

Propagação de ondas ultra-sónicas em provetes de betão expostos a temperaturas elevadas



Lúcio Lourenço¹



Joaquim Barros²



Pedro Marques³



Rui Marques⁴

RESUMO

O recurso a ensaios não destrutivos para avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais danificados pela exposição accidental ao fogo ou a temperaturas elevadas apresenta algumas vantagens, nomeadamente, a rapidez de execução e a possibilidade de realização de inúmeras medições sem incremento do dano previamente ocorrido. Entre os diversos ensaios não destrutivos encontra-se o da determinação da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas.

As correlações que podem ser estabelecidas entre os registos obtidos nos ensaios velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (*Ultrasonic Pulse Velocity – UPV*) e as propriedades do betão têm de reflectir o facto dos resultados destes ensaios serem influenciados por diversos factores. No presente trabalho essa influência foi avaliada para os seguintes parâmetros: tipo de reforço metálico (armadura convencional ou fibras de aço) e nível de extensão axial de compressão instalado no material. Para tal foram efectuados ensaios com provetes de Betão Simples (BS), de Betão Armado (BA) e de Betão Reforçado com Fibras (BRF) após exposição a diferentes níveis de temperatura máxima (ambiente, 250°C, 500°C e 750°C). Paralelamente, a influência da exposição de provetes cilíndricos de BS e de BRF aos diferentes níveis de temperatura elevada foi avaliada relativamente ao módulo de elasticidade residual e à resistência à compressão residual destes materiais.

No sentido de extrair informação útil para a aplicabilidade do UPV em situações reais de inspecção, foi efectuada uma primeira abordagem ao uso de técnicas de Data Mining aplicadas à base de dados construída (onde consta informação tal como: UPV; temperatura de exposição; tipo de reforço em aço; extensão axial de compressão). Os resultados preliminares obtidos são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Temperaturas elevadas, fogo, ensaios não destrutivos, ondas ultra-sónicas, Data Mining.

¹ ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. lucio@civil.uminho.pt

² ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. barros@civil.uminho.pt

³ ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. pffmarques@gmail.com

⁴ ISISE, Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. marquesmnc@sapo.pt

1. INTRODUÇÃO

Na inspecção e avaliação de elementos estruturais degradados pela acção de um fogo ou temperaturas elevadas utilizam-se, na maioria das situações, ensaios de caracterização do módulo de elasticidade e da resistência à compressão simples por intermédio da extracção de carotes dos elementos estruturais afectados. Contudo, este procedimento apenas fornece uma avaliação local do dano ocorrido, criando algumas limitações na análise global de toda a estrutura. 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, assim, algumas vantagens, tais como: baixo custo de inspecção; rapidez de execução; possibilidade de se voltar a ensaiar no mesmo local. Este tipo de ensaios possibilita inúmeras intervenções na estrutura sem que esta sofra qualquer tipo de dano, permitindo, assim, um levantamento global dos elementos estruturais [1].

Esta comunicação visa a apresentação dos resultados obtidos para o comportamento mecânico residual de BS, de BA e de BRF, bem como avaliar a aplicabilidade da UPV no betão como método de inspecção e avaliação de elementos estruturais afectados pela acção de um fogo.

1.1 Propagação de ondas ultra-sónicas

O ensaio de UPV consiste na determinação do tempo, T , decorrido entre a emissão de um impulso ultra-sónico produzido por um transdutor-transmissor (a partir de um sinal eléctrico gerado pela unidade central), em contacto com a superfície do material a ensaiar, e a recepção desse mesmo impulso pela unidade central, através de um transdutor-receptor (reconvertido em sinal eléctrico), igualmente em contacto com o material em causa, a uma distância L do transdutor-transmissor. A velocidade, V , de propagação de ondas ultra-sónicas no material em causa é dada pela relação entre L e T . A UPV depende tanto da massa volúmica do material a analisar como das suas propriedades elásticas. O equipamento de ensaio é constituído por uma unidade central (onde se encontra o gerador de impulsos eléctricos, um amplificador e um dispositivo electrónico de medição do tempo) e pelos dois transdutores. Faz parte do equipamento uma barra de calibração (cilindro em aço), com tempo de transmissão conhecido, para permitir a calibração deste. Os ensaios devem ser efectuados em superfícies lisas sendo conveniente usar uma massa de contacto entre os transdutores à superfície, de modo a melhorar a transmissão acústica. Quando a superfície do betão for irregular, esta deverá ser rectificadas. A metodologia de ensaio é regida pela NP EN 12504-4 [2].

Este tipo de ensaio apresenta algumas vantagens, nomeadamente: celeridade de execução, portabilidade do equipamento e facilidade na obtenção de uma grande quantidade de medições. Contudo, os resultados obtidos podem ser largamente influenciados pelas condições da superfície, teor em humidade, temperatura do betão, comprimento do percurso das ondas, tamanho e forma da peça ou do provete, presença de armaduras e existência de fissuras e vazios [2]. O campo de aplicação deste ensaio passa pela determinação da qualidade e homogeneidade dos elementos de betão, pela verificação da existência de vazios e/ou fissuras, bem como pela previsão da profundidade de uma eventual fissura perpendicular à superfície ou da inclinação da mesma. Através de correlações existentes, é possível estimar a qualidade do betão em análise. O ensaio pode, igualmente, ser utilizado para comparação entre diferentes betões, para a monitorização de alterações nos elementos estruturais ao longo do tempo e para o controlo da uniformidade de betões jovens e de pavimentos.

