

Betão de alta resistência reforçado com fibras exposto a elevadas temperaturas

Vítor M.C.F. Cunha ⁽¹⁾, Taghreed Al-Rikabi ⁽²⁾ e Joaquim A.O. Barros ⁽³⁾

⁽¹⁾ ISISE, Instituto de Bio-Sustentabilidade (IB-S), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

⁽²⁾ Koya University, Department of Architecture Engineering, Koya, Iraq.

⁽³⁾ ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5464>

RESUMO

Atualmente, a utilização de betões de elevada resistência tem vindo a aumentar, nomeadamente, em aplicações com requisitos especiais, tais como arranha-céus, torres eólicas, centrais nucleares, etc. No entanto, com o aumento significativo da resistência, este tipo de material desenvolve um comportamento significativamente mais frágil. Adicionalmente, quando expostos a elevadas temperaturas, como no caso de incêndio, dependendo da temperatura e tempo de exposição poder-se-á verificar uma diminuição significativa da resistência à compressão, fissuração bem como uma rotura explosiva. Neste trabalho apresentam-se e discutem-se os resultados do estudo da influência da temperatura no comportamento mecânico de microbetão de alta resistência reforçado com fibras de aço. Diversos provetes de betão de elevada resistência foram expostos a distintas temperaturas durante um período superior a uma hora, designadamente, 400, 500, 600 e 700 °C. O comportamento mecânico, após exposição às diferentes temperaturas, foi avaliado através de ensaios de compressão, flexão e tração uniaxial e posteriormente comparado com o betão de referência (exposto à temperatura ambiente). Na generalidade, as propriedades mecânicas do betão de alta resistência diminuíram com o aumento da temperatura. Verificou-se um decréscimo mais acentuado da resistência à compressão, tração uniaxial e tração em flexão para temperaturas superiores a 400°C.

PALAVRAS CHAVE: Betões de alta resistência, fibras metálicas, exposição a temperaturas elevadas, propriedades mecânicas.

1. INTRODUÇÃO

Desde o aparecimento do “Reactive Powder Concrete” (RPC) na década de 90, este material tem sido extensivamente investigado quer do ponto de vista do desenvolvimento de composições, quer do seu comportamento mecânico. O RPC é caracterizado por possuir um rácio água / ligante (w/c) significativamente reduzido, ter uma microestrutura muito densa formada por uma panóplia de partículas finas, tais como cimento, sílica de fumo e

areia de quartzo moída, assim como pela exclusão de agregados de maiores dimensões da sua composição, isto é, superiores a 1 mm. Esta combinação propicia ao RPC uma elevada resistência e durabilidade [1,2]. No caso de se utilizar tratamento térmico e/ou pressão durante a sua cura, a resistência à compressão do RPC pode atingir valores dos 200 a 800 MPa [3,4]. No entanto, a elevada resistência deste material torna-o extremamente frágil. Deste modo, usualmente, são adicionadas fibras para reforçar a matriz (entre 1.5 a 3% em vol.) com o intuito de diminuir o seu comportamento frágil [5]. O RPC tem um amplo campo de aplicação, como por exemplo: estruturas de betão pré-esforçado, centrais nucleares, abobadas de grande vão, pontes e casos de reabilitação estrutural. Dentro das aplicações estruturais previamente enumeradas, o fogo representa um risco tangível, adicionalmente, o potencial risco de colapso durante um fogo aumenta devido à natureza frágil do RPC. Contudo, até à data, a investigação realizada sobre RPC expostos a fogo / elevadas temperaturas ainda é reduzida. Modelações numéricas demonstraram que o RPC é bastante suscetível a roturas explosivas quando sujeito a elevadas temperaturas [6-8]. Adicionalmente, Liu e Huang [9] verificaram experimentalmente que a rotura explosiva do RPC devido à exposição a elevadas temperaturas é diferente da dos betões convencionais de elevada resistência e elevada performance. Os mecanismos subjacentes à rotura explosiva do RPC ainda não são totalmente compreendidos.

Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados experimentais do comportamento mecânico de RPC reforçado com fibras de aço (2% em vol.) para diferentes temperaturas de exposição. A resistência à compressão, tração e tração em flexão, módulo de elasticidade e resistências residuais de tração em flexão foram determinadas para provetes de RPC expostos a elevadas temperaturas, nomeadamente, 400, 500, 600 e 700 °C).

