

Comportamento mecânico de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço após exposição a temperaturas elevadas



Lúcio Lourenço¹



Bárbara Durães²



Joaquim Barros³



Delfina Gonçalves⁴

RESUMO

No presente trabalho analisa-se o comportamento de um Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) após exposição a diferentes níveis de temperatura elevada. Para tal foram efectuados ensaios para determinação da resistência à compressão e resistência à flexão em provetes cilíndricos e prismáticos após exposição a diferentes níveis de temperatura: ambiente, 200°C, 400°C, 600°C e 800°C. Paralelamente, a influência da exposição do BACRFA aos diferentes níveis de temperatura elevada em termos de propriedades físicas foi avaliada recorrendo a ensaios não destrutivos do tipo: velocidade de propagação de ondas ultra sónicas, resistividade e esclerómetro de Schmidt. Com base nos resultados obtidos apresentam-se relações entre as medições efectuadas através dos ensaios não destrutivos e o nível de temperatura elevada a que o BACRFA foi exposto. Como conclusão, efectua-se uma análise comparativa entre o BACRFA e outros dois tipos de betão (após exposição a temperaturas elevadas): simples e betão reforçado com fibras.

PALAVRAS-CHAVE

Temperaturas elevadas; fogo; fibras de aço; ensaios não destrutivos.

¹ CiviTest, Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Braga, Portugal. luciolourenco@civitest.com
² Aluna Mestrado, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barbaradurães@gmail.com
³ ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt
⁴ CiviTest, Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Braga, Portugal. delfinagoncalves@civitest.com

1. INTRODUÇÃO

A exposição accidental de betão ao fogo e/ou temperaturas elevadas origina danos nos elementos estruturais que podem ser significativos, nomeadamente, *spalling* e consequente exposição directa das armaduras à fonte de calor [1-3], perda de rigidez, elevada deformabilidade [4-6], entre outros. Neste contexto, as tarefas de inspecção e avaliação de elementos estruturais que tenham sido sujeitos a este tipo de exposição encerram alguma complexidade devido à dificuldade em avaliar, com rigor, os danos existentes nesses elementos e o seu impacto para a estabilidade da estrutura no seu todo. O procedimento habitual para aferir as propriedades do betão *in situ* passa pela realização de ensaios de caracterização do módulo de elasticidade e de resistência à compressão sobre carotes extraídas dos elementos estruturais afectados. Contudo, esta metodologia apenas fornece uma avaliação local do dano ocorrido, podendo não ser representativa do estado global da estrutura (pode ser uma limitação séria em termos de avaliação da sua estabilidade). Além disso, estes ensaios são destrutivos, provocando danos pontuais em elementos estruturais por si só já degradados.

A utilização de ensaios não destrutivos para análise de estruturas degradadas apresenta-se como uma ferramenta complementar de inspecção e avaliação por apresentar algumas vantagens, nomeadamente: baixo custo de operação, rapidez de execução, possibilidade de se voltar a ensaiar no mesmo local, entre outros. Este tipo de ensaios possibilita inúmeras intervenções na estrutura sem que esta sofra qualquer tipo de dano, permitindo, assim, um levantamento global do estado dos elementos estruturais. Vários estudos foram já efectuados acerca da utilização de ensaios não destrutivos no betão afectado pela exposição a temperaturas elevadas. Contudo, essa investigação centra-se, em geral, em elementos estruturais moldados com betão corrente [7-9]. O facto da composição de um Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras de Aço (BACRFA) poder diferir significativamente da correspondente a betões correntes [10] poderá ter consequências importantes ao nível do comportamento deste compósito face à acção de temperaturas elevadas. Tal facto está na base das motivações que levaram à realização da investigação subjacente a este trabalho.

Assim, nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos sobre o comportamento mecânico residual de um BACRFA (neste trabalho deve-se entender por valor residual de uma dada propriedade do material aquele que foi avaliado após o material ter sido sujeito à acção da temperatura), e discute-se a aplicabilidade de ensaios não destrutivos (velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, resistividade e esclerómetro de Schmidt) como método de inspecção e avaliação de elementos estruturais em BACRFA afectados pela acção de temperaturas elevadas.

1.1 Propagação de ondas ultra-sónicas

O ensaio de medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas no betão (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) apresenta elevado potencial para avaliação das propriedades de elementos estruturais em betão afectados pela exposição accidental ao fogo e/ou temperaturas elevadas. Alguma bibliografia sugere correlações entre a UPV e a resistência mecânica residual de betão [7-9]. Contudo, na maioria dos casos, trata-se de correlações unicamente obtidas para betões sem requisitos de auto compactabilidade, através de medições directas (as quais nem sempre são possíveis de efectuar em procedimentos de inspecção e avaliação). A metodologia de ensaio é regida pela NP EN 12504-4 [11].

