

ANÁLISE DE TEMPERATURA NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO

Paulo A.G. Piloto^{*1}, Ana B.R. Gavilán², Luís M.R. Mesquita³

¹Instituto Politécnico de Bragança, IDMEC, Bragança, Portugal

²EPSZ, Universidad de Salamanca, Zamora, España

³Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal

*Email: ppiloto@ipb.pt

RESUMO: *Este trabalho pretende analisar a distribuição de temperatura em doze ensaios de resistência ao fogo, realizados em elementos de viga parcialmente embebidos com betão. Estes elementos são normalmente constituídos por elementos em aço laminado ou soldado, com introdução de betão armado entre os banzos dos perfis. O betão é responsável pelo aumento da rigidez do elemento e pelo aumento da resistência ao fogo. Para determinar a resistência ao fogo destes elementos, foram realizados doze ensaios normalizados e medidas as temperaturas nos diferentes materiais, em três secções distintas. Os resultados experimentais permitem concluir que a temperatura não é uniforme na secção, embora o aquecimento efectuado seja responsável por uma temperatura média quase uniforme, ao longo do comprimento do elemento.*

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de viga parcialmente embebidos com betão têm sido extensivamente testados à temperatura ambiente por diferentes investigadores, contudo o seu comportamento em condições de incêndio não se encontra totalmente conhecido.

Ref. [Kindmean et al, 1993] realizaram 13 ensaios em elementos de viga com e sem influência de ligação mecânica com a laje, demonstrando a importância do reforço do betão armado no momento resistente à flexão. Esta investigação permitiu a adaptação de novas regras de projecto do eurocódigo 4 para este tipo de elemento.

Ref. [Hosser et al, 1994] realizaram ensaios de resistência ao fogo em 4 elementos de viga mistos, parcialmente embebidos com betão. Este estudo permitiu desenvolver um modelo de cálculo para determinar a largura efectiva da laje.

Ref. [Plumier et al, 1995] desenvolveram 12 ensaios para teste das ligações entre vigas e colunas parcialmente embebidas com betão. Estes autores concluíram que o comportamento dos elementos não dependia do tipo de ligação (soldada, aparafusada) nem da dimensão da espessura da alma. A cedência destes pórticos verificou-se nos elementos de viga e a presença do betão condicionou o modo de instabilidade dos banzos dos elementos de viga.

Ref. [Lindner and Budassis, 2000] efectuaram 22 ensaios à temperatura ambiente, com duas secções metálicas distintas. Os autores apresentaram uma nova proposta de dimensionamento do elemento à encurvadura lateral torsional, tendo em consideração a rigidez à torção do betão.

Ref. [Maquoi et al, 2002] foram responsáveis pelo estudo de resistência à encurvadura lateral destes elementos de viga parcialmente embebidos, apresentando novas propostas para o dimensionamento à flexão. O momento crítico e o momento resistente à encurvadura lateral torsional foram revistos e melhorados.

Ref. [Assi et al, 2002] desenvolveram um estudo teórico e experimental sobre a capacidade resistente última de elementos de viga parcialmente embebidos com betão. Para tal realizaram 12 ensaios para testar diferentes qualidades de betão, concluindo que a utilização de betão de densidade normal proporciona valores de resistência à flexão pouco superiores quando comparado com a utilização de betão leve.

Ref. [Kodaira et al, 2004] efectuaram 8 ensaios de resistência ao fogo em vigas parcialmente embebidas com betão. Os autores demonstraram que o reforço é eficiente nestas condições. Os ensaios foram parcialmente validados com simulação numérica.

Ref. [Elghazouli and Treadway, 2008] realizaram 10 ensaios à escala real sobre este tipo de elementos para avaliação do desempenho inelástico. Os investigadores apresentam um estudo sobre a influência do endurecimento do aço por deformação, do confinamento do betão e a extensão dos elementos com secção plastificada na capacidade resistente destes elementos.

