

## **RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO A ALTAS TEMPERATURAS DUM BETÃO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO E TÊXTEIS RECICLADAS DE PNEU**



**João Paulo C.  
Rodrigues\***  
Professor  
UC - Coimbra  
Portugal



**Cristina Calmeiro  
dos Santos**  
Professora  
Instituto Politécnico  
de Castelo Branco  
Portugal

**Palavras-chave:** betão, fibra, aço, têxtil, pneu, alta temperatura, resistência à compressão.

### **1. INTRODUÇÃO**

Os vários estudos que têm vindo a ser desenvolvidos com betão normal mostram que as temperaturas elevadas degradam as suas propriedades mecânicas. De um modo geral apresentam-se valores de 25% para a perda de resistência à compressão para a 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 para determinar as alterações ocorridas nas propriedades deste tipo de betão quando submetido a elevadas temperaturas, de modo a permitir a comparação com as alterações produzidas no betão normal.

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 [5-7].

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

---

\* 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

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 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 compactação é a principal causa do spalling explosivo [8].

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, podendo produzir microfissuras ou até o surgimento do spalling [9].

Khoury estudou o desempenho mecânico do betão quando exposto a altas temperaturas. O autor verificou que as proporções utilizadas na constituição do betão têm um peso significativo, pois à medida que a temperatura aumenta os materiais constituintes do betão sofrem mudanças físicas e químicas que dependem de fatores internos (relacionados com os constituintes do betão) e fatores externos (humidade e variação de temperatura) [10].

Bayramov et al realizaram um estudo com o objetivo de otimizar os betões de alta resistência reforçaram-nos com fibras de aço para obter ductilidade superior aos betões normais e aumentar a capacidade de absorção de energia. As fibras utilizadas nas misturas eram de pequenas dimensões, apresentando relações comprimento/diâmetro entre 55 a 80. Os autores consideraram no seu estudo a distribuição das fibras e as propriedades de cada mistura uma vez que estes parâmetros influenciam o desempenho do betão. Os resultados obtidos permitiram verificar que o diâmetro e a orientação das fibras de aço desempenham um papel importante na resistência à compressão do betão. As fibras que se introduziram para reforçar o betão retardaram o aparecimento de fissuras e evitaram o aparecimento do spalling explosivo [11].

Lau e Anson realizaram um estudo para caracterizar as propriedades mecânicas de betões correntes e betões de alto desempenho submetidos a diferentes temperaturas. Estudaram ainda o efeito da inserção de 1% de fibras de aço como reforço nos dois tipos de betão. Neste estudo os autores constataram que quanto maior for a taxa de aumento de temperatura menor é a permeabilidade do betão e maior o risco do betão sofrer spalling. A adição de fibras de aço melhora o desempenho do betão entre 5 a 15%, independentemente da mistura e da temperatura máxima atingida. Assim, os autores constataram que a adição de fibras de aço no betão melhora a sua resistência à compressão [12].

Çavdar estudou o efeito da adição no betão de quatro tipos de fibras com o objetivo de determinar a contribuição das referidas adições no comportamento mecânico do betão quando sujeito a elevadas temperaturas. As fibras utilizadas foram de polipropileno (PP), de carbono (CF), de vidro (GF) e de álcool polivinílico (PVA). As proporções aplicadas foram 0,0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% em volume, e as temperaturas testadas foram 20, 100, 450 e 650°C [13].

Çavdar verificou que com o aumento da temperatura ocorrem alterações na matriz do cimento, pois aos 450°C surgiram algumas deteriorações e fissuras e aos 650°C as misturas mostraram-se enfraquecidas e fissuradas. Concluiu ainda que a resistência à compressão diminui à medida que a temperatura aumenta, perdendo as misturas com fibras de PP e GF cerca de 40-50% aos 450°C e 55-70% aos 650°C. As misturas com CF e as misturas com PVA perderam

cerca de 3-8% aos 450°C e 50-60% aos 650°C. Cada tipo de fibra apresentou melhores desempenhos em proporções diferentes quando a resistência à compressão é tida em conta juntamente com a temperatura. A diminuição da resistência à compressão é menor quando a proporção de fibras de CF adicionadas à mistura está compreendida entre os 0,5 e os 1,5% para qualquer nível de temperatura em estudo [13].