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Materiais e composição de betão

Na composição do “Reaction Powder Concrete” (RPC) foram utilizados os seguintes materiais: cimento (*C*), areia fina (*AF*), sílica de fumo (*SF*), superplastificante (*SP*), água (*A*) e fibras de aço. Na Tabela 1 inclui-se a composição de RPC por metro cúbico. Esta composição foi selecionada a partir dos resultados de uma campanha experimental preliminar, constituída por nove amassaduras distintas. A quantidade de cimento, areia fina e fibras de aço foi mantida constante durante a campanha preliminar, de acordo com as recomendações de [10]. Por seu lado, variaram-se as quantidades de sílica de fumo, superplastificante e água de modo a obter uma composição com propriedades reológicas e mecânicas apropriadas, bem como uma distribuição homogênea das fibras. A composição foi efetuada com um cimento SECIL[®] CEM I 42.5R e areia fina, em particular, uma areia natural de rio com dimensão máxima de aproximadamente 1 mm, tornando-a deste modo adequada para a produção de RPC [11]. A sílica de fumo utilizada na composição de RPC teve como principal objetivo contribuir para a densificação da matriz. O superplastificante utilizado foi o ViscoCrete[®] 20HE da Sika, com um conteúdo de partículas sólidas de 40% e uma densidade de 1.08 kg/l. Por último foram utilizadas fibras de aço lisas com uma

resistência à tração de 2800 MPa, revestimento de cobre, comprimento de 6 mm e diâmetro de 0.2 mm.

Tabela 1. Composição de RPC por m³.

<i>C</i> [kg]	<i>AF</i> [kg]	<i>SF</i> [kg]	<i>SP</i> [kg]	<i>A</i> [kg]	<i>Fibras</i> [kg]
1000	1000	150	21.25	212.5	156

2.2. Mistura e cura do betão

A mistura do RPC foi efetuada com recurso a uma misturadora rotativa com capacidade de 6 l. Procedeu-se á inclusão e mistura da areia fina, cimento, sílica de fumo por esta ordem. O superplastificante foi previamente misturado com a água e lentamente adicionado aos componentes colocados na misturadora. Após a mistura revelar uma boa homogeneidade foram adicionadas lentamente as fibras. O tempo total de mistura foi cerca de 18 a 24 min. Os diversos moldes para os provetes foram betonados com a mistura de RPC e de seguida vibrados durante 1 minuto. Após terminado o procedimento de betonagem, os moldes foram cobertos com mantas humedecidas durante 48 horas. Findo este período, os provetes foram desmoldados e colocados em água dentro de uma câmara com temperatura de 20 °C e 98% de humidade relativa até à data do seu ensaio.

2.3. Procedimento para exposição a elevadas temperaturas

Previamente ao procedimento de exposição a elevadas temperaturas e respetivos ensaios mecânicos, os provetes foram secados a duas temperaturas moderadas durante 24 horas, designadamente, a 60 e 100 °C. Isto permitiu verificar a influência do teor de humidade dos provetes numa eventual rotura explosiva dos provetes quando sujeitos a elevadas temperaturas. O teor de humidade foi avaliado em alguns provetes prismáticos, constatou-se que os provetes expostos a 100% se encontravam completamente secos, enquanto os provetes secos a 60 °C apresentavam um teor de humidade em massa de cerca 7%. Após o procedimento de secagem, os provetes destinados aos ensaios mecânicos foram expostos a distintas temperaturas elevadas, nomeadamente, 400, 500, 600 e 700 °C. Para o devido efeito foi utilizado um forno elétrico com uma temperatura máxima de 1200 °C. O procedimento de exposição foi similar para as distintas temperaturas alvo. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até a temperatura alvo ser atingida, posteriormente esta temperatura foi mantida constante durante uma hora. Finalmente, os provetes arrefeceram gradualmente durante cerca de 24 horas. Na Tabela 2 inclui-se o número de provetes que sofreram rotura explosiva para as distintas temperaturas de exposição e secagem. Adicionalmente, entre parenteses, é indicado o número total de provetes expostos e secados a uma determinada temperatura.

Tabela 2. Rotura dos provetes para diferentes condições de secagem.

