se verifica uma redução mais acentuada do módulo de elasticidade em função da temperatura, nos betões de alta resistência do que nos betões de resistência normal.

## REFERÊNCIAS

- [1] Pimienta, P., Hager, I. - *Mechanical Behaviour of HPC at High Temperature*. 6th International Symposium on Utilisation of High Strength/high Performance Concrete, Leipzig, 2002.
- [2] Khoury, G. A. - *Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures*. Progress in Structural Engineering and Materials, vol. 2, 2000, p.429-447.
- [3] Phan, L. T.; Carino, N. J. - *Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [4] Khoury, G. A., et al. - *Modelling of Heated Concrete*, Magazine of Concrete Research. vol. 54, 2002, p. 77-101.
- [5] Picandet, V., et al. - *Effect of Axial Compressive Damage on Gas Permeability of Ordinary and High-Performance Concrete*. Cement and Concrete Research, Pergamon, vol. 31, 2001, p. 1525-1532.
- [6] Rilem Tc Htc - *Behaviour of Concrete at High Temperatures - Part 1 - Ordinary Concrete*, 2004.
- [7] Kodur, V. R., Sultan, M. A. - *Structural Behaviour of High Strength Concrete*. International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete, Quebec, 1998.
- [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] Georgali, B., Tsakiridis, P. E. - *Microstructure of Fire-Damaged Concrete. A Case Study*. Cement & Concrete Composites, Elsevier, vol. 27, 2005, p. 255-259.
- [10] Fletcher, I. A., et al. - *Behaviour of Concrete Structures in Fire*. Thermal Science, vol. II, 2007, p. 37-52.

- [11] Arioz, O. - *Effects of Elevated Temperatures on Properties of Concrete*. Fire Safety Journal, Elsevier, vol. 42, 2007, p. 516–522.
- [12] Jonaitis, B., Papinigis, V. - *Effect of Long-Term Loading and Fire Temperature on Mechanical Properties of Concrete*. Journal of Engineering and Management, vol. XI, 2005, p. 283-288.
- [13] A. Aidoud, A. Benouis (2009) - *Effet des Hautes Températures Sur les Propriétés des Bétons et des BHP*. SBEIDCO - 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), 2009.
- [14] Schneider, U. - *Concrete at High Temperatures: A General Review*". Fire Safety Journal, vol. 13, 1988, p. 55-68.
- [15] Santos, C. C. (2012). *Propriedades Mecânicas Residuais Após Incêndio de Betões Normais*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2012.
- [16] Neville, M. - *Properties of Concrete*. 4th edition, Longman Group Limited, England, 1995, 844 p.
- [17] Thelandersson, S. - *Effect of high temperatures on tensile strength of concrete*. Nordisk Betong, vol. 2, 1972, p. 1-28.
- [18] Mazars, J. - *A Description of Micro and Macroscale Damage of Concrete Structures*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 25, 1986, pp. 729-737.
- [19] Santos, S. O. - *O Spalling nas estruturas de betão*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008.
- [20] Hager, I. - *Comportement à Haute Température des Bétons à Haute Performance - Évolution des Principales Propriétés Mécanique*. Tese de Doutoramento, da Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [21] Li, M. et al. - *Mechanical Properties of Hhigh-Strength Concrete After Fire*. Cement and Concrete Research, v. 34, n.6, 2004, p. 1001-1005.
- [22] 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.
- [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] Kodur, V. K. R., Harmathy, T. Z. - *Properties of BuildingMaterials*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third edition, P. J. DiNenno, ed., National Fire Protection Agency, Quincy, MA, 2002, 1700 p.
- [25] Coutinho, S. - *Fabrico e Propriedades do Betão*. Laboratório-Nacional-de-Engenharia-Civil, 1988.
- [26] Santos C.C., Rodrigues J.P. - *Fire Residual mechanical properties of calcareous and granite aggregate concretes after fire*. Magazine of Concrete Research, v. 66, 2014, p. 845-857.
- [27] Hertz, K. D. - *Concrete Strength for Fire Safety Design*. Magazine of Concrete Research, vol. 57, 2005, p. 445-453.
- [28] Phan, L. T.; Carino, N. J. - *Fire Performance High Strength Concrete: Research Nedds*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2000.