Ref. [Nardin and El Debs, 2009] analisaram o comportamento de 3 elementos mistos com secção parcialmente embebida com betão, avaliando diferentes posições relativas dos conectores. Os resultados experimentais confirmam o funcionamento misto deste tipo de secções e o aumento da resistência à flexão.

Neste trabalho pretende-se determinar e avaliar o comportamento térmico destes elementos, quando submetidos à flexão em condições de incêndio. É apresentada a evolução da temperatura em três secções distintas e determinado o valor da temperatura crítica. Este estudo pretende avaliar a distribuição da temperatura ao longo do comprimento do elemento exposto a estas condições. A avaliação da temperatura no interior do forno foi testada experimentalmente e validada numericamente num trabalho anterior [Piloto et al, 2009]. Os ensaios de resistência ao fogo foram realizados de acordo com a norma europeia [EN1361-1, 1999]. Nesta norma são definidos os procedimentos para a realização de ensaios de flexão para qualquer tipo de elemento de construção, em particular os elementos de viga parcialmente embebidos com betão. Os elementos foram submetidos a processo de aquecimento normalizado com a curva nominal [ISO834-1, 1999], depois de estabelecido o valor do nível de carga a que se encontravam submetidos. Os ensaios tiveram duração distinta, em função da capacidade demonstrada pelo elemento para manter a capacidade de carga. Foram utilizados três níveis de carga distintos (40, 60 e 80% do valor do momento plástico da secção) e duas condições de ligação para os estribos (soldados e não soldados).

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os elementos de viga foram construídos com perfis IPE100 em aço S275, parcialmente revestidos com betão de densidade normal C20/25, utilizando agregados de base de silício. Foram utilizadas barras de reforço longitudinal com diâmetro de 8 mm e estribos com barras de diâmetro de 6 mm, ambos com qualidade B500. A secção destes elementos está representada na figura 1, considerando os dois tipos de ligação mecânica para os estribos. Os estribos foram espaçados de 167 mm ao longo do comprimento do elemento. Estes elementos foram betonados no laboratório em duas fases, sem necessidade de utilização de cofragens, com um intervalo de 7 dias. Os ensaios foram realizados após 60 dias da primeira betonagem.

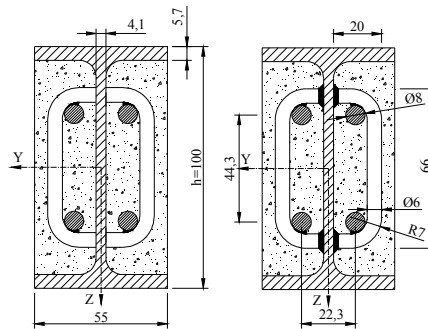


Fig 1. Dimensões da secção recta.

A superfície dos materiais não teve qualquer tratamento especial, devendo ser considerada no estado normal dos fornecedores. Os reforços foram soldados aos estribos e à alma do perfil pelo processo MAG (caso W), e atados com arame aos estribos (caso NW).

Os ensaios foram preparados de acordo com as condições apresentadas na tabela 1. Foram definidas 4 séries de três ensaios, realizados nas mesmas condições. A série 2 e 3 permitem comparar o efeito da ligação do reforço, enquanto que as séries 1,2 e 4 permitem avaliar o comportamento destes elementos para diferentes níveis de carga mecânica.

Tab. 1 – Identificação dos elementos ensaiados.

Série	Identificação elemento	Estribos [W / NW]	Ação térmica	Ação mecânica [%M _{pl}]
1	B/1.2-01	W	ISO834	40%
	B/1.2-02	W	ISO834	40%
	B/1.2-03	W	ISO834	40%
2	B/1.2-04	W	ISO834	80%
	B/1.2-05	W	ISO834	80%
	B/1.2-06	W	ISO834	80%
3	B/1.2-07	NW	ISO834	80%
	B/1.2-08	NW	ISO834	80%
	B/1.2-09	NW	ISO834	80%
4	B/1.2-10	W	ISO834	60%
	B/1.2-11	W	ISO834	60%
	B/1.2-12	W	ISO834	60%

Cada elemento foi posicionado no interior do forno de resistência, ver figura 2, submetido a uma carga concentrada a meio vão (ação mecânica constante) e uma ação térmica definida pela curva de incêndio nominal.