As medições directas e semi-directas têm como finalidade a avaliação das características de resistência mecânica, de homogeneidade e a detecção de descontinuidades no betão. As medições indirectas aplicam-se, fundamentalmente, na determinação de fissuras. As medições semi-indirectas aplicam-se, somente, na impossibilidade de colocação dos transdutores segundo o método directo. No caso da transmissão indirecta existe alguma incerteza quanto ao comprimento exacto do percurso da transmissão devido à dimensão significativa das áreas de contacto entre os transdutores e o betão. Por esta razão, é recomendável efectuar várias medições a diferentes distâncias para minimizar esta incerteza.

1.2 Data Mining

Dada a complexidade e a não-linearidade dos fenómenos actualmente estudados na Engenharia, técnicas estatísticas tradicionais de previsão, tais como a regressão linear ou quadrática, têm vindo a ser substituídas por métodos sofisticados, inspirados nos processos de inteligência e aprendizagem naturais. Os procedimentos experimentais em Engenharia são propícios à criação de repositórios de dados que registam o relacionamento das variáveis associadas a um fenómeno. O Data Mining (DM) é uma ferramenta privilegiada para a análise destes conjuntos de informação, dado que permite transformar dados (no estado bruto) em conhecimento, através da descoberta de padrões e tendências entre estes. Neste estudo, a base de dados que se submete a este processo foi a obtida no programa experimental executado, com o objectivo de obter modelos de previsão para os fenómenos estudados, bem como verificar a possibilidade de se estabelecer relações entre as variáveis que dominam o problema.

Com os dados obtidos no presente programa experimental foram testadas distintas técnicas de DM, desde a tradicional técnica de regressão múltipla, passando pelos métodos não paramétricos de árvores de regressão e de k-vizinhos próximos, até às técnicas não lineares baseadas em redes neuronais e em máquinas de vectores de suporte. O processo de DM foi executado no ambiente estatístico da ferramenta R [3]. Nesta ferramenta utilizou-se a biblioteca RMiner [4], a qual facilita o uso de diferentes técnicas de DM, recorrendo a pacotes disponíveis no *software* R.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Composição do betão

Na composição seleccionada para o BS foi adoptado cimento (CEM) do tipo I 42.5R, areia mista (AM) e dois tipos de britas calcárias (B1: 5-12 mm; B2: 14-20 mm). Na composição seleccionada para o BRF foi adoptado cimento do mesmo tipo, superplastificante (SP) de terceira geração (SIKA ViscoCrete® 3002 HE), filler calcário (FC) e quatro tipos de agregados: areia fina (AF), bago de arroz (BA) e os dois tipos de britas calcárias referidos (B1 e B2). Ao BRF foram adicionados dois tipos de fibras: fibra de aço (FA) DRAMIX® RC-80/60-BN, com comprimento l_{fa} de 60 mm, diâmetro (d_{fa}) de 0.75 mm, relação comprimento/diâmetro (l_{fa}/d_{fa}) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa; fibras de polipropileno (FP) DURO-FIBRIL®, com diâmetro (d_{fp}) de 31 μ m e comprimento de 6 mm. As composições adoptadas para os provetes de BS e BRF estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Composições adoptadas para o BS e BRF (por m³ de betão)

	CEM [kg]	Água [dm ³]	SP [dm ³]	FC [kg]	AF [kg]	BA [kg]	AM [kg]	B1 [kg]	B2 [kg]	FP [kg]	FA [kg]
BS	300.0	194.2	-	-	-	-	934.2	461.6	436.0	-	-
BRF	300.2	120.5	7.0	228.0	533.6	457.6	-	295.0	294.3	1.0	60.0

2.2 Provetes

A avaliação dos parâmetros residuais de resistência mecânica - módulo de elasticidade e resistência à compressão - foi efectuada em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O comportamento residual à flexão, no caso dos provetes de BRF, foi determinado através de ensaios em vigas de 600 x 150 x 150 mm³. O comportamento residual à compressão, no caso dos provetes de BS e de BA (ver Figura 1 - Ø10 como armadura longitudinal e Ø6 como transversal), foi também determinado através de ensaios em protótipos de pilares com 150 x 600 x 150 mm³ (em paralelo com os ensaios de compressão de provetes cilíndricos).