Bangi e Horiguchi estudaram a influência do comprimento, do diâmetro e do tipo de fibra a utilizar de modo a diminuir a pressão interna dos betões de alta resistência quando estão sujeitos a elevadas temperaturas. Neste estudo testaram fibras de polipropileno (PP), fibras de álcool polivinílico (PVA) e fibras de aço (FA). Todas as misturas foram reforçadas com a mesma quantidade de fibras (0,1% em volume) e submetidas a uma taxa de aquecimento de 10°C/min [14].

Os autores observaram uma redução significativa da pressão nos poros das misturas, independentemente do tipo de fibra aplicada e da sua geometria. Verificaram ainda que as fibras mais longas e com diâmetros menores atenuam o aumento da pressão nos poros das misturas quando comparadas com as fibras mais curtas e com diâmetros superiores, independentemente do tipo de fibra. Por outro lado, constataram que as misturas de betão reforçadas com fibras de PP tiveram melhor comportamento em condições de incêndio do que as fibras de PVA, porque as fibras de PP têm melhores propriedades de ligação com o betão [14].

Os autores verificaram também que as adições de fibras de aço atenuam o aparecimento de fissuração e as fibras de PP o spalling, uma vez que estas últimas vão sublimar para temperaturas na ordem dos 170°C, criando canais por onde o vapor se pode escapar do interior para o exterior do elemento, reduzindo assim a pressão interna nos poros da mistura. Os dados experimentais mostram que a adição de fibras com temperaturas de sublimação menores apresenta um desempenho melhorado relativamente às fibras com maiores temperaturas de fusão [14].

É neste contexto e atendendo à necessidade cada vez mais imperiosa de gerir racionalmente os recursos naturais [15-18], que surge a presente investigação, com a qual se pretende avaliar experimentalmente a resistência à compressão do betão com fibras de aço e fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus à temperatura ambiente e a altas temperaturas.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Composição do betão**

Os materiais utilizados neste estudo foram cimento Portland (CEM) tipo II/A-L 42.5R, superplastificante (SP) SIKA (Sikament-HE 200P) e dois tipos de agregados: areia fina (AF) e brita calcária (BC) com a dimensão máxima de 12,7mm. A escolha do cimento deve-se ao facto de este ser um produto com boa trabalhabilidade, ter elevada resistência e um bom comportamento a elevadas temperaturas. No Quadro 1 apresentam-se as massas volúmicas dos dois agregados utilizados, cimento e água.

Quadro 1: Massas volúmicas dos agregados, cimento e água

	<i>Massa volúmica – <math>\rho</math></i> <i>[kg/m<sup>3</sup>]</i>
Areia Fina (AF)	2600
Brita Calcária (BC)	2700
Cimento (CEM)	3100
Água (W)	1000

As cinco composições de betão em estudo apenas diferiram no tipo de fibras incorporadas nas misturas, a densidade aplicada ou a ausência das mesmas. Para a primeira composição (BR) não foram usadas fibras; na segunda e terceira foram usadas fibras têxteis (FT) (Figura 1a) recicladas de pneu substituindo BC com massas volúmicas de 2 kg/m<sup>3</sup> e 4 kg/m<sup>3</sup> para FT1 e FT2, respetivamente; na quarta e quinta composição usaram-se fibras de aço (FA) (Figura 1b) recicladas de pneu, substituindo o agregado de maior dimensão com massas volúmicas de 30 kg/m<sup>3</sup> e 70 kg/m<sup>3</sup> para FA1 e FA2, respetivamente. No Quadro 2 podem-se observar as características físicas dos dois tipos de fibras aplicadas.

Optou-se por substituir o agregado de maior dimensão (BC) para os dois tipos de fibras por razões distintas: as fibras têxteis com o objetivo de permitir a saída de vapor do betão em caso de incêndio e assim evitar o efeito de spalling e as fibras de aço com o objetivo de vencer as tensões de origem térmica geradas.



Figura 1: Fibras recicladas de pneu. a) Fibras têxteis. b) Fibras de aço

A determinação das massas volúmicas das fibras têxteis e de aço respeitou a norma NP EN 1097-3 [19] recorrendo ao uso de um picnómetro.