O forno possui uma potência máxima de 360 [kW], utiliza quatro queimadores com funcionamento a gás. O controlo da evolução da temperatura dentro do forno é efectuado com auxílio de um termopar de placa, cumprindo com as especificações de funcionamento da norma de ensaio [EN1361-1, 1999]. A distância entre os apoios “L_s” mede 1.21 m, o comprimento de exposição ao fogo “L_f” mede 1.0 m e o comprimento total do elemento “L_t” mede 1.37 m. O apoio inferior apresenta restrições ao deslocamento nas direcções Z/Y e restrições à rotação nas direcções Z/X. O apoio superior apresenta restrições ao deslocamento nas direcções Z/Y e restrições à rotação nas direcções X.

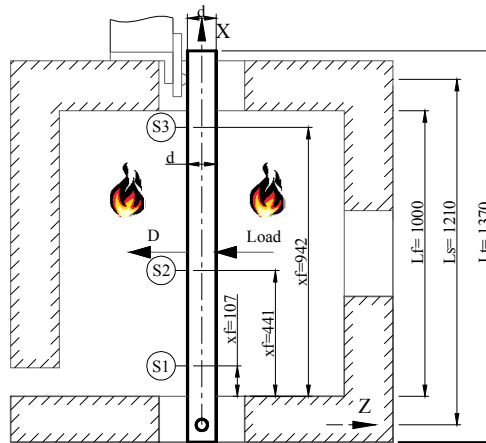


Fig 2. Condições de ensaio e identificação das secções S1-3 (dimensões em mm).

Os ensaios de resistência ao fogo servem para avaliar o comportamento de qualquer elemento de construção e em particular dos elementos de viga parcialmente embebidos com betão em condições de incêndio. O método de ensaio permite quantificar a capacidade do elemento suportar o valor da acção mecânica quando submetido a temperaturas crescentes, utilizando um critério específico para definir o estado limite último. O valor da resistência ao fogo pode ser expresso no domínio do tempo ($t_{fi,d}$ – valor de resistência ao fogo em minutos completos) ou no domínio da temperatura ($\theta_{cr,d}$ – Temperatura crítica), correspondente ao estado limite último.

Foram definidas 3 secções para controlo da temperatura em cada elemento, utilizando cinco termopares tipo K para cada secção S1 / S3 e 6 termopares para a secção S2. Alguns termopares foram soldados directamente no perfil (Si-FS, Si-OS, Si-WS) e nos reforços (Si-RS), enquanto que outros foram soldados em pequenas porcas de aço, embebidas nas posições definidas para medição da temperatura do betão (Si-IC e Si-OC), ver figura 3.

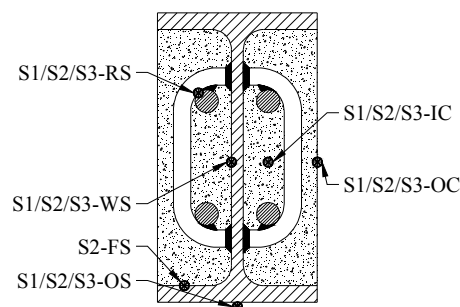


Fig 3. Posição dos termopares para diferentes secções.

A aquisição da temperatura em cada ponto (junção) foi efectuada com uma frequência de 2 [Hz], enquanto que a temperatura do forno (termopar de placa) foi medida com uma frequência de 0.5[Hz].

Foram ainda determinadas as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (aço do perfil, aço do reforço e betão). Estes ensaios foram realizados à tracção e à compressão. Os resultados estão representados na tabela 2.

Tab. 2 – Valores mais significativos dos ensaios de resistência dos materiais.