1.2 Resistividade

A resistividade eléctrica do betão e a disponibilidade de oxigénio são os parâmetros materiais que mais influenciam a susceptibilidade do betão a fenómenos de corrosão. A sua medição, em conjunto com a medição de potencial eléctrico, é cada vez mais utilizada na inspecção de estruturas de forma a determinar os níveis de corrosão que possam existir. Uma baixa resistividade está correlacionada com uma alta intensidade de corrosão. A resistividade está associada à permeabilidade de fluidos e difusibilidade de iões através de materiais porosos como o betão, daí que também possa ser utilizada para medir indirectamente a capacidade do betão resistir à penetração de iões de cloro, os quais contribuem para a corrosão das armaduras. O ensaio de medição da resistividade eléctrica poderá

também ser aplicado para avaliação de danos estruturais [12], bem como para fornecer dados sobre a existência de fibras de aço e sua distribuição no betão [13].

A aplicação deste tipo de técnica no presente trabalho tem dois objectivos distintos: um primeiro, como auxílio na previsão das propriedades mecânicas residuais do betão em elementos estruturais sujeitos a temperaturas elevadas; um segundo, mais no contexto da durabilidade de elementos em betão, na avaliação do potencial de danos por corrosão em betão afectado por temperaturas elevadas.

1.3 Esclerómetro

A utilização do esclerómetro de Schmidt está profundamente difundida pela Construção Civil. Contudo, a sua aplicação ao nível de elementos estruturais afectados pela exposição a temperaturas elevadas e/ou fogo carece de resultados experimentais que sustentem a sua utilização. Os resultados previamente obtidos [8; 14] fazem crer que a utilização deste tipo de ensaio não destrutivo deverá ser efectuada em paralelo com outro tipo de ensaio, na medida em que a fiabilidade de previsão da resistência do betão é melhorada. Por exemplo, o aumento do teor de humidade do betão aumenta a UPV mas diminui os resultados obtidos pelo esclerómetro [14]. A metodologia deste tipo de ensaio é regida pela NP EN 12504-2 [15].

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Composição do BACRFA

Na composição determinada para o BACRFA foi adoptado cimento (C) do tipo I 42.5 R, areia fina (AF), meia areia (MA), brita calcária (BC), superplastificante (SP) de terceira geração (SIKA ViscoCrete 3002 HE), filler calcário (FC), e fibras de aço (FA) DRAMIX RC-80/30-BP com comprimento l_{fa} de 30 mm, diâmetro (d_{fa}) de 0.38 mm, relação comprimento/diâmetro (l_{fa}/d_{fa}) de 80 e tensão de cedência de 2300 MPa (ver Quadro 1). Os parâmetros medidos para aferir a auto-compactabilidade foram o espalhamento total (ver Fig. 1), s , o tempo que o BACRFA demorou a atingir um espalhamento de 500 mm, T_{50} , e a relação H2/H1 obtida na caixa L Box [16].

Quadro 1. Composições adoptadas para o BAC (por m³ de betão)

C	Água	AF	MA	BC	SP	FC	FA	s	T_{50}	H2/H1
[kg]	[dm ³]	[kg]	[kg]	[kg]	[dm ³]	[kg]	[kg]	[mm]	[s]	
401,7	115,2	257,7	727,5	430,0	7,65	344,3	45	690	4.0	0.875

2.2 Provetes

A avaliação das propriedades mecânicas do BACRFA aos 28 dias, nomeadamente resistência à compressão e resistência à flexão, foi efectuada recorrendo a provetes cilíndricos normalizados (150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) e prismáticos (vigas de 600 x 150 x 150 mm³), respectivamente. Para avaliação das propriedades mecânicas residuais do BACRFA optou-se pela utilização de provetes com menores dimensões, dado ser possível assegurar menor variação de temperaturas no interior dos provetes e menor dano no equipamento de ensaio em caso de *spalling* explosivo no interior da mufla. A avaliação das propriedades mecânicas residuais do BACRFA foi efectuada recorrendo a provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e provetes prismáticos de 250 mm de comprimento, 200 mm de distância entre apoios e 50 x 60 mm² de secção transversal (ver Fig. 2).

2.3 Metodologia de ensaio

Os provetes foram aquecidos até diferentes níveis de temperatura máxima, T_{max} , numa mufla (BARRACHA K9-E) sob controlo de temperatura (TERMOCONTROL 1PR). Os níveis de T_{max} utilizados foram: 200 °C, 400 °C, 600 °C e 800 °C (temperaturas medidas no interior do forno, na zona

Comportamento mecânico de betão auto-compactável reforçado com fibras após exposição a temperaturas elevadas

superior). A velocidade de aquecimento média no interior da mufla foi de 15 °C/min até se atingir o nível de T_{max} pretendido (este era mantido constante durante 4 horas). O arrefecimento dos provetes foi efectuado no interior da mufla. A exposição aos níveis de T_{max} foi efectuada 28 dias após a betonagem dos provetes. Os ensaios não destrutivos foram efectuados na semana anterior à exposição dos provetes a temperaturas elevadas. Estes ensaios foram repetidos na semana anterior ao ensaio de resistência mecânica para avaliar a influência da exposição aos níveis de T_{max} nas propriedades analisadas. A avaliação das propriedades mecânicas residuais do BACRFA foi efectuada 28 dias após os provetes terem sido expostos aos referidos níveis de T_{max} . Durante este período os provetes permaneceram expostos às condições de temperatura e humidade existentes no interior do laboratório.