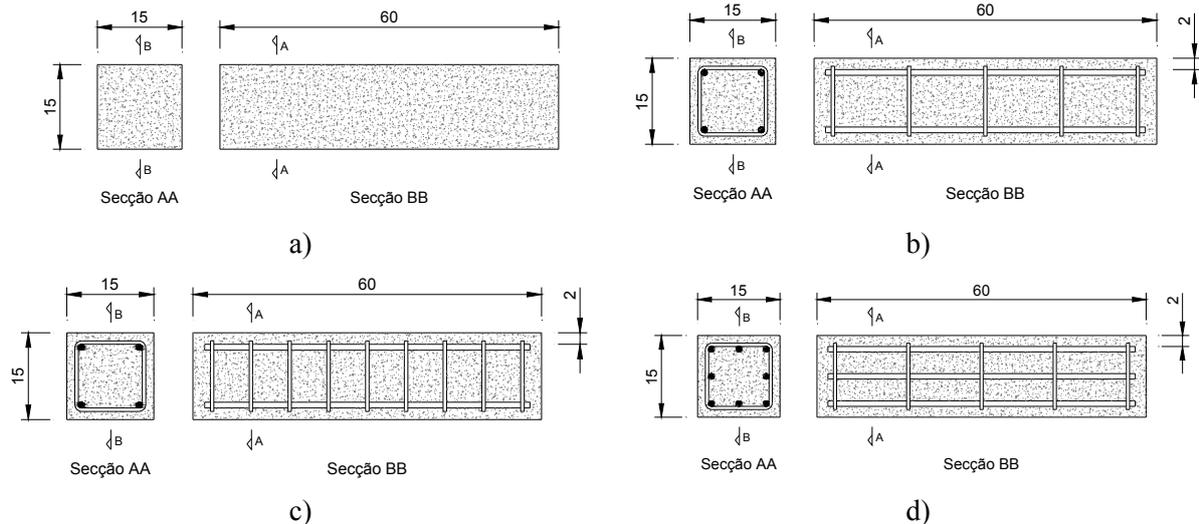


Figura 1: Protótipos de pilar. a) provete em BS; b) a) d) provetes em BA [cm]

2.3 Metodologia de ensaio

Os provetes foram aquecidos até diferentes níveis de Temperatura Máxima, T_{max} , numa mufla (BARRACHA K9-E) com controlo de temperatura (TERMOCONTROL 1PR). Os níveis de temperatura máximos testados foram: 250 °C, 500 °C e 750 °C. Após se atingir o nível de T_{max} desejado, este era mantido constante durante 4 horas para permitir a homogeneização da temperatura no betão. O arrefecimento dos provetes foi efectuado no interior da mufla. O procedimento adoptado para o aquecimento e arrefecimento dos provetes está apresentado em [5]. A exposição referida, a diferentes níveis de T_{max} , foi efectuada 28 dias após a betonagem dos provetes. A avaliação das propriedades mecânicas, bem como a determinação da UPV, foram efectuadas 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.

A frequência dos transdutores utilizados para medição da UPV 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 ocorreu entre os 10°C e os 30°C não sendo, neste caso, necessário efectuar qualquer correcção às medições de velocidade devido a fenómenos de variação de temperatura. A distância entre os transdutores foi de 150 mm (medições directas). A dimensão mínima lateral do provete foi de 150 mm, valor superior ao aconselhado no Quadro B.1 da NP EN 12504-4 [2].

2.4 Objectivos

Como referido, o presente programa experimental enquadra a realização de dois tipos de ensaios, não destrutivos (neste caso, UPV) e destrutivos, nomeadamente:

- avaliação da variação do módulo de elasticidade residual e do comportamento σ - ϵ residual à compressão em provetes cilíndricos em BS e BRF (diâmetro de 150 mm e altura de 300 mm) após exposição a diferentes níveis de T_{max} . Os provetes rectangulares (150 x 150 x 600 mm³) em BRF foram ensaiados à flexão e os em BS e BA foram ensaiados à compressão;
- UPV nos provetes de BS, de BA e de BRF com dimensão 600 x 150 x 150 mm³ após exposição aos diferentes níveis de T_{max} ;
- obtenção da curva UPV versus ϵ axial de compressão, para os provetes em BS e BA (ver Figura 1), após exposição a diferentes níveis de T_{max} . Os dados provenientes destas medições foram recolhidos com vista à obtenção de uma base de dados para análise recorrendo ao DM.

3. RESULTADOS

3.1 Módulo de elasticidade

Os valores para o módulo de elasticidade residual do BS e do BRF, E_{cmT}^{res} , após exposição a diferentes níveis de T_{max} , são apresentados na Figura 2a. A Figura 2b representa a variação do módulo de elasticidade residual do betão, E_{cmT}^{res} , em relação ao seu valor a 20 °C, E_{cm} , em função de T_{max} . Da análise dos resultados apresentados na Figura 2 constata-se que o BRF apresenta uma menor redução de E_{cmT}^{res} , relativamente ao BS, com o aumento do nível de T_{max} de exposição.