Material	Tensão de cedência	Tensão última tração / compressão
ReH [MPa] (fy) Perfil	302.466±5.749	431.252±5.020
ReH [MPa] (fy) Reforço	531.508±7.908	626.574±11.539
f _{ck,cube} [MPa] betão	-	21.45±1.03

As propriedades térmicas mais significativas dos materiais (condutividade, calor específico) não foram medidas, contudo o valor da condutância térmica na interface aço – betão foi determinada em 80 kW/m² [Piloto et al, 2008].

O critério utilizado para definir os Estado Limite Último (ELU) foi determinado de acordo com a norma de ensaio [EN1361-1, 1999]. Este critério permite classificar a capacidade resistente do elemento (classificação R), independentemente do modo de colapso atingido. A resistência ao fogo foi definida como o tempo transcorrido desde o instante em que iniciou o aquecimento e o instante em que o elemento deixou de ter capacidade para suportar a carga imposta. Este critério foi definido com base nas medições efectuadas para o deslocamento máximo verificado no elemento de viga (D) e nos cálculos efectuados para a taxa de variação do deslocamento (dD/dt). O ELU foi considerado quando ambos os parâmetros (D e dD/dt) excederam o valor limite, eq. 1.

$$D = L^2/400 d \quad [mm]$$

$$dD/dt = L^2/9000 d \quad [mm/min] \quad (if D \geq L/30) \quad (1)$$

A aplicação deste critério permite determinar o tempo de resistência ao fogo (t_{fi,d}) e o valor da temperatura crítica do elemento (θ_{cr,d}).

2.1. Temperaturas

A curva nominal de incêndio foi utilizada para provocar o aquecimento do elemento. As temperaturas foram registadas em 3 secções distintas, S1- S3, para verificar a homogeneidade deste processo produzido pelo forno de resistência. A máxima diferença de temperatura crítica registada entre as secções e a temperatura média do elemento foi inferior a 3.2 % para os ensaios da série 1. Para os restantes ensaios das séries 2-4, este resultado foi inferior a 5.1%, 6.3% e 11.2%, respectivamente. Estes resultados permitem concluir que a variação da temperatura no comprimento do elemento não é muito significativa.

A temperatura registada em cada secção não é uniforme, verificando-se uma diferença de 150 °C entre os valores medidos no exterior da secção e os valores registados no interior, definindo duas evoluções distintas, conforme se pode comprovar nos resultados das figuras 4-7. Nestas figuras estão representados os valores das temperaturas registadas pelos termopares da secção S2. A temperatura registada no exterior é superior aos valores da temperatura registada no interior. A oscilação inicial no perfil da temperatura é proporcionada pelo nível de humidade existente no betão. O ensaio B/1.2-09 apresentou maiores fissuras no betão, comparativamente com os ensaios realizados na série 2, motivo pelo qual se registou maior valor na temperatura no interior do elemento.

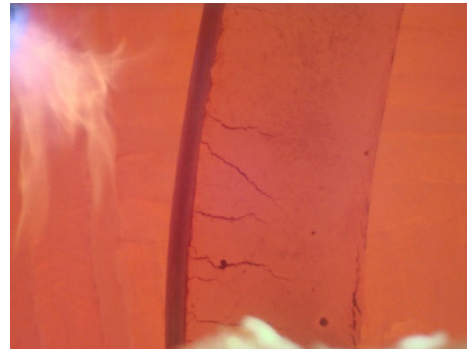
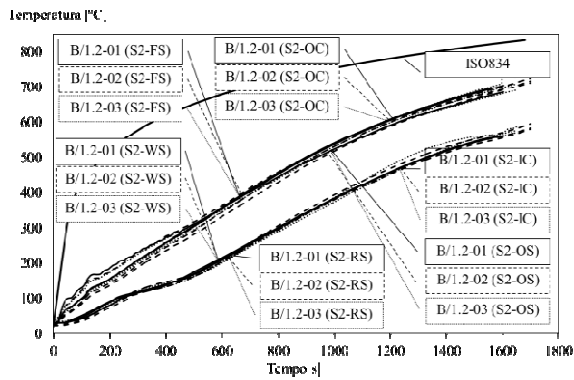


Fig 4. Evolução da temperatura na secção S2, série 1.