Figura 1. Espalhamento do BACRFA.



Figura 2. Provetes em BACRFA.

No que respeita aos ensaios de medição da UPV, a frequência dos transdutores utilizados foi de 50 kHz. As leituras do tempo de percurso foram repetidas até se obter um valor mínimo. A temperatura ambiente durante a realização das medições variou entre os 10 °C e os 30 °C, pelo que não foi necessário efectuar qualquer correcção às medições de velocidade devido a fenómenos atribuídos à influência da variação de temperatura. Relativamente ao resistímetro, durante as medições efectuadas as pontas dos eléctrodos (espaçados de 30 mm) eram regularmente humedecidas. A medição foi efectuada aplicando uma corrente sinusoidal com frequências entre 50 Hz e 1 kHz. No caso dos provetes do tipo cilíndrico, foram efectuadas 3 leituras afastadas entre si de 120°, registando-se o valor médio, e duas leituras no mesmo local aplicando uma rotação de 180° às sondas (de forma a aumentar a confiança das leituras). Nas provetes prismáticos, devido à impossibilidade de se realizar duas leituras perpendiculares, as medições foram efectuadas em cada face aplicando uma rotação de 180° às sondas. No que diz respeito às medições efectuadas com o esclerómetro, este foi aplicado na posição vertical, de cima para baixo, sendo realizadas nove leituras por provete. A distância entre os pontos de impacto do esclerómetro e os bordos do provete foi superior a 25 mm.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Caracterização do betão – resistência aos 28 dias

Na Figura 3 apresenta-se a relação tensão vs extensão, σ - ϵ , obtida no ensaio de compressão dos provetes normalizados (o valor médio da resistência à compressão foi 40,1 MPa). As relações entre a tensão de tracção por flexão vs deslocamento vertical a meio vão do provete, σ - δ , obtidas nos ensaios de flexão encontram-se representadas na Fig. 4. Com base nestas curvas e nas recomendações da RILEM TC 162TDF [17] para caracterizar o comportamento pós-fendilhado do Betão Reforçado com Fibras (BRF) obteve-se para os parâmetros de resistência equivalente à tracção em flexão, $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, os valores de 5,65 e 5,79 [MPa], respectivamente (valores médios). Segundo aquele comité técnico, $f_{eq,2}$ é utilizado nas verificações para estados limite de utilização, enquanto $f_{eq,3}$ é aplicado nas verificações para estados limite últimos.

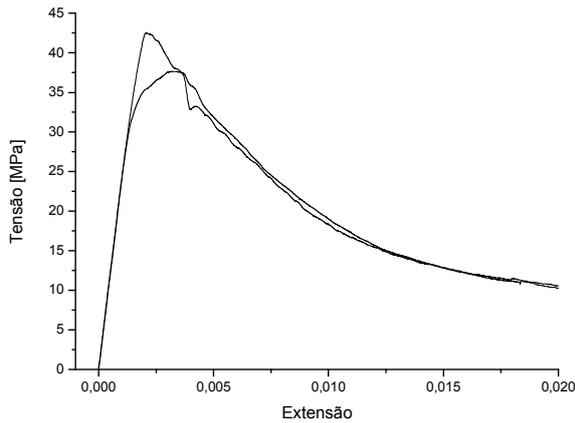


Figura 3. Relação σ - ϵ de compressão nos ensaios com provetes normalizados (28 dias).

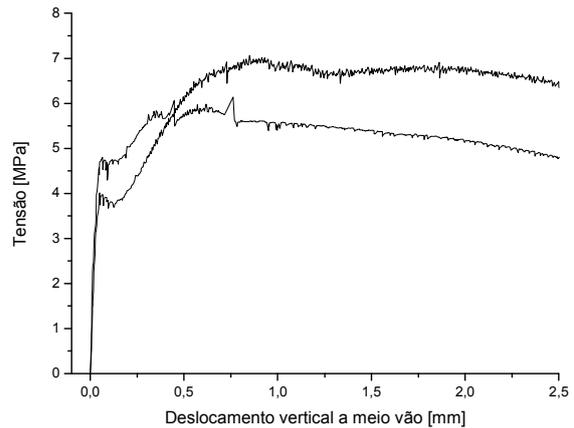


Figura 4. Relação σ - δ nos ensaios de flexão com provetes normalizados (28 dias).

3.2 Variação do peso volúmico após exposição aos diferentes níveis de T_{max}

Na Figura 5 apresenta-se a variação do peso volúmico do BACRFA (após equilíbrio higrométrico com as condições ambientais existentes no laboratório) ocorrida com a exposição do BACRFA aos diferentes níveis de T_{max} . A variação do peso volúmico para $T_{max} = 800$ °C ultrapassou os 10%.