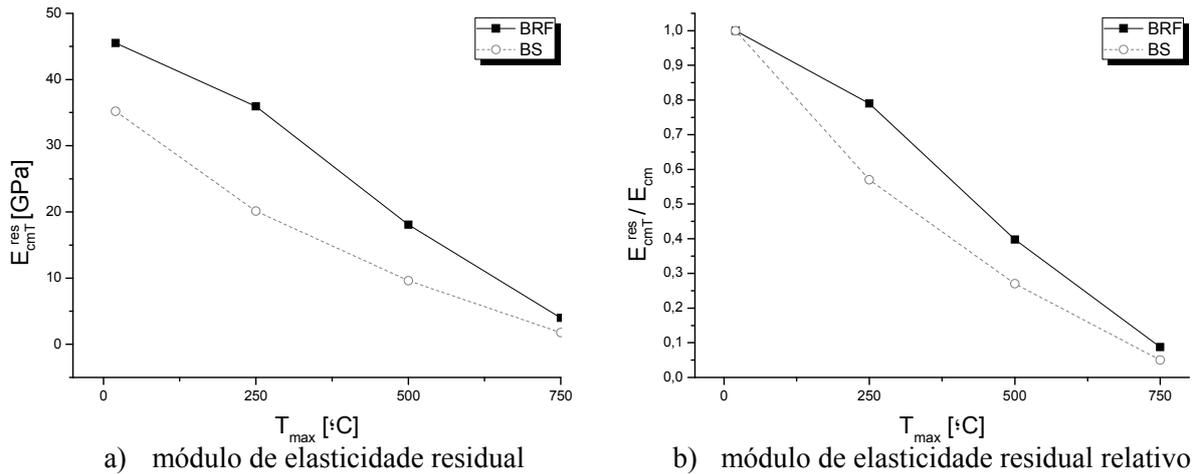


Figura 2: Variação do módulo de elasticidade residual

3.2 Resistência à compressão

Após a exposição aos níveis de T_{max} referidos, os provetes cilíndricos de BS e BRF desenvolvidos apresentaram o comportamento à compressão directa representado na Figura 3. Analisando comparativamente o comportamento σ - ϵ à compressão do BS e do BRF constata-se que o BRF é o que apresenta menor redução de resistência à compressão. A Figura 4 apresenta a variação da resistência à compressão do BS e do BRF em relação ao seu valor a 20 °C. Na Figura 5 comparam-se os resultados obtidos para o BS e BRF desenvolvidos com o proposto no CEB-FIP [6] relativamente à variação relativa do módulo de elasticidade com a resistência à compressão. A utilização da relação prevista entre E e f_c no CEB-FIP para betões não expostos a níveis de temperatura elevada poderá conduzir a resultados menos rigorosos para betões expostos, pois parece existir uma maior diminuição de f_c do que de E (comparativamente à relação proposta).

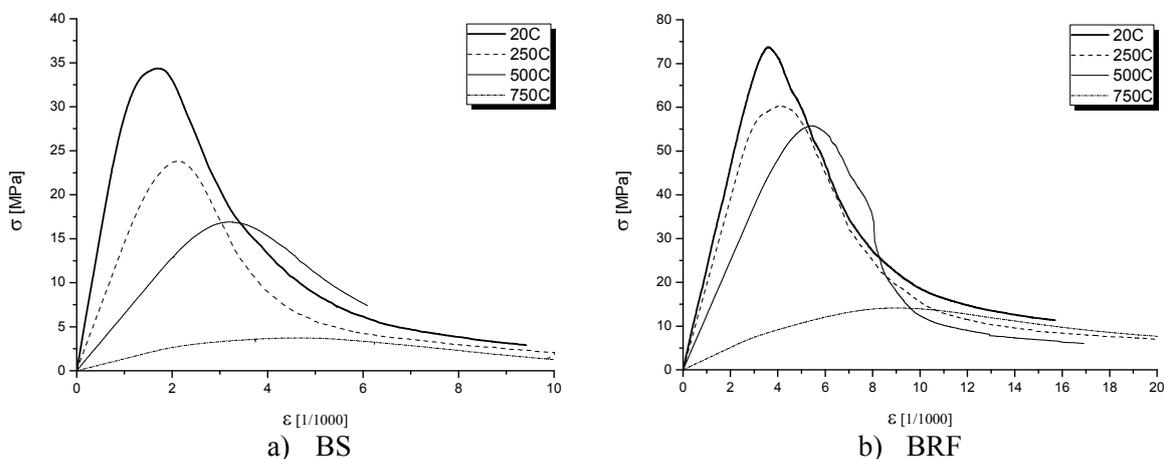


Figura 3: Comportamento à compressão residual dos provetes em BS e BRF

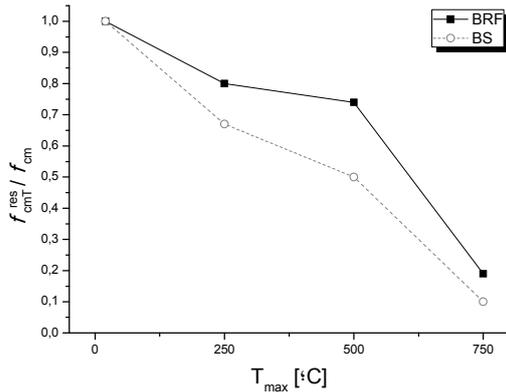


Figura 4: Variação de f_c com T_{max}

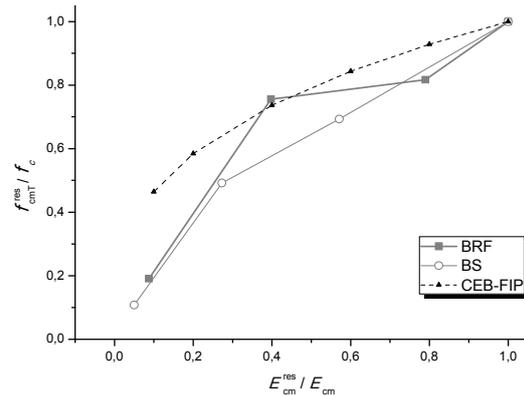
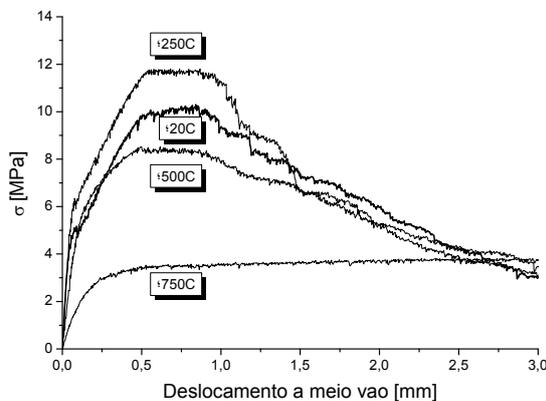