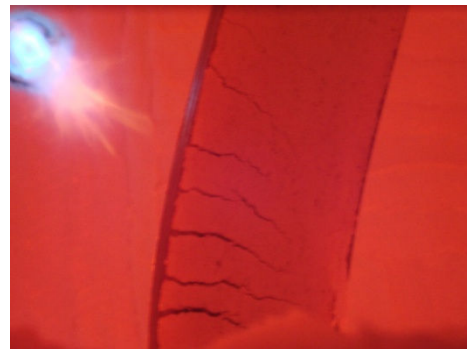
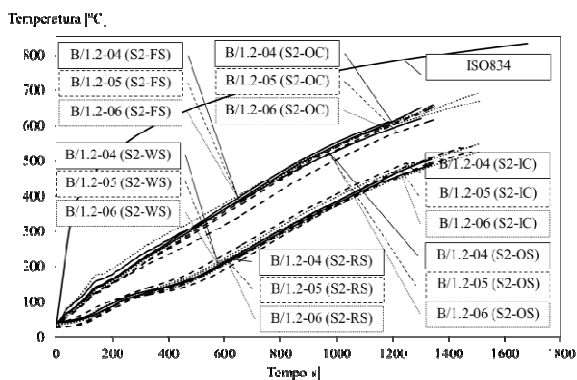


Fig 5. Evolução da temperatura na secção S2, série 2.

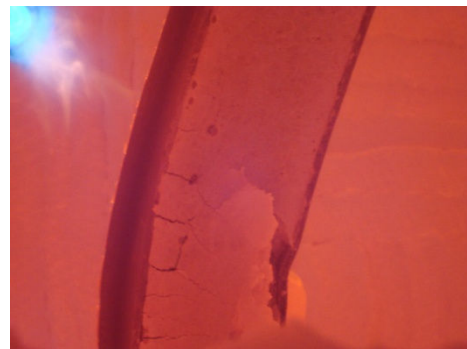
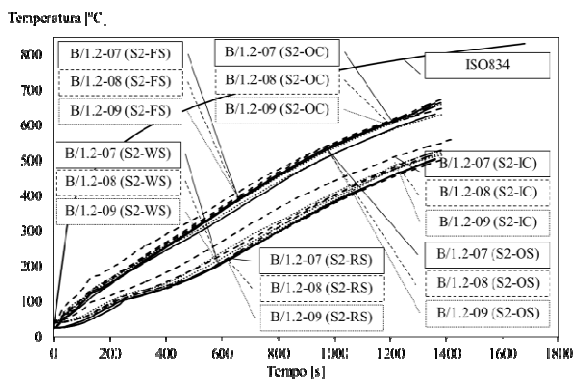


Fig 6. Evolução da temperatura na secção S2, série 3.

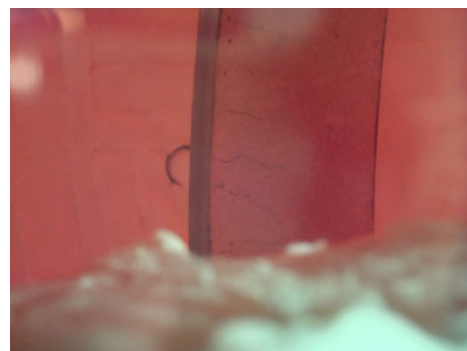
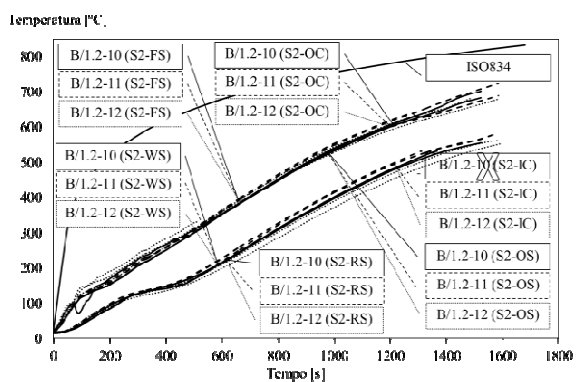


Fig 7. Evolução da temperatura na secção S2, série 4.