3.3 Variação da resistência à compressão após exposição aos diferentes níveis de T_{max}

Na Figura 6 apresentam-se as curvas σ - ϵ de compressão dos provetes de BACRFA, com 56 dias de idade, após terem sido expostos aos diferentes níveis de T_{max} .

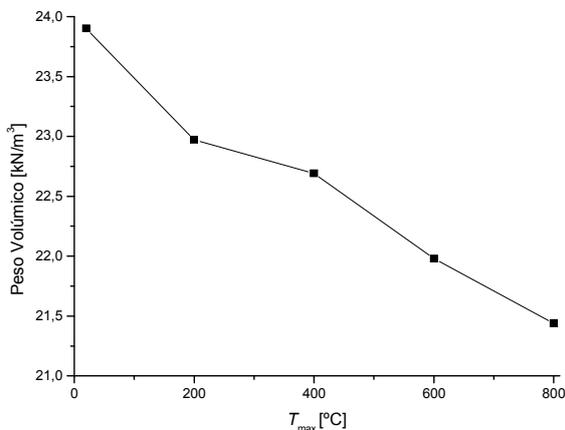


Figura 5. Peso volúmico do BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

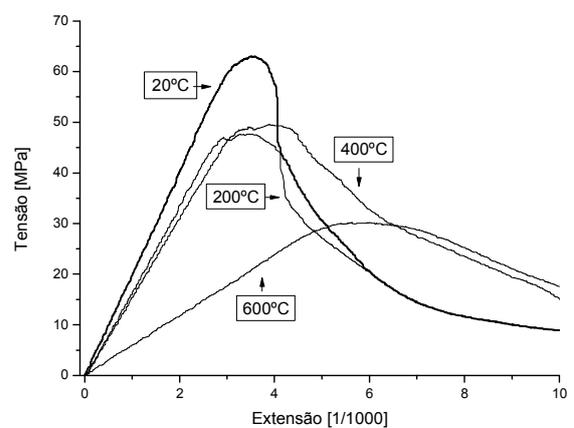


Figura 6. Relação σ - ϵ à compressão do BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

Da análise dos resultados apresentados na Fig. 6 constata-se uma redução do módulo de elasticidade e da tensão máxima de compressão com o aumento do nível de T_{max} . Entre 200 °C e 400 °C o comportamento à compressão do BACRFA parece ser similar. Comparativamente com os resultados apresentados na Fig. 3, verifica-se que os provetes expostos à temperatura ambiente apresentaram maior resistência à compressão, mas tal deve-se à maior idade destes últimos. Os provetes expostos a 800 °C sofreram um processo de desintegração intenso durante os dias que se seguiram à referida exposição, tendo sido impossível submeter estes provetes a ensaio de compressão. Salienta-se, também, a existência de *spalling* explosivo em alguns dos provetes de BACRFA expostos aos níveis de temperatura de 400 °C, 600 °C, e 800 °C. Esta ocorrência sugere que as fibras metálicas não são suficientes para evitar o *spalling* no BACRFA (especialmente no caso de betões de alta resistência). Neste sentido, a utilização de fibras de polipropileno no betão auto compactável parece essencial para controlar a ocorrência de *spalling* e melhorar o comportamento residual do BACRFA perante a exposição a temperaturas elevadas e/ou fogo.

3.4 Variação da resistência à flexão após exposição aos diferentes níveis de T_{max}

Na Figura 7 apresenta-se a variação do comportamento à flexão dos provetes de BACRFA (aos 56 dias de idade) após exposição aos diferentes níveis de T_{max} . Nos ensaios de flexão ocorreu uma redução da rigidez do betão e da força máxima com o aumento do nível de T_{max} , tal como observado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão.

3.5 Variação da UPV com a exposição aos diferentes níveis de T_{max}

Na Figura 8 apresenta-se a variação da UPV no BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} (não foi possível obter medições nos provetes expostos a 800 °C pelas razões previamente apontadas). Os valores apresentados dizem respeito a medições directas com distância entre os sensores de 6 a 25 cm. Não foi possível observar qualquer variação da UPV com a distância entre sensores.