<i>Temperatura Exposição</i>	400 [°C]		500 [°C]		600 [°C]		700 [°C]		
	<i>Temperatura Secagem</i> [°C]								
<i>Provetes</i>	Compressão	-	0 (4)	-	0 (4)	-	0 (4)	-	0 (2)
	Tração	0 (4)	-	2 (4)	-	4 (4)	-	-	-
	Flexão	0 (4)	-	4 (4)	-	3 (4)	-	-	0 (2)

Os provetes expostos a uma temperatura de 400 °C durante uma hora não sofreram qualquer tipo de rotura explosiva quando secos a 60 °C. Adicionalmente, os provetes sujeitos a uma temperatura de secagem de 100 °C também não exibiram qualquer tipo de rotura explosiva mesmo quando expostos a temperaturas de 700 °C. A rotura explosiva dos provetes apenas ocorreu em provetes com humidade, isto é, secos a 60 °C. Este tipo de rotura explosiva foi perfeitamente audível durante o procedimento de exposição a elevadas temperaturas, tendo ocorrido para uma temperatura sensivelmente de 450 °C. A temperatura para qual ocorreu a explosão dos provetes de RPC encontra-se de acordo com os valores disponíveis na literatura para betões de elevada resistência sujeitos a elevadas temperaturas [12,13]. Esta rotura explosiva observada para uma temperatura de 450 °C estará relacionada com a desidratação do hidróxido de cálcio, a qual ocorre para temperaturas entre os 400 e 550 °C, originando um aumento da pressão da humidade nos poros da matriz [14]. Na Figura 2 ilustram-se alguns exemplos dos tipos e rotura observados em provetes sujeitos a elevadas temperaturas.



Figura 2. Modos de rotura: (a) e (b) rotura explosiva para 500 °C de provetes para ensaios de tração e flexão, respetivamente; (c) fissuração para 600 °C em provetes para ensaios de tração, e (d) rotura explosiva a 600 °C para provetes de flexão.

2.4. Procedimento dos ensaios mecânicos e geometria dos provetes

No total foram moldados 52 provetes com geometrias distintas para a realização de ensaios mecânicos de compressão, flexão e tração uniaxial. Na generalidade, foram adotados quatro provetes para cada série correspondente a uma tipologia de ensaio e exposição de temperatura, com a exceção dos provetes expostos a 700 °C.

2.4.1. Ensaios de compressão

A relação tensão – extensão e módulo de elasticidade foi obtido em provetes cilíndricos com um diâmetro aproximadamente de 44 mm e altura de 105 mm. Antes da realização dos ensaios, as bases inferior e superior foram retificadas. Primeiramente, o módulo de elasticidade foi determinado em controlo de força para um certo número de ciclos de carga / descarga. Para o ciclo de carga, a tensão foi aplicada a uma velocidade de 0.2 MPa/s até uma que a tensão correspondente a um terço da resistência à compressão fosse atingida. O ensaio terminou quando a diferença de extensão entre dois ciclos de carregamento não

excedesse 1×10^{-5} . Na Figura 3(a) indica-se o esquema de ensaio adotado para a obtenção do módulo de elasticidade. Por sua vez, a relação tensão – extensão foi determinada em controlo de deslocamento com uma velocidade de $10 \mu\text{m/s}$ de acordo com a Figura 3(b). A deformação foi calculada através da média das leituras dos três LVDTs.

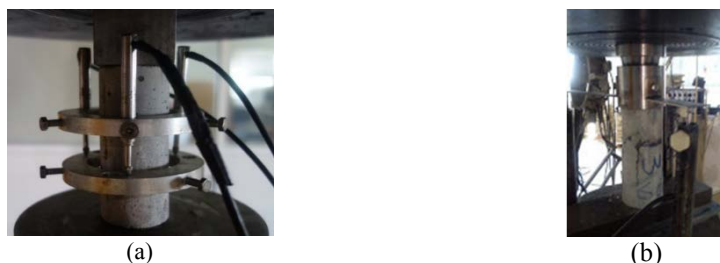


Figura 3. Esquema de ensaio para determinar: (a) módulo de elasticidade, (b) relação tensão - extensão.

