

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE LAJES CELULARES EM MADEIRA COM DIFERENTES PERFURAÇÕES

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE FIRE BEHAVIOR OF CELLULAR WOOD SLABS WITH DIFFERENT PERFORATIONS

J. M. Meireles¹, P. A. G. Piloto¹, E. M. M. Fonseca¹, H. S. Santos², L. M. S. Barreira¹

¹ ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança

² Jular MADEIRAS



RESUMO

As lajes em madeira são elementos estruturais com aplicação crescente, em particular na reabilitação de elementos existentes, na adequação de grandes espaços interiores e na construção de novas estruturas. As excelentes propriedades mecânicas, associadas a elevadas propriedades térmicas e acústicas fazem deste material uma solução ideal para lajes de pavimentos e de coberturas. Para avaliação do comportamento ao fogo, foram realizados dois ensaios em lajes celulares (3 células) com diferentes perfurações (pequenos e grandes retângulos). Estas lajes são constituídas por vigas de secção retangular (tricapa casquinha) ligadas a uma armadura (vigas Kerto), com conectores metálicos SIMPSON e painéis de teto e pavimento tricapa casquinha. As lajes foram instrumentadas com termopares tipo K, termopares de discos de cobre para superfície não exposta e termopares de placa para medição da temperatura no compartimento de incêndio e nas células. Foi utilizado um forno de resistência ao fogo, com a prescrição da curva ISO834. Neste trabalho são apresentados os resultados da evolução da temperatura nos painéis perfurados, nas vigas, conectores, superfície não exposta e apresentados resultados da taxa de carbonização de cada célula.

ABSTRACT

The wood slabs are structural elements with increasing application, particularly in the rehabilitation of existing elements, adequacy of large interior spaces and new building structures. The excellent mechanical properties, associated with high thermal and acoustic properties make this material an ideal solution for floor slabs and roofs. For evaluation of the fire performance, two tests were performed on cellular slabs (3 cells) with different perforations (small and large rectangles). These slabs are composed of rectangular beams (three layers) attached to main wood structure (Kerto beams) with Simpson metal connectors and using three layers wood panels for ceiling and floor. The slabs were instrumented with wire type K thermocouples on specific measuring points, copper disks thermocouples on the unexposed floor surface panel and plate thermocouples for measuring the temperature in the fire compartment and cells. A fire resistance furnace was used with the prescription of ISO834 curve. This paper presents the results of the temperature in the perforated panels, beams, connectors, unexposed floor surface and results of charring rate for each cell of the ceiling (different perforations).

1. INTRODUÇÃO

As lajes em madeira são elementos estruturais com crescente utilização na reabilitação de estruturas existentes e na

construção de espaços singulares, tais como compartimentos amplos, restaurantes, escolas, piscinas, centros desportivos e comerciais. O isolamento acústico é um dos

requisitos determinantes para estes espaços, motivo pelo qual se adotam soluções com perfurações na placa do teto. Estas perfurações favorecem o comportamento acústico dos espaços, mas podem condicionar a resistência ao fogo.

A madeira tem atraído a atenção de engenheiros e arquitetos, devido às características arquitetônicas e estruturais, por se tratar de um material de construção ecológico, Fonseca et al, 2013. Este material, quando sujeito à ação do fogo, sofre um processo de degradação térmica (pirólise) produzindo gases combustíveis. Nas faces expostas ao fogo, é formada uma camada de carbonização sem resistência mecânica, mas com alguma eficiência de isolamento térmico. Muitos investigadores têm apresentado modelos experimentais e numéricos para o cálculo da degradação física de madeira na presença de altas temperaturas, White e Dietenberger 1999, Poon 2003, Janssens 2004. A velocidade de carbonização da madeira macia ou estrutural quando exposta ao fogo também tem sido estudada por investigadores de diferentes países (Schaffer 1967; White e Nordheim 1992; Konig e Walleij 1999; Gardner e Syme 1991; Collier 1992; Pun et al 1997; Cachim e Franssen 2010; Fonseca e Barreira 2009; Fonseca e Barreira 2011; Fonseca et al, 2013). Modelos empíricos para a determinação da velocidade de carbonização e condições de transferência de calor foram desenvolvidos por Schaffer 1967, White e Nordheim 1992.

Este trabalho visa o estudo do comportamento ao fogo lajes celulares (3 células) em madeira com diferentes perfurações na placa inferior (teto). Pretende-se avaliar a resistência ao fogo de lajes com diferentes tipos de furação, sem utilização de carga mecânica. A célula 1 apresenta várias perfurações em forma de pequenos retângulos, a célula 2 não apresenta qualquer tipo de perfuração e a célula 3 apresenta perfurações retangulares de tamanho superior aos da célula 1, ver Fig.1. Desta forma é possível comparar o efeito que o fogo provoca em diferentes soluções construtivas. Este tipo de laje

surge no seguimento de outros trabalhos experimentais e numéricos já realizados (Frangi et al, 2008; Fonseca et al, 2013).