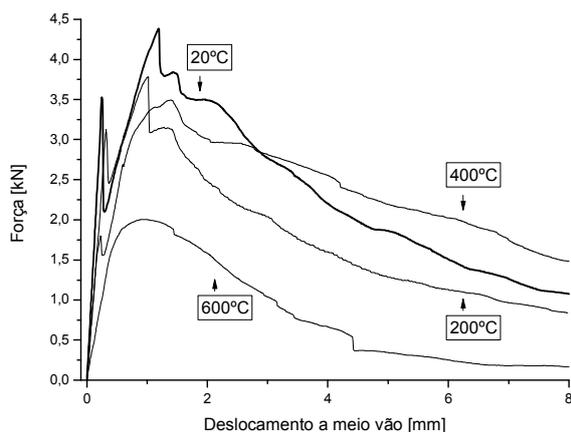


Figura 7. Relação força-flecha nos ensaios de flexão após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

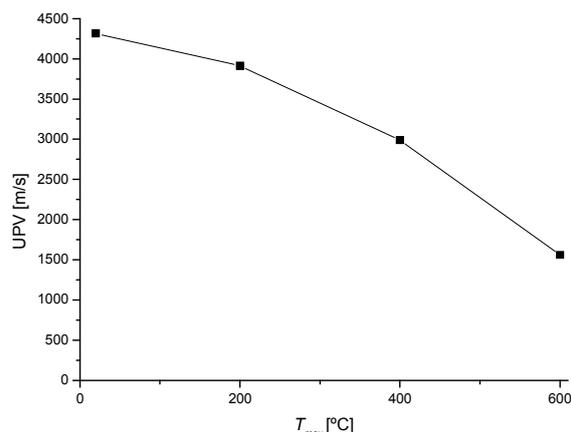


Figura 8. UPV no BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

Como já referido, na maioria dos casos, os resultados encontrados na bibliografia são relativos a medições do tipo directo. Contudo, nem sempre é possível efectuar este tipo de medição em procedimentos de inspecção e avaliação *in situ*. Na Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos através de medições directas, indirectas e semi-directas da UPV em elementos de viga de BACRFA com dimensões de 250 x 50 x 60 mm³ (ver Fig. 10). Os resultados apresentados na Fig. 9 (valores médios) parecem comprovar que a variação de resultados entre os vários tipos de medição diminui com o aumento da distância entre sensores. Nas medições semi-directas, a distância mínima entre sensores, de forma a existir alguma convergência com as restantes medições, foi de 0,125 m. Salienta-se que os valores apresentados representam a UPV obtida sem qualquer factor de correcção.

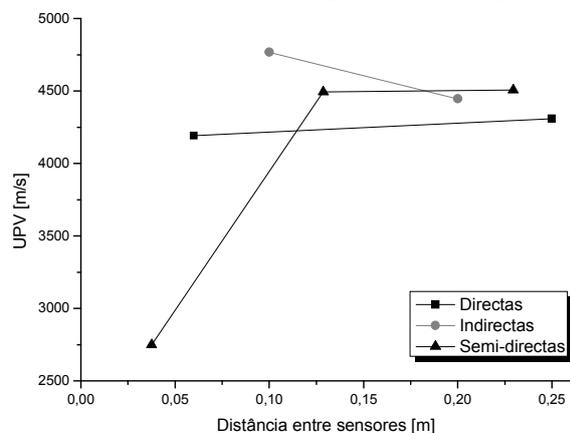


Figura 9. Tipos de medição de UPV para a mesma série de provetes.

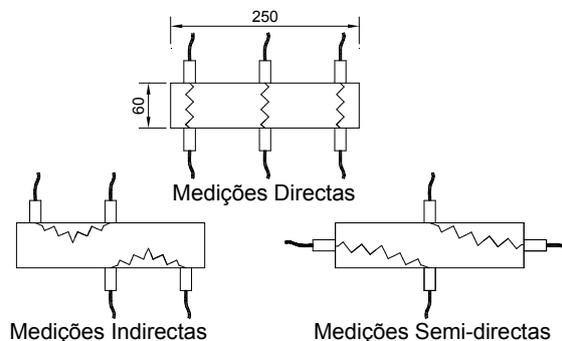


Figura 10. Vários tipos de medição da UPV nos elementos de viga em BACRFA.

Na Figura 11 apresentam-se os resultados obtidos para a UPV obtida através dos três tipos de medição: directa (distância entre sensores de 250 mm), indirecta (distância entre sensores de 200 mm) e semi-directa (distância entre sensores de 225 mm), após exposição dos elementos de viga em BACRFA aos diferentes níveis de T_{max} . Os resultados apresentados na Fig. 11 parecem indicar que, com o aumento do dano provocado pela exposição dos provetes a um maior nível de T_{max} , surge maior discrepância entre a medição directa e os restantes tipos de medições.

3.6 Variação da resistividade eléctrica com a exposição aos diferentes níveis de T_{max}

Na Figura 12 apresenta-se a variação da resistividade medida nos provetes em BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} (não foi possível obter medições nos provetes expostos a 800 °C). Com base nos resultados obtidos, constata-se uma pequena variação da resistividade até aos 400 °C, seguida de uma significativa redução após este limite de temperatura. Sabendo que o risco de corrosão no betão (com cimento do tipo CEM I) para valores de resistividade superiores a 1k Ω é considerado desprezável, constata-se que o potencial de danos por corrosão no BACRFA permanece inalterado após exposição deste aos diferentes níveis de T_{max} .