2.4.2. Ensaios de tração uniaxial

Os ensaios de tração foram realizados em provetes com geometria variável de acordo com o representado na Figura 4(a). Na Figura 4(b) ilustra-se o esquema de ensaio adotado. A deformação dos provetes foi obtida a partir da média das leituras dos dois LVDTs com um campo de medição de 120 mm. Os testes foram executados em controlo de deslocamento com uma velocidade de $5 \mu\text{m/s}$.

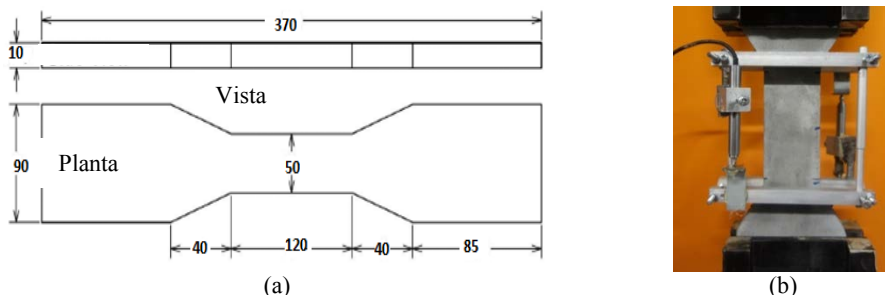


Figura 4. (a) Geometria dos provetes (dimensões em mm), (b) esquema do ensaio de tração uniaxial

2.4.3. Ensaios de flexão

Nos ensaios de flexão foram utilizados provetes com dimensões de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$. Antes do ensaio foi realizado um entalhe no provete a meio vão com uma profundidade de 10 mm e espessura de 1 mm. Este entalhe foi efetuado na face lateral dos provetes, isto é, numa face paralela à direção de betonagem (de acordo com a EN-14651). Os provetes foram ensaiados com um vão de 150 mm. A Figura 5 ilustra o esquema de ensaio adotado. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento com uma velocidade de $5 \mu\text{m/s}$. Um dos LVDTs foi utilizado para medir a flecha a meio vão, Figura 5(a), enquanto outro foi utilizado para medir a abertura na boca do entalhe, Figura 5(b).

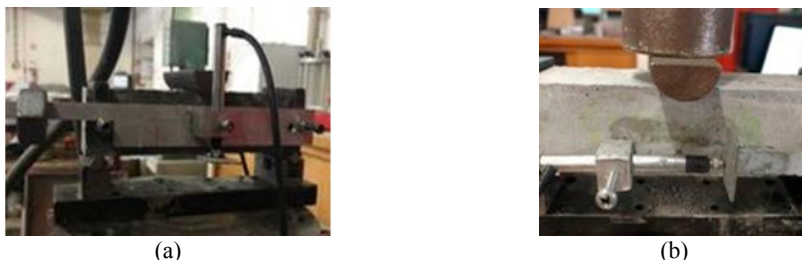


Figura 5. Ensaio de flexão de 3 pontos: (a) vista geral, (b) medição da abertura na boca do entalhe.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os valores médios (*Avg.*) e coeficientes de variação (*CoV*) das principais propriedades mecânicas do RPC desenvolvido sujeito a distintas temperaturas de exposição (*Temp.*) encontram-se indicadas na Tabela 4.

Tabela 3. Propriedades mecânicas do RPC exposto a elevadas temperaturas.

<i>Temp.</i> [°C]	<i>Resistência à compressão</i> [MPa]		<i>Módulo de elasticidade</i> [GPa]		<i>Resistência à tração</i> [MPa]		<i>Resistência à flexão</i> [MPa]	
	<i>Avg.</i>	<i>CoV</i>	<i>Avg.</i>	<i>CoV</i>	<i>Avg.</i>	<i>CoV</i>	<i>Avg.</i>	<i>CoV</i>
20	137.6	4.8%	46.48	10.3%	4.8	28.8%	20.9	9.5%
400	102.2	1.5%	30.9	5.8%	4.1	15.4%	15.4	14.0%
500	84.4	1.2%	22.3	18.0%	3.6	-	-	-
600	68.2	10.5%	17.5	7.2%	-	-	8.6	-
700	65.4	5.2%	18.4	4.7%	-	-	1.0	13.9%