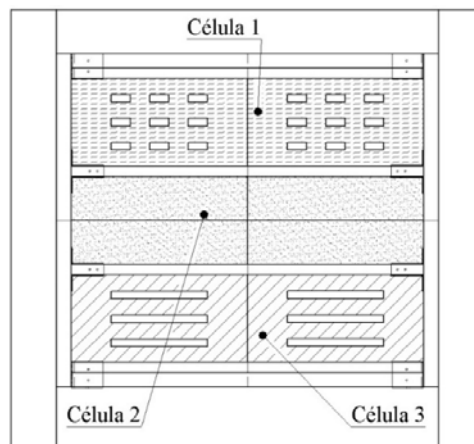


Fig. 1 – Identificação das células da laje.

Os resultados experimentais permitirão quantificar a evolução da temperatura na placa do teto, nas vigas, na placa de pavimento, nos conectores e nos compartimentos celulares.

A dimensão deste elemento de estrutura foi condicionada pelas dimensões do forno de resistência ao fogo existente no Instituto Politécnico de Bragança, ver Fig.2.

Os ensaios foram realizados de acordo com os requisitos da norma europeia EN 1365-2 para resistência ao fogo de pavimentos e coberturas portantes (CEN a, 1999) e ainda de acordo com os requisitos gerais de ensaios de resistência ao fogo EN 1363-1 (CEN b, 1999).

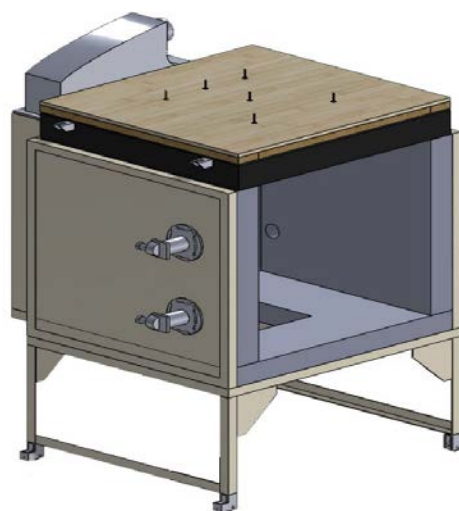


Fig. 2 – Forno de resistência ao fogo com laje.

2 CARACTERIZAÇÃO DA LAJE

2.1. Modelo de laje

O modelo de laje construído é formado por uma placa de pavimento em painel tricapa, com dimensões 1150x1232x19 [mm] e por uma placa de teto 870x996,80x32 [mm], também em painel tricapa, onde foram efetuadas as perfurações por operações de maquinagem. O interior da laje possui 4 vigas em painel tricapa de 918,8x200x27 [mm], que permitem a criação de três células independentes. A laje é ainda composta por uma armadura exterior, constituída por duas vigas Kerto S 918,8x200x37 [mm] e duas vigas Kerto S 870x200x39 [mm]. As ligações das vigas centrais foram realizadas com conectores metálicos SIMPSON com asas exteriores para as vigas tipo 300 (A=27, B=133, C=84) e as ligações das vigas laterais foram realizadas com conectores metálicos SIMPSON com asas interiores para ligação da armadura tipo 300 (A=64, B=133, C=76). Foram ainda utilizados parafusos de fixação de diâmetro 4 e 5 mm de comprimento 45 e 70 [mm] respetivamente. Na Fig.3 estão representados os diferentes elementos constituintes da laje.

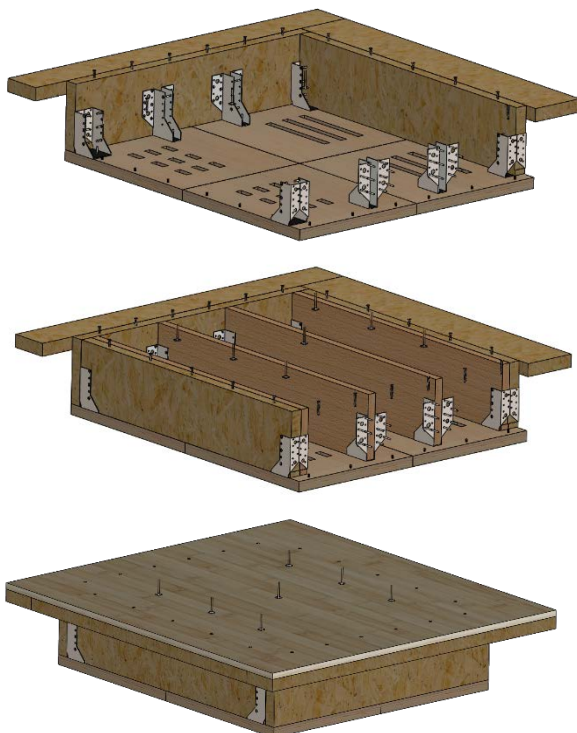


Fig. 3 – Modelo de laje celular com perfurações.

As dimensões das lajes estão representadas na Fig.4. Os rasgos maiores possuem uma dimensão de 20x250 mm e os mais pequenos 50x20 mm, com espaçamento de 50 mm.