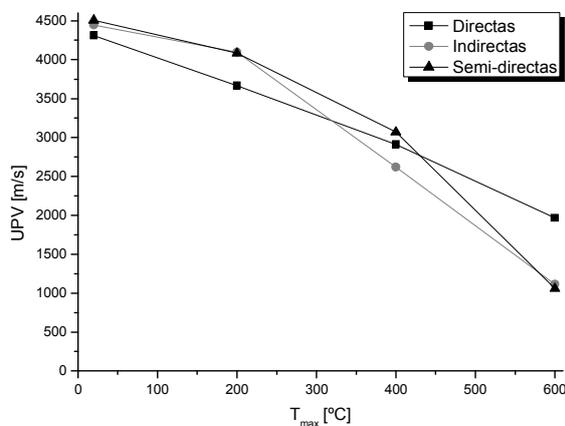


Figura 11. UPV no BACRFA - três tipos de medição após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

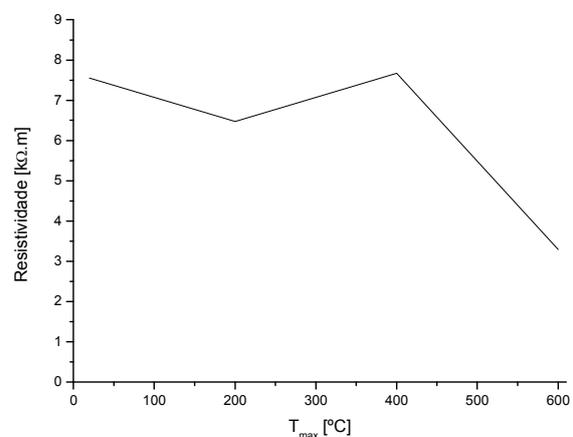


Figura 12. Resistividade eléctrica no BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

3.7 Variação da previsão de resistência obtida pelo esclerómetro com a exposição aos diferentes níveis de T_{max}

Os resultados obtidos relativos à técnica de ensaio não destrutivo do esclerómetro de Schmidt estão apresentados na Fig. 13. Nesta figura estão também incluídos os valores de resistência à compressão obtida nos ensaios destrutivos. Observa-se que a tendência de redução de resistência mecânica com o aumento do nível de T_{max} é comum em ambos os ensaios, tal como esperado, mas os resultados obtidos com o esclerómetro apontam para perdas de resistência mais elevadas que as registadas nos ensaios destrutivos.

3.8 Síntese

A Figura 14 resume os resultados apresentados nos pontos anteriores em termos de variação relativa das medições efectuadas recorrendo a ensaios não destrutivos nos provetes de BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} (inclui os resultados obtidos nos ensaios destrutivos). Com base nos resultados obtidos, constata-se que a UPV parece ser mais eficiente na previsão do nível de T_{max} a que o betão esteve exposto. Relativamente à resistência à compressão, a variação relativa dos resultados obtidos com o esclerómetro apresentou uma maior aproximação com a variação real obtida no ensaio destrutivo.

Comportamento mecânico de betão auto-compactável reforçado com fibras após exposição a temperaturas elevadas

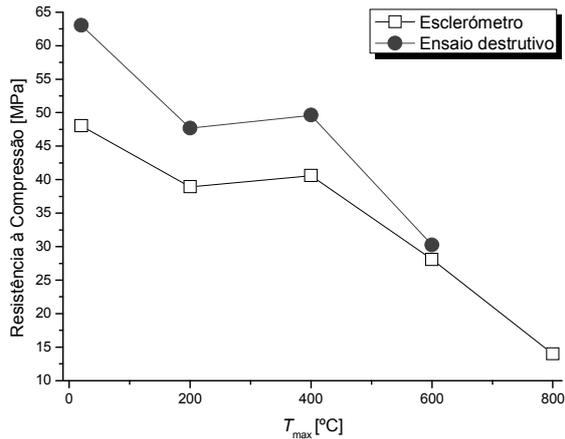


Figura 13. Resistência mecânica prevista pelo esclerómetro no BACRFA após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

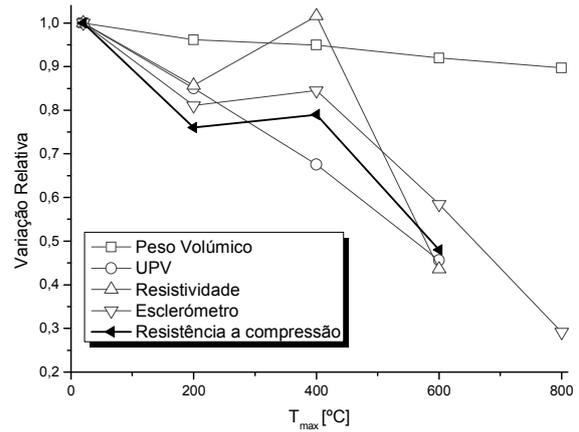


Figura 14. Variação relativa das medições obtidas com ensaios não destrutivos após exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

4. COMPARAÇÃO ENTRE O BACRFA E BETÕES SEM AUTOCOMPACTABILIDADE

4.1 Resistência à compressão residual

Em Lourenço et al., 2008 [7], apresenta-se a variação relativa da resistência à compressão obtida para dois tipos de betão: Betão Simples (BS) e BRF. A Figura 15 compara o comportamento mecânico residual do BACRFA, BS e BRF, em que Δ_{fc} é a variação relativa da resistência à compressão. Com base nos resultados apresentados, constata-se que o comportamento residual do BACRFA assemelha-se ao do BRF, com uma menor perda relativa de resistência à compressão com o aumento de T_{max} relativamente ao BS. Este comportamento melhorado é justificado pela presença das fibras em aço.