Quadro 2: Características das fibras têxteis e das fibras de aço

	<i>Massa volúmica</i> <i>[kg/m<sup>3</sup>]</i>	<i>Comprimento</i> <i>[mm]</i>	<i>Diâmetro</i> <i>[mm]</i>
Fibras Têxteis (FT)	1091	11,9 - 30	1
Fibras de Aço (FA)	6787	7 - 55	0,2 - 2,1

As proporções das diferentes misturas são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Composição do betão por m<sup>3</sup>

	<i>CEM</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>AF</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>BC</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>W</i> [l/m <sup>3</sup> ]	<i>W/C</i>	<i>FT</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>FA</i> [kg/m <sup>3</sup> ]
BR	400	698	1097	173	0,43	-	-
FT1	400	698	1095	173	0,43	2	-
FT2	400	698	1093	173	0,43	4	-
FA1	400	698	1067	173	0,43	-	30
FA2	400	698	1027	173	0,43	-	70

Para cada composição de betão foram realizados ensaios de resistência à compressão em provetes cúbicos (150x150x150mm), determinando a resistência à compressão do betão à temperatura ambiente, após 28 dias de cura. Para determinar a classe de resistência do betão de acordo com a NP EN 206-1 [20], foram realizados ensaios de compressão após cura, cujos resultados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Resultados dos ensaios de compressão do betão

<i>Tipo de betão</i>	<i>f<sub>cm</sub></i> (MPa)	<i>f<sub>ck</sub></i> (MPa)	<i>Classe de Resistência</i>
BR	46,44	45,44	C35/45
FT1	49,11	48,11	C35/45
FT2	46,62	45,62	C35/45
FA1	50,63	49,63	C35/45
FA2	45,14	44,14	C30/37

## 2.2 Provetes

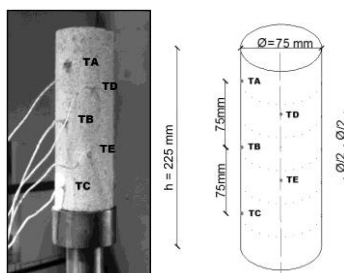


Figura 2: Provetes e localização dos termopares

Os ensaios foram realizados em provetes cilíndricos com 75mm de diâmetro e 225mm de altura, com uma relação de altura/diâmetro de 3:1. Os provetes foram providos com cinco termopares tipo K com a finalidade de controlar 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 [21] (Figura 2).

### 2.3 Metodologia de ensaio

Do sistema de ensaio fizeram parte uma máquina universal de tração/compressão Servosis com capacidade de carga até 600kN (a), um controlador da máquina de ensaios tração/compressão (d), um forno cilíndrico com uma câmara de aquecimento de 90mm de diâmetro e 300mm de altura (temperatura máxima de 1200°C) (b) e um sistema de aquisição de dados TML TDS-601 (c). Nos ensaios foram registadas as forças, os deslocamentos e as temperaturas nos provetes e no forno (Figura 3).

O procedimento de ensaio adotado respeitou as recomendações do RILEM TC – 200 HTC [21]. O provete foi submetido a um nível de carregamento de  $0,5f_{cd}$ , o qual foi mantido constante durante o processo de aquecimento.

Após se ter atingido o nível de carregamento, o provete foi aquecido a uma taxa de 3°C/min, até ao nível de temperatura desejado. Vários níveis de temperatura máxima foram testados (300, 500 e 700°C). Para controlo do betão foram também testados provetes à temperatura ambiente. O nível de temperatura era considerado atingido quando a temperatura média nos três termopares superficiais do provete em estudo igualava a temperatura ambiente interna do forno. A máxima diferença da temperatura axial entre cada uma das três leituras da temperatura superficial não podia exceder 1°C a 20°C, 5°C a 100°C e 20°C a 700°C. O provete era mantido a esta temperatura durante uma hora para estabilização. Após a estabilização da temperatura era realizado o ensaio de compressão. A carga foi incrementada a uma taxa de 0,25kN/s até se atingir a rotura do provete.



Figura 3: Sistema de ensaio

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Evolução da temperatura nos provetes

A Figura 4 apresenta a título de exemplo a evolução da temperatura nos termopares do provete FA1 e no forno, para o nível de temperatura de 500°C.