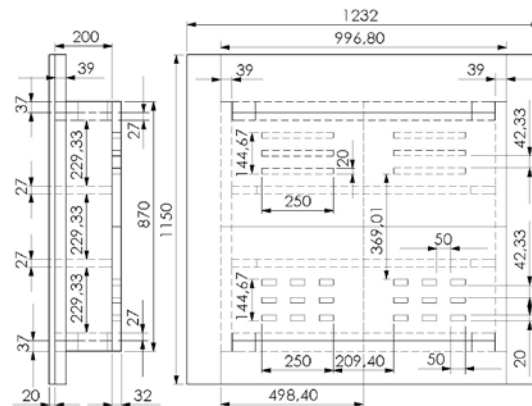


Fig. 4 – Dimensões principais das lajes.

2.2. Materiais

A madeira referenciada para estas lajes é abeto, cuja densidade se aproxima de 450 kg/m³, no caso do material utilizado nas placas de teto, vigas e pavimento (tricapa), e madeira com densidade aproximada de 480 kg/m³ para as vigas da armadura exterior (vigas Kerto S).

As vigas Kerto S são micro laminadas, constituídas por lâminas de abeto com aproximadamente 3 mm de espessura, coladas a quente em diferentes orientações. É um material moderno que permite a realização de várias soluções de estruturas em madeira.

Os painéis tricapa são constituídos por três camadas de madeira, coladas entre si, com diferentes orientações e espessuras, originando painéis com várias dimensões. São normalmente utilizados no fabrico de paredes interiores, pavimentos, tetos, revestimento interior e revestimento de fachadas. A espessura das duas camadas exteriores dos painéis do pavimento são de 5 mm e a espessura da camada interior é de 10 mm. A espessura das duas camadas exteriores da placa do teto é 8 mm e a espessura da camada interior é 16 mm.

2.3. Instrumentação da laje

A instalação dos termopares, para a medição de temperaturas, é baseada nos

critérios da norma EN 1365-2 (CEN a, 1999) e no interesse específico de medição da temperatura em vários elementos (placa de teto, vigas, elementos metálicos e compartimentos celulares). Foram utilizados três tipos de termopares visíveis nas figuras 5 e 6: fio simples para medições pontuais com proteção de massa térmica para evitar curto circuitos na junção quente, discos de cobre protegidos do ambiente com placas de gesso cartonado para medição da temperatura na face não exposta e termopares de placa para medição da temperatura nos compartimentos celulares.



Fig. 5 – Instrumentação com termopares de fio e de placa nas três células.



Fig. 6 – Instrumentação com termopares de disco de cobre para superfície não exposta.

A posição e a identificação destes sensores está representada na Fig.7. Cada laje foi instrumentada com termopares de fio tipo K com diâmetro de 0,711 [mm] (T_i) posicionados em diferentes posições da laje, termopares de fio soldados aos conectores (TC_i) e termopares de placa (TP_i).

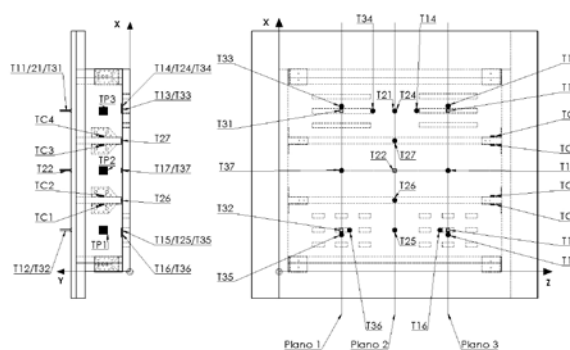


Fig. 7 – Identificação e posição dos termopares.

Foram usados seis termopares na face não exposta, cinco para medição da temperatura média (T11, T12, T22, T32 e T31) e um para a medição da temperatura máxima (T21). A medição da temperatura no interior das células foi feita utilizando termopares de placa (TP1, TP2 e TP3).

3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

As lajes foram ensaiadas num forno de resistência ao fogo, utilizando a abertura superior, ver Fig.8 e Fig.9. Este forno está dotado de 4 queimadores a gás natural com uma potência total de 360 [kW], com um volume útil de 1 [m³], preparado para trabalhar com qualquer curva de incêndio normalizada e em particular com a curva de incêndio padrão ISO834, (ISO TC 92, 1999). A aquisição de sinal dos termopares foi efetuada por sistemas sincronizados da HBM (MGC Plus e Spider 8). Para além destes dois sistemas, foi utilizada uma câmara termográfica dotada de um detetor de infra vermelhos para registo da evolução das temperaturas da face não exposta.



Fig. 8 – Posição da laje 1 no forno de resistência, antes do ensaio.

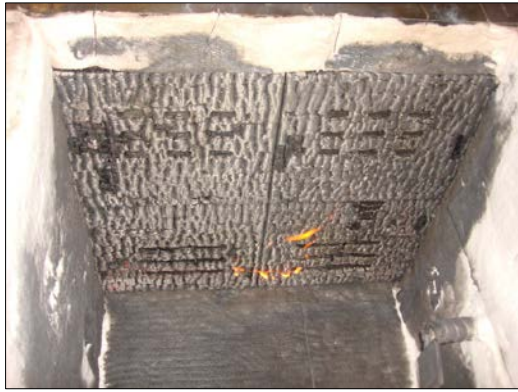


Fig. 9 – Posição da laje 1 no forno de resistência, depois do ensaio.