4.2 UPV

A relação entre Δ_{fc} e a variação relativa da UPV, Δ_{UPV} , para o BACRFA está apresentada na Fig. 16. Na mesma figura apresentam-se os resultados obtidos em [7] para o BS e para o BRF. Os resultados apresentados parecem indicar que a relação entre Δ_{fc} e Δ_{UPV} é similar para os três tipos de betão. Neste sentido, propõe-se a seguinte equação ($R^2 = 0.947$):

$$\Delta_{fc} = 1.0231 \cdot \Delta_{UPV}^{0.7093} \quad (1)$$

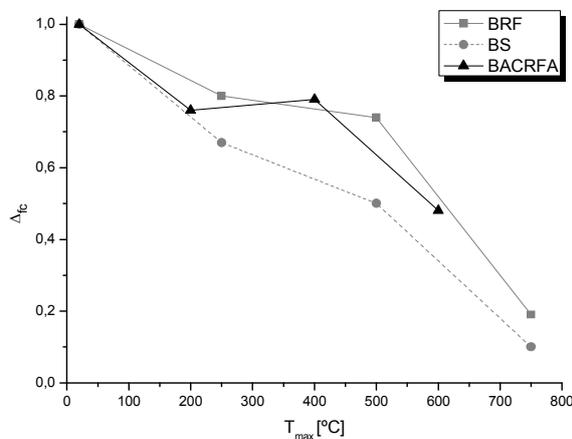


Figura 15. Variação relativa da resistência à compressão de BS, BRF e BACRFA após exposição a diferentes níveis de T_{max} .

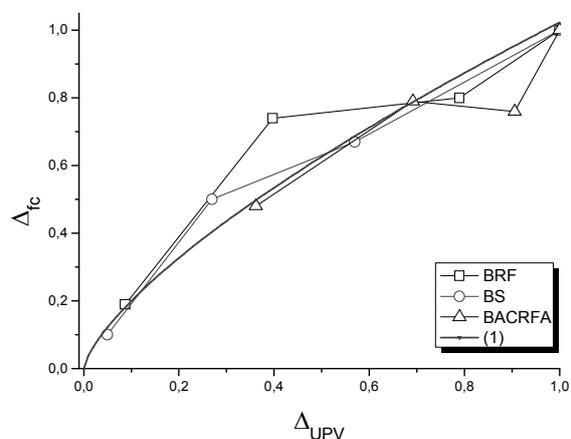


Figura 16. Variação relativa da UPV em BS, BRF e BACRFA após exposição a diferentes níveis de T_{max} .

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos constata-se que, tal como nos betões convencionais (quer sejam reforçados com fibras ou não), o aumento de T_{max} em BACRFA conduz a uma diminuição do módulo de elasticidade e da resistência à compressão (f_{cm}), e a um aumento da extensão correspondente a f_{cm} . Comparativamente ao BS, o BACRFA (tal como o BRF) apresenta uma menor redução da resistência à compressão com o aumento do nível de T_{max} .

A diminuição do peso volúmico do BACRFA após a exposição deste aos diferentes níveis de T_{max} investigados ultrapassou os 10% (para o nível de $T_{max} = 800$ °C).

A existência de *spalling* explosivo em alguns dos provetes de BACRFA expostos aos níveis de T_{max} de 400 °C, 600 °C, e 800 °C demonstra que a percentagem de fibras metálicas adicionadas ao betão não é suficiente para evitar o *spalling* no BACRFA. Neste sentido, a utilização de fibras de polipropileno no betão auto-compactável (especialmente nos betões de alta resistência) pode ser uma solução competitiva para controlar a ocorrência de *spalling*, melhorando o comportamento residual do BACRFA perante a exposição a temperaturas elevadas e/ou fogo.

A UPV varia significativamente com o nível de T_{max} . Tanto o BACRFA como o BRF, por apresentarem maior compacidade que o BS, revelam valores superiores de UPV que os registados em BS. Tal como observado em [7], o reforço do betão com fibras de aço permite menor degradação da rigidez do material e, neste sentido, melhor propagação de ondas ultra sónicas. Os resultados obtidos sugerem, contudo, que a relação entre Δf_c e Δ_{UPV} é independente do tipo de betão em avaliação; neste sentido, sugere-se uma expressão que relaciona as duas variáveis. Com o aumento da distância entre sensores, os resultados obtidos recorrendo aos vários tipos de medição (directa, indirecta e semi-directa) tende a convergir (para os provetes expostos a temperatura ambiente). Nas medições semi-directas, a distância mínima entre sensores, de forma a existir alguma convergência com as restantes medições, foi de 0,125 m. Contudo, com o aumento do dano provocado pela exposição dos provetes a T_{max} , surge maior discrepância entre a medição directa e os restantes tipos de medições.