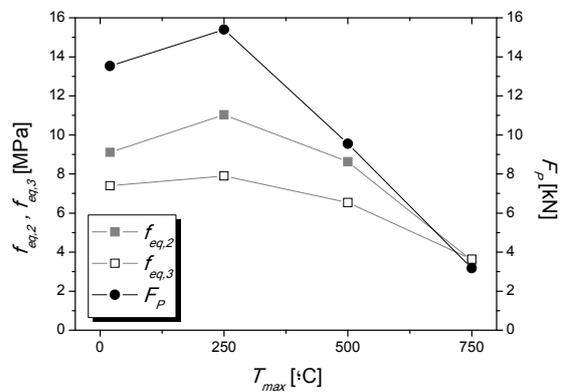
Figura 5: Relação entre E e f_c

3.3 Resistência à flexão dos provetes “viga” em BRF

O comportamento à flexão residual do BRF é apresentado na Figura 6a. Na Figura 6b apresenta-se a variação dos parâmetros de resistência equivalente com o nível de T_{max} de exposição.



a) Comportamento σ -deslocamento a meio vão



b) Parâmetros de resistência equivalente

Figura 6: Comportamento à flexão dos provetes em BRF

3.4 Resistência à compressão dos provetes “pilar” em BS

A relação σ - ϵ de compressão obtida nos ensaios dos provetes “pilar” em BS e BA (para $T_{max} = 500^\circ\text{C}$) está apresentada na Figura 7 (a totalidade dos resultados encontra-se em [7]). Da análise dos resultados salienta-se a ductilidade introduzida pelas cintas nos provetes de betão armado e o facto de estas terem garantido menor degradação ao betão com a exposição aos diferentes níveis de T_{max} .

3.5 Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, UPV

Na Figura 8 apresentam-se os resultados obtidos nas medições directas efectuadas nos provetes em BS e BA. Como referido anteriormente, a ductilidade devida à maior quantidade de armadura originou uma menor degradação do betão, conduzindo a uma UPV ligeiramente superior, especialmente com o aumento do nível de T_{max} . Na Figura 9a apresentam-se os resultados obtidos nas medições de UPV para os provetes “viga” em BRF, comparando-se os resultados com os obtidos para o BS e BA (somente para a série representada na Figura 1c). O BRF, por apresentar maior compacidade, revela valores superiores de UPV relativamente ao BS e BA. Nos provetes em BA, a partir dos 250 °C, é visível o efeito favorável que as cintas metálicas proporcionam, dado garantirem menor degradação do betão (menor largura de fendas). Analisando em termos de valores relativos (ver Figura 9b) constata-se que o reforço com fibras de aço foi o que permitiu maiores níveis de retenção da UPV, isto é, foi o sistema de reforço que mais resistiu ao efeito de degradação da rigidez do material face ao aumento do nível de T_{max} aplicada aos provetes.

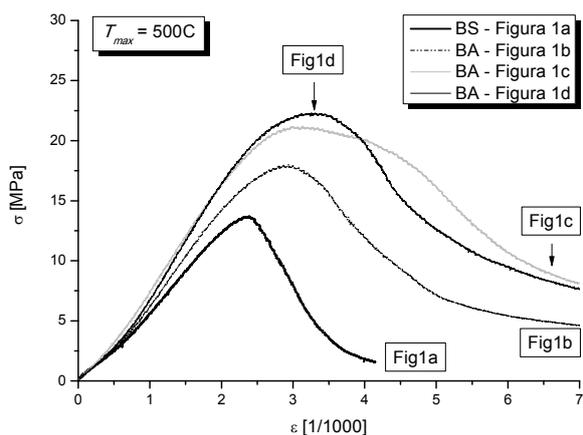


Figura 7: Comportamento à compressão dos provetes em BS e em BA ($T_{max} = 500^{\circ}\text{C}$)

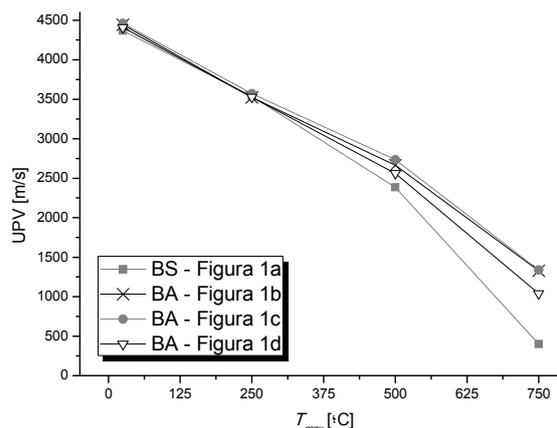


Figura 8: Variação da UPV nos provetes em BS e em BA

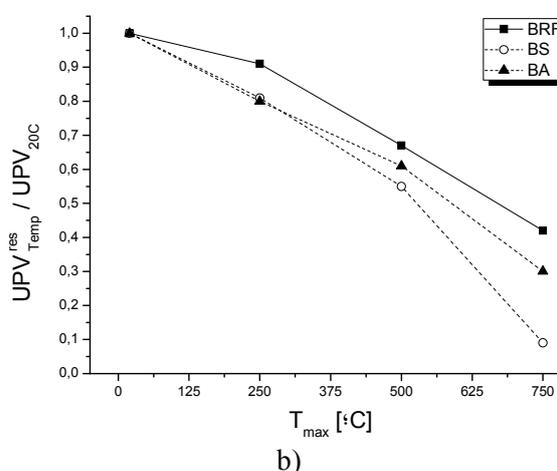
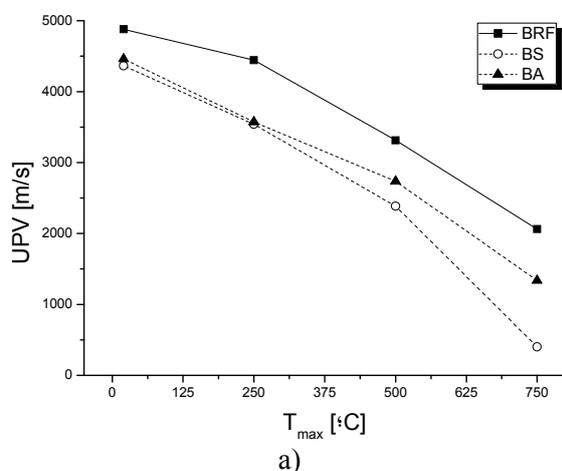