Em ambos os ensaios foi utilizado apenas um queimador ligado. Durante a fase inicial do ensaio da laje 1, o queimador desligou-se, sendo necessário refazer a ligação, originando duas curvas de aquecimento sucessivas, ver Fig.10. O valor da temperatura no interior do forno é medido e controlado por um termopar de placa. No ensaio de materiais combustíveis, a taxa de libertação de calor contribui para o aquecimento do forno, obrigando o queimador a trabalhar no regime de potência mínima. Este regime de funcionamento não permitiu seguir as tolerâncias admissíveis para o ensaio normalizado ISO834, registando-se uma curva real de aquecimento superior (real forno).

A fase final do ensaio da laje 1, depois do instante 950 (s) evidencia duas tendências de diminuição da temperatura, justificadas pelo corte na alimentação do queimador e abertura da porta frontal do forno.

Na Fig.11 está representada a curva de aquecimento da laje 2 e os registos da temperatura dos compartimentos celulares. Estes registos possuem evoluções semelhantes.

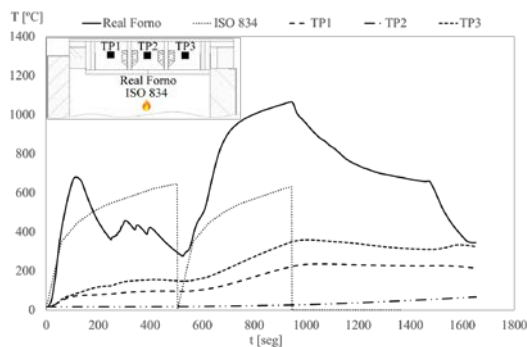


Fig. 10 – Temperatura no interior do forno e nas células da laje 1.

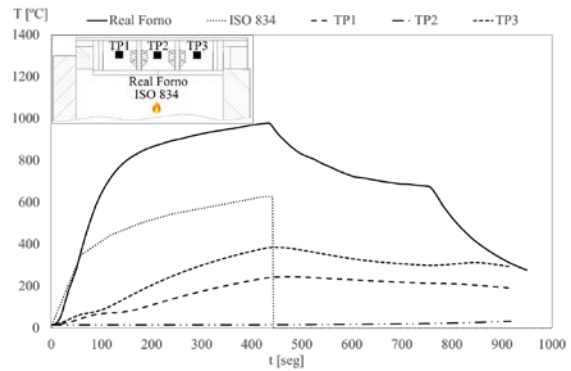


Fig. 11 – Temperatura no interior do forno e nas células da laje 2.

A fase final do ensaio da laje 2, depois do instante 450 (s), evidencia duas tendências semelhantes às verificadas no ensaio da laje 1. Em ambos os ensaios verifica-se que a temperatura do compartimento da célula 3 é superior ao valor da célula 2 e da célula 1, sendo este comportamento devidamente justificado com o tamanho das aberturas das perfurações. A temperatura máxima dos ensaios foi, aproximadamente de 1000 °C.

3.1. Comportamento térmico da placa de teto

A evolução da temperatura está representada para cada uma das células e individualizada para cada laje. Nas figuras 12 e 15 é possível comparar a evolução da temperatura em diferentes posições da célula 1. Em ambos os ensaios, a temperatura máxima é inferior a 400 °C.

Na Fig. 13 e Fig. 16 é apresentada a evolução da temperatura na superfície do teto da célula 2 (sem perfurações). A temperatura máxima é inferior a 100°C, para a duração de ambos ensaios.

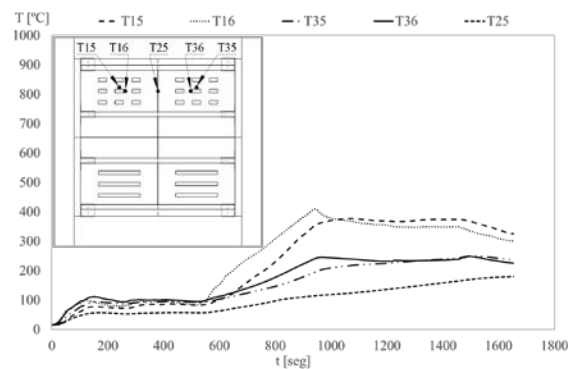


Fig. 12 – Temperatura na célula 1, laje 1.

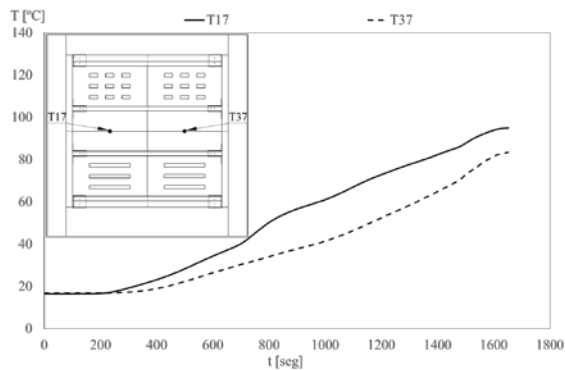


Fig. 13 – Temperatura na célula 2, laje 1.