A UPV parece ser mais eficiente na previsão do nível de T_{max} a que o betão esteve exposto (comparativamente aos ensaios não destrutivos investigados). A previsão da resistência mecânica obtida recorrendo ao esclerómetro de Schmidt demonstrou uma tendência de redução de resistência mecânica com o aumento do nível de T_{max} , tal como verificado nos ensaios destrutivos. Contudo, os resultados obtidos com o esclerómetro apontam para perdas de resistência mais elevadas que os registados nos ensaios destrutivos. Relativamente à resistividade eléctrica do BACRFA, e com base nos resultados obtidos, constata-se uma pequena variação da resistividade até aos 400 °C, seguida de uma significativa redução após este limite de temperatura.

AGRADECIMENTOS

Os autores da presente comunicação pretendem agradecer o apoio no âmbito do Projecto QREN (Co-Promoção n.º 5387 “LEGOUSE - Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados”) e à empresa CIVITEST – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda pela cedência dos equipamentos de betonagem e ensaio. A segunda autora agradece o apoio concedido ao abrigo do Programa de Apoio Inov-Jovem.

REFERÊNCIAS

[1] Kusterle, W.; Lindlbauer, W.; Zeiml, M.; Muchsel, H. (2005). "Fire resistance of concrete tunnel linings - conclusions of large scale tests", Proceedings of ConMat '05 and Mindness Symposium, Vancouver.

Comportamento mecânico de betão auto-compactável reforçado com fibras após exposição a temperaturas elevadas

- [2] Hertz, K.; Sørensen, L. (2005). "Test method for spalling of fire exposed concrete", *Fire Safety Journal*, n.º 40, pp. 466-476
- [3] Kalifa, P.; Menneteau, F.; Quenard, D. (2000). "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures", *Cement and Concrete Research*, 30, 1915-1927.
- [4] Lourenço, L. A. P.; Barros, J. A. O.; Santos, S. P. F. (2007). "High Strength and Ductile Fibrous Concrete of Enhanced Fire Resistance", *April, Materiais 2007, Oporto*, 5p.
- [5] Li, M.; Qian, C.; Sun, W. (2004). "Mechanical properties of high-strength concrete after fire". *Cement and Concrete Research*, 34, 1001-1005.
- [6] Savva, A.; Manita, P.; Sideris, K. (2005). "Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates", *Cement and Concrete Research*, 27, 239-248.
- [7] Lourenço, L.; Barros, J.; Marques, P.; Marques, R. (2008). "Propagação de ondas ultra-sónicas em provetes de betão expostos a temperaturas elevadas", *Betão Estrutural 2008, Guimarães, Novembro*.
- [8] Lourenço, L.; Barros, J.; Rodrigues, J.; Santos, S.; Alves, A. (2006). "Betão Fibroso de Comportamento Melhorado ao Fogo", *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas 2006, Dezembro, 2006, Lisboa*.
- [9] Yang, H.; Lin, Y.; Hsiao, C.; Liu, J. (2009). "Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity", *Fire Safety Journal*, Volume 44, pp. 121-130.
- [10] Barros, J.A.O., Pereira, E.N.B., Santos, S.P.F., Lourenço, L.A.P., Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real, Seminário "Inovação em betões nova normalização de betões especiais, no âmbito da Construnor 2006, Parque de Exposições de Braga, 21 Setembro de 2006.
- [11] NP EN 12504-4. 2007, Ensaaios do Betão nas Estruturas – Parte 4: Determinação da Velocidade de Propagação dos Ultra-sons. Lisboa : IPQ. 18 p.
- [12] Lataste, J. F.; Sirieix, C.; Breyse, D.; Frappa, M. (2003). "Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering", *NDT & E. Internacional*, Volume 36, Issue 6, September, 383-394.
- [13] Lataste, J. F.; Behloul, M.; Breyse, D. (2008). "Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements", *NDT & E. Internacional*, Volume 41, Issue 8, December, 638-647.
- [14] Qasrawi, H. Y. (2000). "Concrete Strength by combined nondestructive methods. Simply and reliably predicted", *Cement and Concrete Research*, 30, 739-746.
- [15] NP EN 12504-2. 2003, Ensaaios do Betão nas Estruturas – Parte 2: Ensaio não destrutivo. Determinação do índice esclerométrico. Lisboa. IPQ. 8 p.
- [16] EFNARC (2002), *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*.
- [17] RILEM TC 162-TDF (2002). "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Final Recommendation", *Materials and Structures*. Volume 35, pp. 579-582.