Quer a resistência à compressão, quer o módulo de elasticidade diminuíram linearmente até uma temperatura de 600 °C. Para 700 °C não foi observada uma variação significativa destes valores. Deste modo poder-se-á concluir que o nível de dano provocado por estas temperaturas será similar. Para uma exposição a uma temperatura de 600 °C observou uma redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade de 50 e 62%, respetivamente, quando comparada com as obtidas para a série de referência (temperatura ambiente). A resistência à flexão diminuiu significativamente com o aumento da temperatura de exposição até aos 700 °C. Este decréscimo foi mais acentuado a partir dos 400 °C. A resistência à flexão aos 600 e 700 °C foi respetivamente 60 e 95% da resistência observada para a série de referência. Por sua vez, para a resistência à tração apenas foi verificado um ligeiro decréscimo com o aumento da temperatura, contudo como apenas foi possível ensaiar provetes expostos a uma temperatura máxima de 500 °C não se poderão retirar conclusões definitivas.

3.1. Relação tensão – extensão de compressão

As curvas médias tensão – extensão de compressão para cada uma das séries correspondentes às diferentes temperaturas de exposição encontram-se representadas na

Figura 6. Na fase de pré-pico é visível uma diminuição da rigidez com o aumento da temperatura de exposição devido ao dano introduzido pelo gradiente térmico. Adicionalmente, no ramo de pós-pico é igualmente visível uma diminuição da resistência residual com o aumento da temperatura. Para temperaturas superiores a 600°C e deformações maiores que 0.01 a resistência residual é praticamente nula.

3.2. Relação tensão – extensão de tração

As curvas médias tensão de tração – extensão para cada uma das séries sujeitas às diferentes temperaturas encontram-se representadas na Figura 7. Convém salientar que a deformação do provete foi obtida num campo de leitura de 120 mm sem qualquer tipo de entalhe. Consequentemente, até à localização da macro-fissura, a deformação medida incluirá adicionalmente a deformação elástica na referida zona. O surgimento de múltiplas fissuras antes da localização foi reduzido e após o aparecimento da macro-fissura a deformação poderá ser encarada como um valor muito aproximado da abertura de fissura do provete. Para temperaturas de 400 e 500 °C observou-se uma diminuição das resistências residuais com o aumento da temperatura de exposição. A diminuição abrupta da ductilidade do material sujeito a uma temperatura de 500 °C ter-se-á devido à deterioração da resistência de aderência entre fibra / matriz consequência da micro-fissuração introduzida pelas tensões subjacentes ao gradiente térmico. Adicionalmente, os provetes da série sujeita a 500 °C romperam para uma abertura de 1.2 mm, enquanto as séries sujeitas 20 e 400 °C, para uma deformação de 1.5 mm, apresentaram uma resistência considerável, respetivamente, de 1.5 e 1.2 MPa.

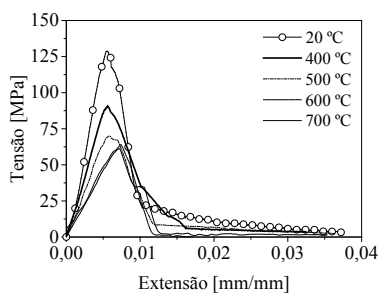


Figura 6. Relação tensão de compressão – extensão

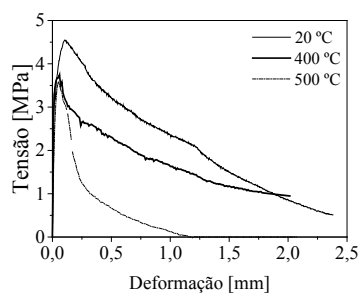


Figura 7. Relação tensão de tração – deformação

3.3. Relação tensão normal de flexão – deslocamento

As curvas médias tensão de tração em flexão – deslocamento a meio vão para cada uma das séries correspondentes às diferentes temperaturas de exposição encontram-se representadas na Figura 8. Para todas as séries foi observado na fase pré-pico um tramo linear até 80 a 90% da tensão máxima de tração em flexão seguido de um ramo não-linear. Para a série de referência, observou-se uma variação gradual da tensão residual de flexão, enquanto para as séries expostas a 400 e 600 °C foram observadas resistências residuais menores e uma variação mais abrupta das mesmas. A resistência residual à flexão da série exposta a 700 °C foi muito reduzida, após uma flecha superior a 1 mm a tensão residual foi praticamente nula.