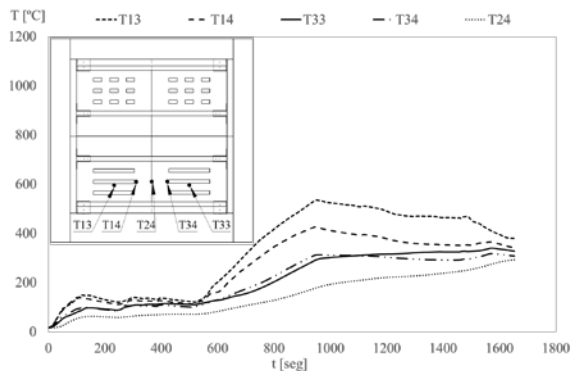


Fig. 14 – Temperatura na célula 3, laje 1.

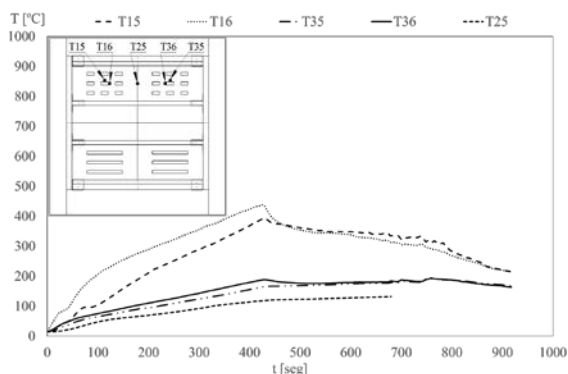


Fig. 15 – Temperatura na célula 1, laje 2.

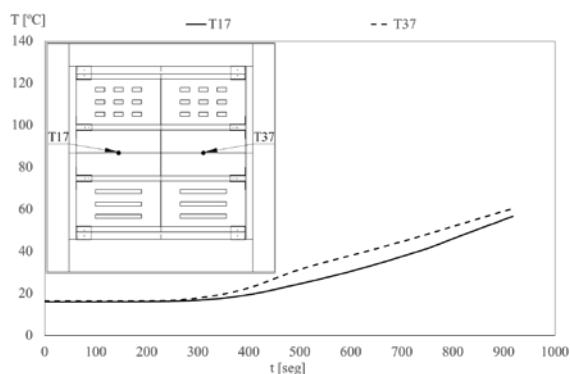


Fig. 16 – Temperatura na célula 2, laje 2.

A temperatura na superfície do teto da célula 3 está representada nos gráficos da Fig.14 e Fig.17. Em ambos os ensaios a

temperatura máxima aproxima-se dos 600°C. A evaporação da humidade na madeira pode ser observada nas medições efetuadas que ultrapassam os 100 °C. Em ambos os ensaios verifica-se que os resultados não são simétricos, pelo facto de se ter utilizado apenas um queimador.

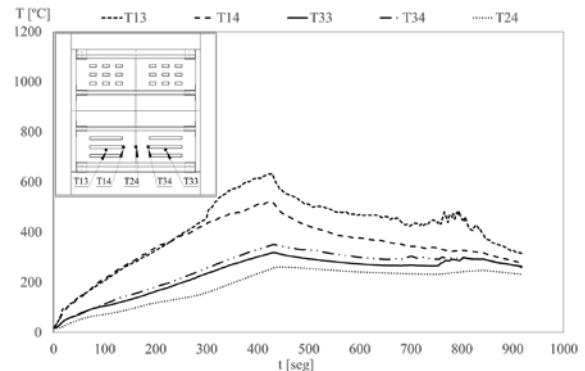


Fig. 17 – Temperatura na célula 3, laje 2.

3.2. Comportamento térmico dos conectores

Os conectores metálicos não estão diretamente expostos à ação do fogo, no entanto a sua elevada condutividade térmica promove o aquecimento das superfícies localizadas na célula 2 (TC2 e TC3). As superfícies dos conectores localizados na célula 1 e na célula 3 possuem temperaturas sempre superiores ao valor das superfícies protegidas da célula 2 (sem perfurações), ver Fig.18 e Fig.19.

A temperatura dos conectores foi sempre inferior a 250 °C em ambos os ensaios. Estes elementos são fundamentais para a determinação da resistência ao fogo deste tipo de laje, pelo que a temperatura deverá ser bem controlada em qualquer processo de dimensionamento.

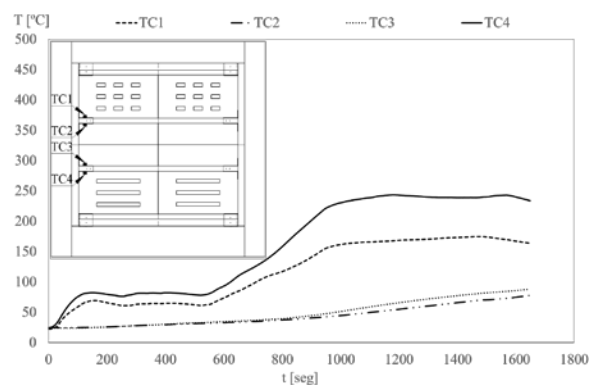


Fig. 18 – Temperatura nos conectores, laje 1.