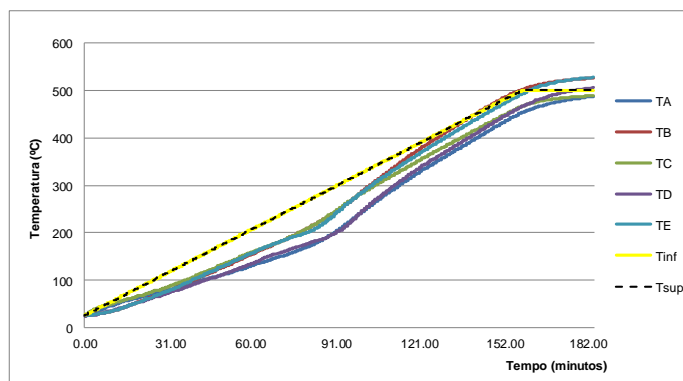


Figura 4: Evolução da temperatura no provete e no forno - série de 500°C

A análise da Figura 4 permite verificar que a temperatura no interior do forno se manteve uniforme durante os ensaios, pois as curvas de temperatura inferior e superior foram praticamente coincidentes ao longo do ensaio. Este facto traduziu-se numa boa exposição térmica a que o provete esteve sujeito no forno cilíndrico.

Nas curvas de temperatura registadas através dos termopares (Figura 4), pode observar-se uma boa uniformidade da temperatura no interior do provete durante o aquecimento e na fase de estabilização da temperatura (durante os 60 minutos como a norma indica).

### 2.4.2 Resistência à compressão

A Figura 5 apresenta a variação da resistência à compressão máxima em função da temperatura do betão de referência (BR), do betão com 2 kg/m<sup>3</sup> (FT1) e do betão com 4 kg/m<sup>3</sup> (FT2) de fibras têxteis. Da análise da figura constata-se que, aos 300°C, houve um aumento da resistência à compressão de cerca de 47% para o betão de referência, 56% para o betão FT1 e 43% para o betão FT2. Situação similar ocorreu aos 500°C, apesar dos acréscimos de resistência à compressão não terem sido tão significativos. Para o nível de temperatura de 700°C não são apresentados resultados, uma vez que todos os provetes sofreram rotura antes de atingir este nível de temperatura, impossibilitando que os mesmos fossem ensaiados à compressão.

A Figura 6 mostra a variação da resistência à compressão máxima em função da temperatura do betão de referência (BR), do betão com 30 kg/m<sup>3</sup> (FA1) e do betão com 70 kg/m<sup>3</sup> (FA2) de fibras de aço provenientes da reciclagem de pneu.

Da análise da Figura 6 constata-se que quanto menor for a quantidade de fibras de aço adicionadas à mistura de betão maior é a resistência à compressão para os diferentes níveis de temperatura em estudo. Aos 300°C verificou-se um aumento da resistência à compressão de cerca de 47% para o betão de referência, 54% para o betão FA1 e 41% para o betão FA2. Aos 500°C a resistência à compressão seguiu a mesma tendência embora com valores menos significativos.

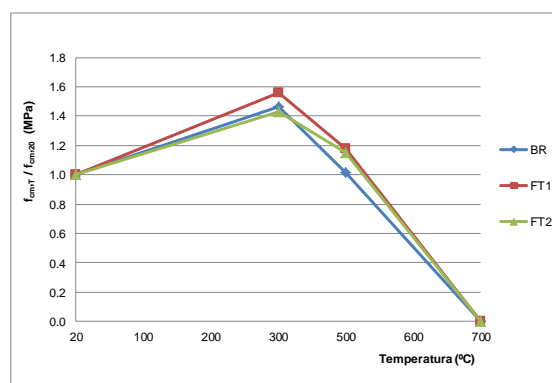


Figura 5: Resistência à compressão do betão de referência (BR) e dos betões com fibras têxteis (FT1 e FT2) em função da temperatura

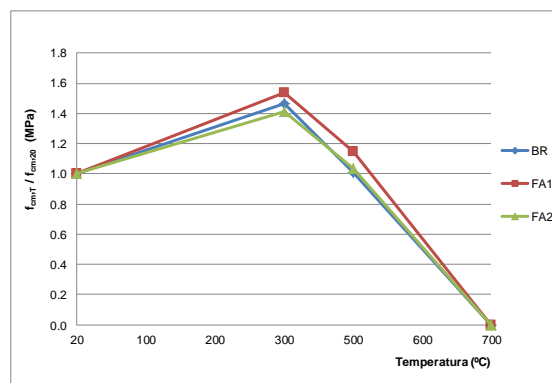


Figura 6: Resistência à compressão do betão de referência (BR) e dos betões com fibras de aço (FA1 e FA2) em função da temperatura