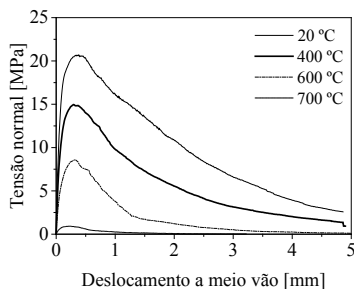


Figura 8. Relação tensão normal de flexão – deslocamento a meio vão.

3.4. Parâmetros do comportamento pós-fissurado

3.4.1. Ensaio de tração uniaxial

A resistência à tração, f_{ctm} , tensão residual para uma abertura de fissure de 1 e 2 mm, respetivamente, σ_{1mm} and σ_{2mm} , foram determinadas a partir da curva média tensão – deformação representada na Figura 8. Adicionalmente, determinou-se a energia dissipada até uma abertura de fissure de 1 e 2 mm, respetivamente, G_{1mm} e G_{2mm} . Na Figura 9 representa-se a variação destes parâmetros com a temperatura de exposição. Na generalidade, estes parâmetros diminuíram com o aumento da temperatura, em particular para a série sujeita a uma temperatura de 500 °C. Este facto poderá estar associado a um dano pré-induzido mais elevado na matriz, para temperaturas superiores a 400 °C, consequência da desidratação do hidróxido de cálcio, o qual contribuirá para o aumento da pressão nos poros da matriz [14]. Para temperaturas superiores a 400 °C, os mecanismos de reforço das fibras são reduzidos significativamente.

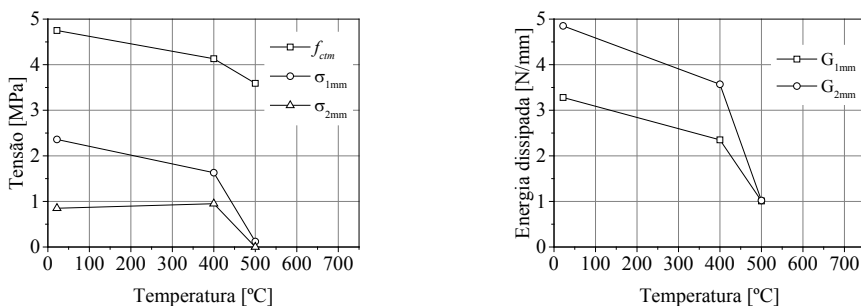


Figura 9. Influência da temperatura nos parâmetros do comportamento pós-fissurado à tração: (a) f_{ctm} , σ_{1mm} e σ_{2mm} , 3 (b) G_{1mm} e G_{2mm} .

3.4.2. Ensaio de flexão em três pontos

Na Tabela 4 incluem-se os valores das resistências residuais de flexão determinadas de acordo com a norma EN-14651 para as diferentes temperaturas de exposição (*Temp.*). As resistências residuais diminuíram com o aumento da temperatura de exposição, em particular para temperaturas superiores a 400 °C. As resistências residuais f_{R1} e f_{R3} têm particular interesse para os estados limites de serviço e últimos, respetivamente. A menor

redução de f_{R1} quando comparada com f_{R3} , poder-se-á atribuir ao facto de para f_{R1} a mobilização das fibras ao arrancamento ainda se encontrar numa fase inicial, consequentemente originado a mobilização de forças de arrancamento menores. Contrariamente, para f_{R3} , o arrancamento das fibras encontra-se num estágio mais avançado, a fissuração provocada pela exposição às temperaturas elevadas contribui para a redução da aderência fibra / matriz, as fibras são arrancadas para forças menores resultando numa menor tensão residual de tração em flexão.

Tabela 4. Resistências residuais de flexão segundo a EN-14651.

Temp.	f_{R1} [MPa]		f_{R2} [MPa]		f_{R3} [MPa]		f_{R4} [MPa]	
	Avg.	CoV	Avg.	CoV	Avg.	CoV	Avg.	CoV
20 °C	20.3	10.1%	13.5	14.9%	8.4	16.5%	5.3	21.6%
400 °C	14.0	16.9%	7.3	17.0%	4.1	17.2%	2.5	15.9%
600 °C	7.5	0.0%	1.8	0.0%	0.8	0.0%	0.3	0.0%
700 °C	0.8	16.2%	0.2	22.3%	0.1	40.5%	0.0	-