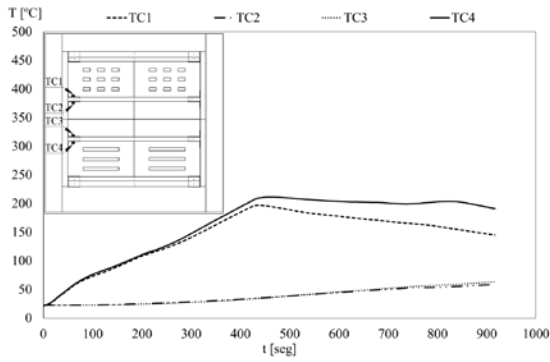


Fig. 19 – Temperatura nos conectores, laje 2.

3.3. Comportamento térmico da superfície não exposta (pavimento)

A análise do comportamento da face não exposta é fundamental para a determinação da resistência deste tipo de elemento portante. A verificação da temperatura média e da temperatura máxima é decisiva para a caracterização da resistência ao fogo em termos de isolamento (critério I) e a verificação da passagem das chamas é igualmente decisiva para a caracterização da estanquidade (critério E).

Na Fig.20 está representada a evolução da temperatura nos seis pontos de medição definidos com termopares de disco de cobre da laje 1. Confirma-se a tendência de maior aquecimento do lado esquerdo (T11 e T12).

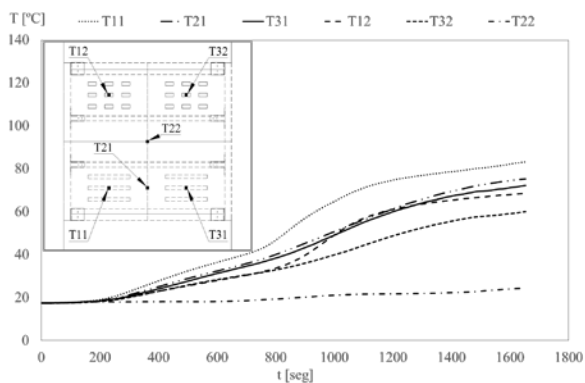


Fig. 20 – Temperatura na face não exposta, laje 1.

Esta medição permite o tratamento estatístico para determinação da temperatura máxima, média e mínima, para além da comparação com a medição efetuada com uma câmara termográfica de infravermelhos, ver Fig.21. A medição de campo com termografia infravermelha foi

efetuada na zona identificada. Esta zona está localizada por cima da célula 3, justificando os valores superiores em relação às medições pontuais de uma área mais abrangente, ver Fig.22.

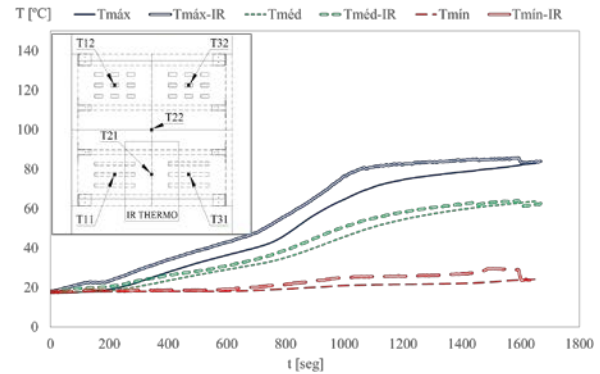


Fig. 21 – Comparação da temperatura máxima, média e mínima na face não exposta, laje 1.

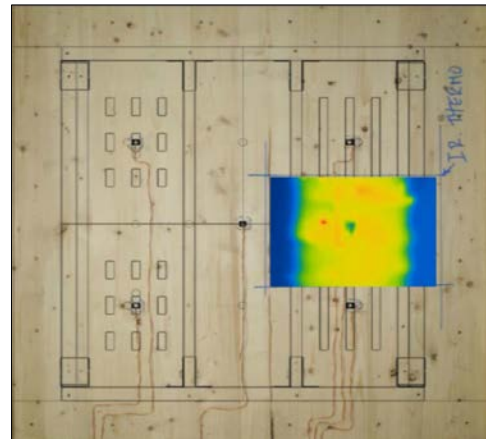


Fig. 22 – Medição da temperatura na face não exposta da laje 2, com termografia IR.

Na Fig.23 está representada a evolução da temperatura nos seis pontos de medição definidos com termopares de disco de cobre na laje 2. Confirma-se a tendência de maior aquecimento do lado esquerdo (T11 e T12).

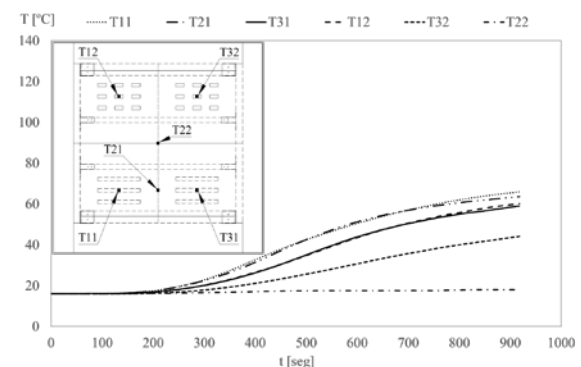


Fig. 23 – Temperatura na face não exposta, laje 2.