Figura 9: Variação da UPV nos provetes em BRF (comparação com provetes em BS e BA)

Nas Figuras 10, 11 e 12 apresenta-se a relação entre a variação relativa da UPV e a variação relativa de E e f_c para os provetes de BS e de BRF e a variação relativa dos parâmetros de resistência equivalente ($f_{eq,2}$, $f_{eq,3}$ e F_L) para os provetes de BRF. Da análise dos resultados constata-se existir uma relação aproximadamente linear entre a variação da UPV, quer com a variação de E , como com a variação de f_c (a única exceção ocorreu no BRF para os 500 °C). Relativamente aos parâmetros de resistência equivalente, a referida relação linear só existe a partir dos 250 °C.

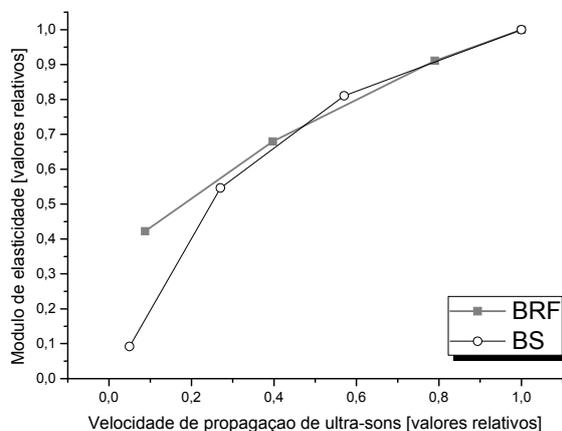


Figura 10: Variação da UPV versus variação do E_c para os provetes de BS e BRF

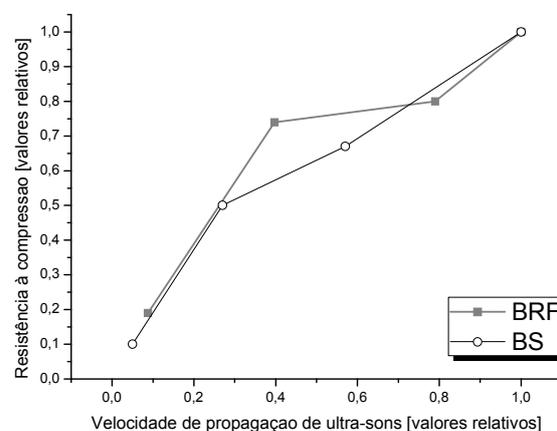


Figura 11: Variação da UPV versus variação de f_c para os provetes de BS e BRF

3.6 Variação da UPV com a extensão axial de compressão

Os provetes tipo “pilar” em BS e em BA (ver Figura 1), foram sujeitos a ensaio de compressão. Durante a execução do ensaio foram efectuadas medições da UPV (ver Figura 13), no centro do provete. Na Figura 14 apresenta-se o resultado obtido para o provete em BS ($T_{max} = 20^{\circ}\text{C}$; ver Figura 1a; resultados para os restantes provetes apresentados em [7]), com a variação da UPV e relação σ - ε de compressão. Da análise da Figura 14 constata-se que, até ao momento da microfendilhação (entre os 70 e 80 % da resistência do material), a UPV mantém-se praticamente inalterável, pois a rigidez do material não se altera significativamente.

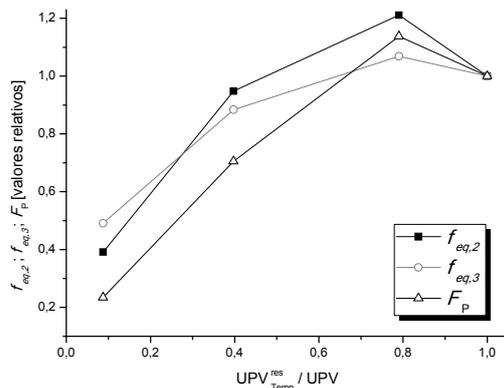


Figura 12: Variação da UPV *versus* variação dos parâmetros de resistência equivalente

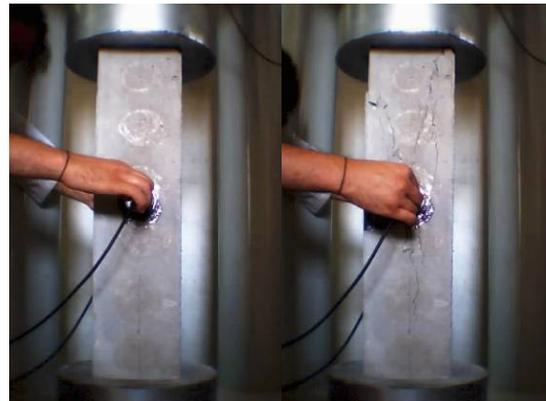


Figura 13: Medições de UPV durante o ensaio de compressão dos provetes em BS e BA

3.7 Processo de Data Mining (DM)

Numa primeira abordagem ao uso de técnicas de DM como ferramenta para a previsão da extensão axial relativa ($\varepsilon / \varepsilon_{\sigma,máxima}$, sendo $\varepsilon_{\sigma,máxima}$ a ε ocorrida para $\sigma_{máxima}$) num determinado elemento estrutural, recorrendo a UPV, criou-se uma base de dados com os resultados obtidos nos ensaios de compressão dos provetes rectangulares em BS e BA. A base de dados é constituída por 665 registos e inclui dados para a extensão relativa, nível de T_{max} e tipologia de reforço.