Os resultados obtidos indicam que a adição de fibras no betão em quantidades moderadas traduz-se num acréscimo da resistência à compressão. Estes dados estão de acordo com os resultados das investigações de Lau e Anson [12] e de Çavdar [13], os quais constataram que

a adição de fibras (em quantidades entre 0,5 e 1%) melhora o desempenho do betão independentemente da temperatura máxima.

### 3. CONCLUSÕES

O trabalho experimental desenvolvido permitiu extrair as seguintes conclusões:

- para níveis de temperatura de 300 e 500°C, verifica-se que quanto menor a quantidade de fibras de aço adicionadas maior é a resistência à compressão do betão, devido ao facto de as fibras de aço melhorarem o comportamento do betão porque permitem vencer as tensões de origem térmica geradas durante o aquecimento, evitando a degradação do betão com a consequente diminuição da resistência à compressão;
- as composições de betão com fibras de aço ou com fibras têxteis apresentaram aos 300 e aos 500°C valores de resistência à compressão superiores aos registados para a temperatura de 20°C;
- os resultados obtidos evidenciam que quanto menor a quantidade de fibras adicionadas melhor é o comportamento do betão relativamente à resistência à compressão;
- no betão com adição de fibras de aço verificou-se uma rotura menos explosiva, atestando a eficácia deste tipo de fibras na obtenção de um betão mais dúctil e no controlo da fendilhação.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa RECIPNEU SA a oferta de fibras de aço e fibras têxteis recicladas de pneu utilizadas nesta investigação.

### REFERÊNCIAS

- [1] Ghan, Y.N., Peng, G.F., Anson, M. - *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*. PhD thesis, Paisley College of Technology, 1983, 490 p.
- [5] Castillo C, Durrani A.J. - *Effect of transient high temperature on high-strength concrete*. ACI Materials J, 1990, p. 47-53.

- [6] 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.
- [7] Hager, I. - *Comportement à haute température des bétons de haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques*. Tese de Doutorado, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2004, 183 p.
- [8] Aitcin, P.C. - *The durability characteristics of high performance concrete: a review*. Cement and Concrete Composites, Vol.25, 2003, p. 409-420.
- [9] Bazant, P.Z., Kaplan, M.F. - *Concrete at high temperatures*. Material, properties and mathematical models. Longman, Harlow, England, 1996, 412 p.
- [10] Khoury, G.A. - *Effect of fire on concrete and concrete structures*. Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 2, 2000, p. 429-447.
- [11] Bayramov, F., Tasdemir, C., Tasdemir, M.A. - *Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method*. Cement and Concrete Composites, Vol. 26, 2004, p. 665-675.
- [12] 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.
- [13] Çavdar, A. - *A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites*. Composites, Part B, Vol. 43, 2012, p. 2452-2463.
- [14] Bangi, M.R., Horiguchi, T. - *Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures*. Cement and Concrete Research, Vol. 42, 2012, p. 459-466.
- [15] Olivares, F.H., Barluenga, G. - *Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, p. 109-117.
- [16] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. - *Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire - rubber particles*, Waste Management Journal, Vol. 28, 2008, p. 2472-2482.
- [17] Turki, M., Bretagne, E., Rouis, M.J., Quéneudec, M. - *Microstructure, physical and mechanical properties of mortar – rubber aggregates mixtures*, Construction and Building Materials, Vol. 23, 2009, p. 2715-2722.
- [18] Gesoğlu, M., Güneyisi, E. - *Permeability properties of self-compacting rubberized concretes*, Construction and Building Materials, Vol. 25, 2011, p. 3319-3326.
- [19] NP EN 1097-3 - *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios*. 2002, 16 p.
- [20] NP EN 206-1. *Concrete Part 1: Specification, performance, production and conformity*. 2007, 84 p.
- [21] RILEM TC - 200 HTC - *Mechanical Concrete Properties at High Temperature – Modelling and Applications*. Materials and Structures, Vol. 38, 2005, p. 913-919.