O ensaio B/1.2-10 perdeu o registo da temperatura medida no interior do betão (S2-IC).

As figuras 8-11 representam a evolução da temperatura ao longo de cada elemento, para cada série de ensaios. A temperatura crítica foi determinada para cada material, utilizando um valor médio ponderado com a área de influência de cada registo. Os valores T_{is} , T_{ic} e T_{ir} representam o valor da temperatura no perfil, no betão e no reforço, definidos para cada secção S_i ($i=1,2,3$), sendo determinados de acordo com eq. 2.

$$T_{is} = (2Af(S_iOS) + Aw(S_iWS)) / (2Af + Aw)$$

$$T_{ic} = [1/4Ac(S_iIC) + 3/8Ac(S_iIC + S_iOC) + 3/8Ac(S_iIC + S_iOS)] / (Ac) \quad (2)$$

$$T_{ir} = S_iRS$$

Onde A_f representa o valor da área do banzo, A_w representa o valor da área da alma, A_c representa o valor da área do betão, A_r o valor da área do reforço e A_t representa o valor da área da secção recta.

A temperatura crítica de cada secção é determinada através da eq. 3 e a temperatura crítica do elemento, $\theta_{cr,d}$, obtida pela média ponderada do valor da temperatura crítica de cada secção, eq. 4.

$$T_{Si} = [T_{is}(Aw + 2Af) + T_{ic}(Ac) + T_{ir}(Ar)] / A_t \quad (3)$$

$$\theta_{cr,d} = [TS_1 + 2TS_2 + TS_3] / 4 \quad (4)$$

Nas figuras 8-11 estão representadas as temperaturas de cada secção T_{Si} para instantes de tempo discretos, com incrementos de 5 minutos e a distribuição de temperatura no elemento para o ELU, correspondente ao instante crítico. Os resultados confirmam que o processo de aquecimento foi quase uniforme ao longo da superfície exposta. O efeito do isolamento nos apoios é evidenciado pela menor temperatura registada nas secções S1 e S3.

Os modos de colapso foram semelhantes para todos os ensaios da série 1. Todos os elementos atingiram o ELU com formação de uma rótula plástica. O parâmetro taxa de deslocamento atingiu o seu valor limite para o instante de tempo $t=20$ minutos, no entanto sem verificar a condição de aplicabilidade. A resistência ao fogo destes ensaios foi exactamente igual, $t_{fi,d}=25$ minutos.

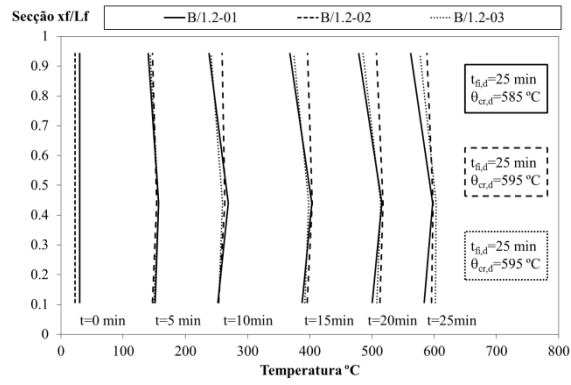


Fig 8. Evolução da temperatura nas secções expostas ao fogo, série 1.

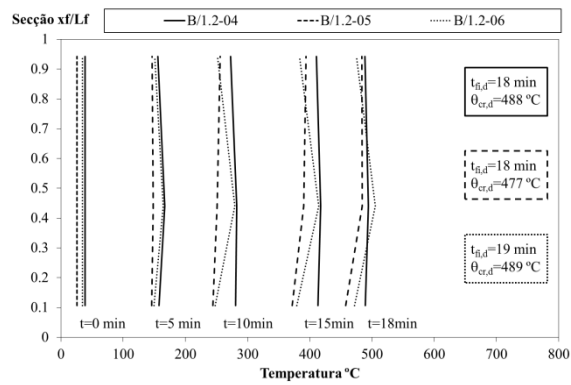


Fig 9. Evolução da temperatura nas secções expostas ao fogo, série 2.