As diversas técnicas de DM foram comparadas relativamente à capacidade de previsão através de diversas medidas de desempenho. Adoptou-se um esquema de avaliação usando 10 execuções de uma validação cruzada 5-desdobrável [4], determinando-se o valor médio das métricas de erro e o respectivo intervalo de confiança via teste t-student para um nível de confiança de 95%. A primeira medida de desempenho baseia-se no conceito da curva REC (Regression Error Characteristic) [4] (ver Figura 15) a qual consiste na representação cartesiana da tolerância de erro (eixo horizontal), dada em termos do desvio absoluto *versus* a percentagem de pontos previstos dentro dessa tolerância (eixo vertical). O regressor ideal deveria apresentar uma área REC de 1.0. A comparação das curvas REC permite concluir que a técnica que apresenta melhor desempenho na previsão da extensão relativa é a de k-vizinhos próximos (KNN). Num segundo patamar surgem as técnicas não lineares baseadas em redes neuronais (NN) e em máquinas de vectores de suporte (SVM), mostrando piores desempenhos a árvore de regressão (RT) e a regressão múltipla (MR). A representação de pares de valores estimado-medido para a extensão relativa reforça a ideia de que KNN apresenta melhor acuidade, pois verifica-se uma maior concentração de pontos ao longo da linha a 45° (Figura 16). Para melhor avaliar o desempenho das várias técnicas, foram ainda calculadas as seguintes métricas: Desvio Absoluto Médio (DAM); Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM); e coeficiente de correlação de Pearson (COR) [4]. Do Quadro 2 confirma-se a supremacia de KNN, observando menores valores para DAM e REQM, e maior COR. Ajustando a extensão relativa com KNN, o COR do modelo é de 0.92 ± 0.05 . Contudo, a previsão efectuada somente em função de UPV e T_{max} resulta num COR de 0.88 ± 0.006 , caindo, significativamente, para 0.70 ± 0.010 quando se estima a extensão relativa unicamente em função de UPV.

No Quadro 3 mostram-se os resultados da análise de sensibilidade. Constata-se que a UPV é a variável mais influente, seguindo-se T_{max} e a tipologia de reforço.

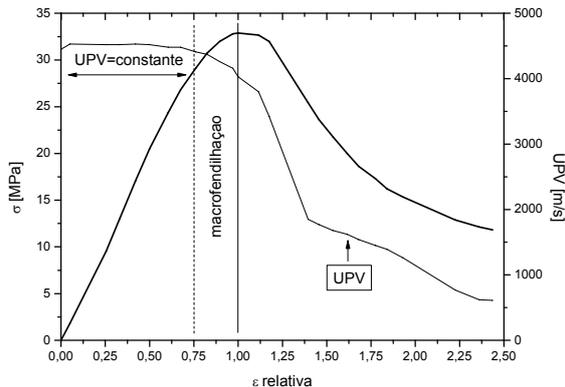


Figura 14: Variação de σ de compressão e UPV com $\epsilon_{relativa}$ axial de compressão