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se os principais resultados experimentais de uma campanha experimental para caracterizar o comportamento mecânico de uma composição de “reactive poder concrete” (RPC) sujeito a elevadas temperaturas (400 a 700 °C). Com base nos resultados experimentais pôde-se concluir:

1. Não foi possível eliminar completamente o teor de água dos provetes de RPC quando submetidos a um processo de secagem de 24 horas a uma temperatura de 60 °C. Para estes provetes foi observado uma rotura explosiva para uma temperatura de exposição de aproximadamente 450 °C. Os provetes sujeitos a um processo de secagem de 24 horas não exibiram rotura explosiva, mesmo quando expostos a uma temperatura de 700 °C.
2. A resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade diminuíram mais acentuadamente quando expostos a temperaturas superiores a 400 °C. Para uma temperatura de 600 °C, a redução da resistência a compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração foi de cerca de 50, 62 e 60%, respetivamente, quando comparados os valores para a série de referência.
3. As tensões residuais de flexão diminuíram com o aumento de temperatura, em particular, a partir dos 400 °C. A diminuição do f_{R3} com a temperatura foi mais significativa que a do f_{R1} .

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Zhejiang Boen e MAPEI pelo fornecimento gratuito, respetivamente, das fibras de aço e sílica de fumo. A segunda autora gostaria de agradecer a bolsa obtida no âmbito do programa Erasmus Mundus - Marhaba Project. Os autores agradecem o financiado por fundos FEDER através do Programa COMPETE e fundos Nacionais FCT dos projetos PTDC/ECM-EST/2635/2014 e SFRH/BSAB/114302/2016.

REFERENCIAS

- [1] Cheyrezy M, Maret V, and Frouin L, 1995, Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete), *J. Cem. & Con. Res.* **25** 1491–1500.
- [2] Bonneau O, Poulin C, Dugat J, Richard P, and Aitcin P C , 1996, Reactive powder concretes: from theory to practice, *J. Con. Inter.* **18** 47-9.
- [3] Richard, P and Cheyrezy M H, 1994, Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa Compressive Strength, Concrete Technology Past, Present, and Future, ACI SP 144, editor; P. Kumar Mehta, S. Francisco, USA, 507-18.
- [4] Shu-hua LIU, Li-hua LI and Jian-wen FENG, 2012, Study on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete, *J. Civ Eng. & Cons.*, **1:1**. 6-11
- [5] Richard P, and Cheyrezy M, 1995, Composition of reactive powder concrete”, cement and concrete research, **25(7)**, 1501 –11.
- [6] Schneider U, Diederichs U, Horvath J and et al., 2003, Verhalten von ultrahochfesten betonen (uhpc) unter randbeanspruchung (behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC) under fire exposure), *Beton- und Stahlbetonbau*, **98(7)**, 408–17.
- [7] Majorana C E and Pesavento F, 2000, Damage and spalling in HP and UHF concrete at high temperature,” in *Damage and Fracture Mechanics VI: Computer Aided Assessment and Control*, vol. 6 of *Structures and Materials*, 105–17.
- [8] Ratvio J, 2001, Ultralujan betonin kaytsovellukset Esitutkimus (preliminary study of ultra-strength concrete applications), *VTT Tiedotteita*, **2078**, 3–45.
- [9] Liu C T and Huang J S, 2009, Fire performance of highly flowable reactive powder concrete,” *J. Con. & Buil. Mat.*, **23(5)**, 2072–79.
- [10] Ridha M M S, MohammadAli T Kh, Abbawi Z W, 2013, Behavior of axially loaded reactive powder concrete columns , *J. Eng. & Dev.*, **17- 2**, 193-209.
- [11] Rahmatabadi M A D, 2015, Mechanical properties of reactive powder concrete under pre-setting pressure and different curing regimes, *J. Str. & Civ. Eng. Res.* **4(4)**, 354-58.
- [12] Phan LT., Carino N J, 2001, Mechanical Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures, Gaithersburg, Maryland: NISTIR 6726, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology,.
- [13] Ali F, 2002, Is High Strength Concrete More Susceptible to Explosive Spalling than Normal Strength Concrete in Fire?, *J. Fire Mater.* **26** 127-30.
- [14] Zhang Q, Ye G, 2012, Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature, *J. Ther. Analy. & Cal.* **110**: 153-58.