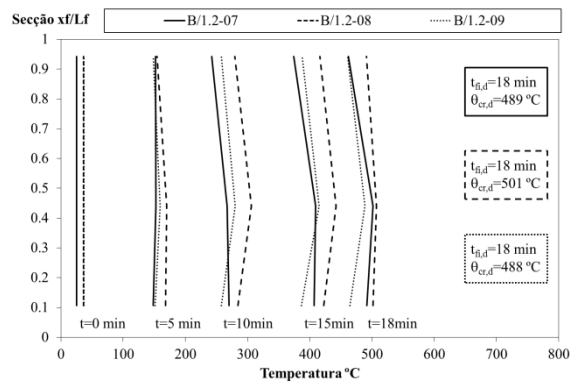


Fig 10. Evolução da temperatura nas secções expostas ao fogo, série 3.

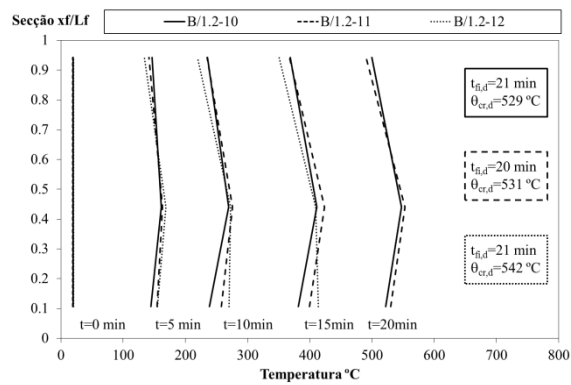


Fig 11. Evolução da temperatura nas secções expostas ao fogo, série 4.

Os elementos de viga utilizados nos ensaios da série 2 atingiram o ELU por instabilidade lateral torsional. O parâmetro taxa de deslocamento foi excedido para o instante de tempo $t=13$ minutos, no entanto sem verificar a condição de aplicabilidade. A resistência ao fogo foi de $t_{fi,d}=18$ minutos para os ensaios B/1.2-04 e B/1.2-05 e de $t_{fi,d}=19$ minutos para o ensaio B/1.2-06. A variação da temperatura nas secções expostas foi semelhante.

A resistência ao fogo foi determinada para diferentes condições de ligação dos estribos. Os ensaios da série 3 diferem dos ensaios da série 2 pelo facto dos estribos não se encontrarem soldados. A resistência ao fogo foi semelhante nos três ensaios, $t_{fi,d}=18$ minutos. A temperatura crítica foi semelhante ao valor da temperatura crítica determinada nos resultados da série 2, não se verificando qualquer influência provocada pelos maiores movimentos relativos dos blocos de betão ou pelos maiores valores das temperaturas registadas no interior dos elementos.

Os ensaios realizados na série 4 apresentaram um modo de colapso por formação de rótula plástica. O parâmetro taxa de deslocamento foi excedido para o instante de tempo $t=16$ minutos, também sem verificação da condição de aplicação deste critério. A resistência ao fogo foi superior, com valores de $t_{fi,d}=20$ para os ensaios B/1.2-10 e B/1.2-12, enquanto que para o ensaio B/1.2-11 o valor foi $t_{fi,d}=21$ minutos.

A degradação progressiva do betão armado foi verificada em todos os ensaios realizados, provocada pela deformação excessiva sofrida por este material. As maiores fissuras foram consequência do estado de tracção imposto pela solicitação de flexão e pelo movimento de separação do betão em relação ao perfil. Os blocos de betão dos ensaios da série 3 apresentaram maior movimento na direcção Y, conforme esperado.

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados de 12 ensaios de resistência ao fogo realizados em elementos de viga de aço parcialmente embebidos com betão. Foram testados três níveis de carga diferentes, correspondentes a três graus de utilização de 40, 60 and 80% relativamente ao valor do momento plástico da secção. Foram ainda considerados dois tipos diferentes de ligação para os estribos (W e NW).