Depois do tratamento estatístico dos resultados da Fig.23, foi possível determinar a evolução da temperatura máxima, média, mínima e comparar os resultados com a evolução da medição de campo (termografia infravermelha), ver Fig.24. Os resultados confirmam a tendência do ensaio da laje 1, com os valores das medições com termografia infravermelha superiores aos valores das medições pontuais dos termopares de disco de cobre. A diferença entre os dois tipos de medições foi superior na laje 2, sendo justificada pela evolução superior da temperatura da célula 3.

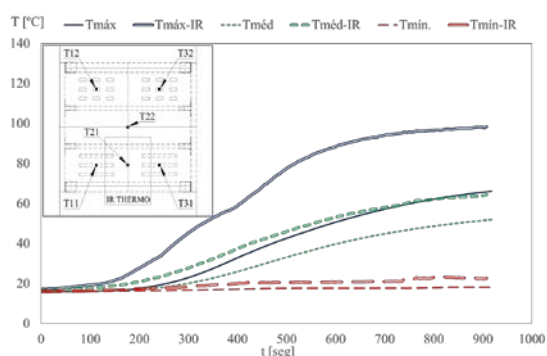


Fig. 24 – Comparação da temperatura máxima, média e mínima na face não exposta, laje 2.

3.4. Carbonização da placa de teto

A redução da secção resistente da laje deve-se à formação da camada carbonizada, que depende da velocidade de carbonização. A determinação da velocidade de carbonização é um parâmetro importante que permite avaliar a resistência ao fogo da estrutura. Nas lajes em estudo, existem zonas da face exposta ao fogo com diferentes perfurações, (células 1, 2 e 3), que originam diferentes velocidades de carbonização. Para avaliar a influência do tipo de perfuração adotou-se um processo de medição através de vários cortes na placa de teto, coincidentes com o centro das perfurações. Foram efetuadas medições da espessura de carbonização em pontos específicos $d_{char,n}$, como exemplificado na Fig.25. Em cada corte foram considerados 11 pontos para medição, identificados com as letras de “a” até “k”.

A velocidade de carbonização β_n foi calculada para as três células da laje 1, com

valores de 1,20, 0,65 e 1,00 [mm/min] respe-

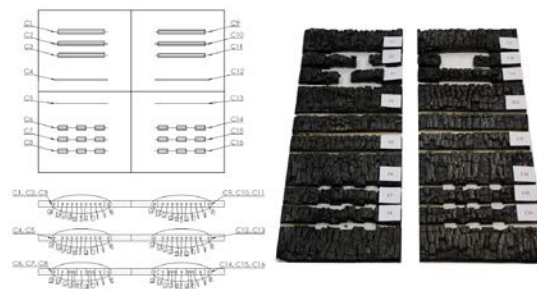


Fig. 25 – Medição da velocidade de carbonização, laje 1.

tivamente para as células 3, 2 e 1. O cálculo foi feito com base na Eq. (1), considerando o tempo total do ensaio, $t=25$ minutos, que engloba a fase de aquecimento e arrefecimento.

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (1)$$

Os valores apresentados são a média da velocidade de carbonização do conjunto dos cortes efetuados em cada uma das três zonas da laje 1, ver Tabela 1.

Na Fig.26 está representado o estado final da carbonização da laje 2.

Tabela 1 – Velocidades de carbonização da laje 1.

| CÉLULAS | CORTES | CORTES [mm/min] | MÉDIA [mm/min] |
|---------|---------------|-----------------|----------------|
| 3 | C1, C2, C3 | 1,2 | 1,20 |
| | C9, C10, C11 | 1,2 | |
| 2 | C4, C5 | 0,7 | 0,65 |
| | C12, C13 | 0,6 | |
| 1 | C6, C7, C8 | 1,1 | 1,00 |
| | C14, C15, C16 | 0,9 | |

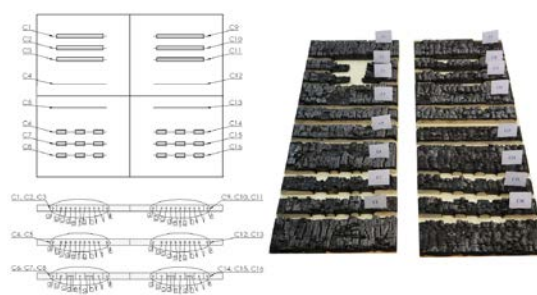


Fig. 26 – Medição da velocidade de carbonização, laje 2.

A velocidade de carbonização β_n foi calculada de igual forma para as três células da laje 2, originando os seguintes valores: 1,40, 0,80 e 1,00 [mm/min] respetivamente para as

células 3, 2 e 1. O cálculo foi feito com base na Eq. (1), considerando o tempo total do ensaios, $t=16$ minutos, que engloba a fase de aquecimento e arrefecimento, ver Tabela 2.