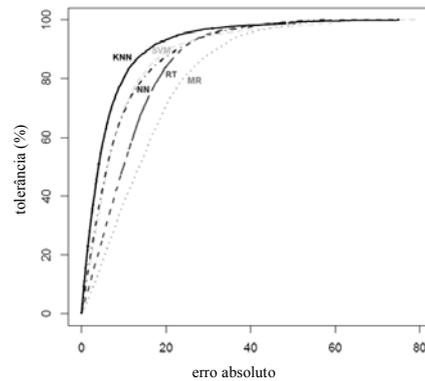


Figura 15: Comparação gráfica de desempenho entre as diferentes técnicas de DM

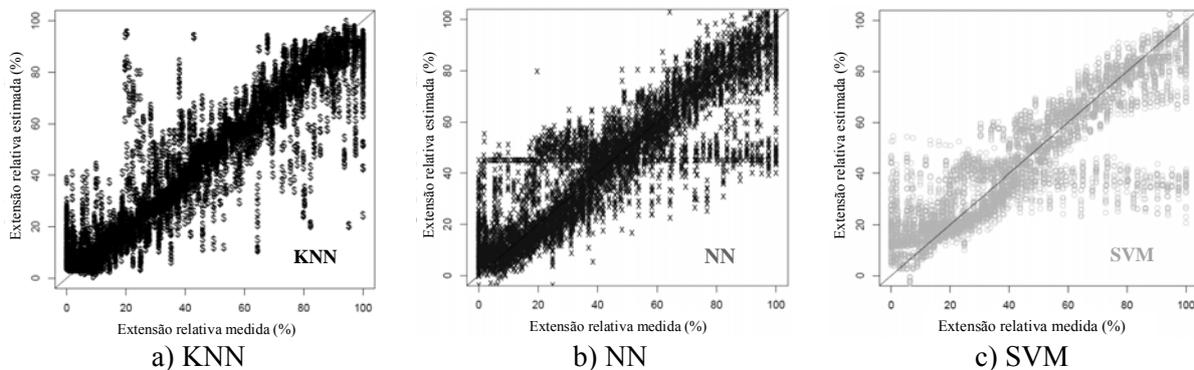


Figura 16: Comparação gráfica de desempenhos entre diferentes técnicas de DM

Quadro 2 - Métricas de desempenho

	KNN	NN	SVM
DAM	6.91 ± 0.18	9.37 ± 0.77	9.66 ± 0.10
REQM	11.46 ± 0.22	13.57 ± 0.10	14.73 ± 0.16
COR	0.92 ± 0.05	0.88 ± 0.02	0.86 ± 0.00

Quadro 3 - Importância das variáveis na previsão da extensão relativa [%]

	UPV	T_{max}	Reforço
KNN	85.22	11.82	2.96
NN	82.82	12.17	5.01
SVM	72.83	25.12	2.05

4. CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados experimentais obtidos constata-se que os provetes em BRF apresentam uma menor redução de E e f_c com o aumento do nível de T_{max} . A utilização da relação prevista no CEB-FIP entre E e f_c para betões não expostos a níveis de T_{max} poderá conduzir a resultados menos rigorosos para betões expostos, pois parece existir uma maior diminuição de f_c do que de E (comparativamente à relação proposta). Existe uma relação aproximadamente linear entre a variação da UPV, quer com a variação de E , como com a variação de f_c . Relativamente aos parâmetros de resistência equivalente, a referida relação linear só existe a partir dos 250 °C.

A UPV varia significativamente com o nível T_{max} . O BRF, por apresentar maior compacidade, revela valores superiores de UPV relativamente ao BS e BA. O reforço do betão com fibras de aço permitiu maiores níveis de retenção da UPV, isto é, foi o sistema de reforço que mais resistiu ao efeito de degradação da rigidez do material face ao aumento do nível de temperatura máxima aplicada aos provetes. O efeito favorável das cintas metálicas (menor largura de fendas) nos provetes em BA foi observado a partir dos 250 °C, tanto em termos de resistência mecânica como relativamente à UPV.

Constatou-se que, até ao momento da macrofendilhação (entre os 70 e 80 % da resistência do material), a UPV mantém-se praticamente inalterável, pois a rigidez do material não se altera significativamente. A UPV decresce com a entrada na zona de resposta σ - ϵ não linear. No caso de inspeção e avaliação de um elemento estrutural (pilar) de um edifício que tenha sido exposto à acção de um fogo, a UPV poderá ser uma boa ferramenta para a previsão da perda de rigidez do pilar em causa. Para tal, e recorrendo a ensaios de carga, poderá ser possível prever a proximidade com a carga de colapso, se ocorrer, com o aumento da carga, uma redução da UPV. Se tal ocorrer, o betão do pilar estaria com dano elevado, isto é, na zona da resposta tensão-extensão não linear e, conseqüentemente, na eminência de rotura.

A técnica de DM que melhor se ajusta ao problema em estudo é a baseada em k-vizinhos próximos (KNN). Ajustando a extensão relativa com KNN, o COR do modelo é de 0.92 ± 0.05 . Desconhecendo a quantidade e disposição da armadura convencional de reforço, o modelo apresenta um COR ligeiramente inferior. Contudo, o desconhecimento de T_{max} conduz a uma redução significativa de COR. As variáveis mais influentes no modelo desenvolvido são a UPV e T_{max} .

AGRADECIMENTOS

Os autores da presente comunicação pretendem agradecer às empresas CIVITEST – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda pela cedência dos equipamentos de betonagem e ensaio e à António L. Rodrigues, Lda pela cedência das armaduras. Os dois primeiros autores agradecem o apoio concedido ao abrigo do projecto financiado pela FCT: FICOFIRE – POCTI/ECM/57518/2004.

REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, R.; CAETANO, L.; SILVA, R.; GASTAL, F.; FILHO, L. “Difração de raios-X e ultra-som: usando ensaios não-destrutivos eficazes para análise de estruturas sinistradas”, Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC2005, Volume III – Efeito do Fogo em Estruturas de Concreto, IBRACON, 2005, pp. 64-75.
- [2] NP EN 12504-4. 2007, Ensaios do Betão nas Estruturas – Parte 4: Determinação da Velocidade de Propagação dos Ultra-sons. Lisboa : IPQ. 18 p.
- [3] R Development Core Team (2006). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL: <http://www.R-project.org>.
- [4] CORTEZ, P. - RMiner: Data Mining with Neural Networks and Support Vector Machines using R, In Introduction to Advanced Scientific Softwares and Toolboxes, 2007, International Association for Engineering, In press.
- [5] LOURENÇO, L.; BARROS, J.; RODRIGUES, J.; SANTOS, S.; ALVES, A.; “Betão Fibroso de Comportamento Melhorado ao Fogo”, Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas 2006, Dezembro, 2006, Lisboa.
- [6] Comité Euro-International du Bétón (1993), CEB-FIP Model Code 1990, “Design Code”.
- [7] MARQUES, P.; “Inspeção e avaliação da estabilidade estrutural de uma estrutura após ter sido submetida à acção de um incêndio”, Projecto Individual, Licenciatura em Engenharia Civil, Setembro, 2007.