A resistência ao fogo destes elementos depende do nível de acção mecânica existente, sendo inversamente proporcional em relação a este valor.

Os ensaios da série 3 apresentaram maior degradação dos blocos de betão, no entanto registaram valores semelhantes de resistência ao fogo, quando comparados com os ensaios da série 2.

A distribuição da temperatura no elemento, ao longo do comprimento de exposição, foi inferior a 10% do valor da temperatura média.

As temperaturas do reforço Tir foram sempre inferiores às temperaturas registadas para os outros materiais.

Em todos os ensaios foi possível verificar a existência de duas evoluções de temperatura distintas, correspondentes às medições efectuadas no interior e no exterior da secção, provando que a temperatura da secção não é uniforme.

A distribuição da temperatura no elemento é aproximadamente constante, provando a eficiência do sistema de aquecimento e do isolamento dos apoios.

Estes resultados permitem calibrar novos métodos simplificados de projecto e validar métodos avançados de cálculo. Os autores já possuem resultados numéricos das simulações destes ensaios que confirmam os resultados apresentados.

REFERÊNCIAS

Akio Kodaira, Hideo Fujinaka, Hirokazu Ohashi and Toshihiko Nishimura; “Fire Resistance of Composite Beams Composed of Rolled Steel Profile Concreted Between Flanges”; Fire Science and Technology Vol.23 No.3, 2004, pp. 192-208.

A. Plumier, A. Abed, B. Tiliouine, “Increase of buckling resistance and ductility of H-sections by encased concrete”, Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, E & FN Spon, London, ISBN: 0419 198903, 1995.

A.Y. Elghazouli, J. Treadway. “Inelastic behaviour of composite members under combined bending and axial loading”, Journal of Constructional Steel Research, 64, 2008, pp. 1008–1019.

D.Hosser, T. Dorn, O. El-Nesr, “Experimental and numerical studies of composite beams exposed to fire”, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No.10, 1994, pp. 2871-2892.

EN 1363-1, “Fire resistance tests, part 1- General requirements”; English version, 1999.

I.M. Assi, S.M. Abed, Y.M. Hunaiti, “Flexural strength of composite beams partially encased in lightweight concrete”, Pakistan Journal of Applied Sciences 2(3), 2002, pp. 320-323.

ISO 834 -1, “Fire-resistance tests -- Elements of building construction -- Part 1: General requirements”, 1999.

Joachim Lindner, Nikos Budassis; “Lateral torsional buckling of partially encased composite beams without concrete slab”; Composite construction in steel and concrete IV, conference proceedings, May 28th to June 2nd , Banff, Alberta, Canada, 2000, pp. 117-128.

Piloto, P.A.G.; Ramos Gavilán, A.B.; Mesquita, L.M.R.; “Numerical analysis for thermal conductance of the interface between steel and concrete to composite structures at elevated temperatures”, proceedings of the 2nd Portuguese conference on Numerical methods applied to Thermodynamics and Fluid Mechanics (in Portuguese), University of Aveiro, 8-9 May de 2008.

Paulo A.G. Piloto, Luís M.R. Mesquita, Alexandre Pereira; “Thermal Analysis in Fire-Resistance Furnace”; International workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems, proceedings ISBN 978-84-8102-559-0, GIDAI - University of Cantabria, 15-17 October 2009, pp 103-111.

R. Kindmann, R. Bergmann, L. -G. Cajot, J. B. Scleich; “Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beam”; Journal of Constructional Steel Research, 27, 1993, pp. 107-122.

R. Maquoi, C. Heck, V. Ville de Goyet, et al, (European commission), “Lateral torsional buckling in steel and composite beams”; ISBN 92-894-6414-3; Book 1,2 and 3; Technical steel research final report EUR 20888 EN; August 2002.

Silvana de Nardin, Ana Lucia H.C. El Debs, “Study of partially encased composite beams with innovative position of stud bolts”, Journal of Constructional Steel Research, Volume 65, Issue 2, February 2009, pp. 342-350.