Tabela 2 – Velocidades de carbonização da laje 2.

| CÉLULAS | CORTES | CORTES [mm/min] | MÉDIA [mm/min] |
|---------|---------------|--------------------|-------------------|
| 3 | C1, C2, C3 | 1,5 | 1,40 |
| | C9, C10, C11 | 1,3 | |
| 2 | C4, C5 | 0,8 | 0,80 |
| | C12, C13 | 0,8 | |
| 1 | C6, C7, C8 | 1,1 | 1,00 |
| | C14, C15, C16 | 0,9 | |

Os valores das velocidades de carbonização determinadas para a célula 2 estão próximos dos valores definidos no EN1995-1-2 (CEN 2003). Os restantes valores de carbonização também são comparáveis com os resultados de Frangi *et al* (2008).

4. CONCLUSÕES

As lajes celulares em madeira com perfurações são soluções de engenharia e arquitetura muito frequentes, utilizadas para melhorar a absorção acústica das placas do teto. As perfurações aumentam a superfície da madeira exposta à ação do fogo, facilitando a penetração das chamas e o fluxo de calor. Esta situação aumenta a taxa de carbonização em relação a uma solução sem perfurações (célula 2).

Foram ensaiadas duas lajes celulares em madeira, em condições de incêndio, com diferentes tipos de perfurações. Foi possível caracterizar o comportamento térmico dos diferentes componentes e a evolução da temperatura no interior das células. Não foi atingida o estado limite de resistência ao fogo para o isolamento (I) e estanquidade (E), por se ter dado prioridade à medição da velocidade de carbonização.

Comparando as diferentes células utilizadas nas lajes em estudo, pode concluir-se que as células perfuradas atingem uma velocidade de carbonização quase duas vezes superior em relação às células não perfuradas. Este facto é justificado pelas temperaturas registadas dentro das cavidades. Para o mesmo tempo

de ensaio, a temperatura da cavidade não perfurada não ultrapassou os 100°C, enquanto que nas cavidades com aberturas este valor triplica.

Os autores pretendem realizar mais ensaios experimentais com outros tipos de perfuração e aumentar a reprodutibilidade dos ensaios em todos os tipos de perfurações.

AGRADECIMENTOS

Os investigadores agradecem o apoio da empresa Jular Madeiras para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Cachim P. B., Franssen J. M. 2010. Assessment of Eurocode 5 Charring rate Calculation Methods. *Fire Technology*, 46, p.169-181.
- CEN a, EN1365-2, December 1999 “Fire resistance tests for loadbearing elements. Part 2: Floors and roofs”, Brussels.
- CEN b, EN 1363-1, August 1999, “EN 1363-1 Fire resistance tests - Part 1, General requirements”, Brussels.
- CEN, EN1995-1-2: 2003, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design, Brussels.
- Collier PCR. 1992. Charring rates of timber. Study report, Branz, New Zealand.
- Development Association, Warrington Fire Research Aust. Pty. Ltd., Project No.20633, version 2b, p. 1-78.
- Fonseca E. M. M., Barreira L. 2009. Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures. WIT Press, Third Int. Conference on Safety and Security Engineering, Guarascio, Brebbia, Garzia (Ed.), 108, p. 449-457.
- Fonseca EMM, Barreira L. 2011. Experimental and Numerical Method for Determining Wood Char-Layer at High Temperatures due an Anaerobic Heating. *Int. Journal of Safety and Security Engineering*, (1)1, p. 65-76.
- Fonseca E. M. M., Couto D., Piloto P. A. G. 2013. Fire safety in perforated wooden slabs: a numerical approach, *WIT Transactions on the Built Environment*, Series Vol.134, WIT Press, Fifth Int.

- Conference on Safety and Security Engineering, Garzia, Brebbia, Guarascio (Ed.), p. 577-584.
- Frangi A., Knobloch M., Fontana M. 2008. Fire design of timber slabs made of hollow core elements. Engineering Structures, USA.
- Gardner W. D., Syme D. R. 1991. Charring of glued-laminated beams of eight australian-grown timber species and the effect of 13 mm gypsum plasterboard protection on their charring. N.S.W. Technical report no.5, Sydney.
- ISO TC 92, ISO 834-1. "Fire-resistance tests - Elements of building construction – Part 1: general requirements". 1999
- Janssens M. L. 2004. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. Fire and Materials, 28, p. 199-207.
- Konig J, Walleij L. 1999. One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and post protection situations. Swed Inst Wood Technol Res.
- Poon L., England J. P. 2003. Literature Review on the Contribution of Fire Resistant Timber Construction to Heat Release Rate–Timber
- Pun C. Y., Seng H. K., Midon M. S., Malik A. R. 1997. Timber design handbook. FRIM, Malayan Forest Records no.42.
- Schaffer E. L. 1967. Charring rate of selected woods transverse to grain. Research paper FPL 69. Madison (WI): Forest Products Laboratory.
- White R. H., Dietsberger M. A. 1999. Fire Safety, Chap. 17, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service.
- White R. H., Erik V., Nordheim E. V. 1992. Charring rate of wood for ASTM E119 exposure. Fire Technol, 28(1).