

# VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE LAJES CELULARES EM MADEIRA COM PERFURAÇÕES AO FOGO

## NUMERICAL VALIDATION OF THE PERFORATED CELLULAR WOOD SLABS UNDER FIRE

J. M. Meireles<sup>1</sup>, E. M. M. Fonseca<sup>1</sup>, P. A. G. Piloto<sup>1</sup>, H. S. Santos<sup>2</sup>, L. M. S. Barreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>2</sup> Jular MADEIRAS



### RESUMO

*As lajes em madeira são estruturas leves, de fácil montagem, com excelentes características arquitetónicas, térmicas e acústicas. No entanto, a sua elevada vulnerabilidade ao fogo, obriga a que se determine e avalie o seu comportamento com rigor. Com base em ensaios experimentais, realizados para a determinação da resistência ao fogo, será possível validar um modelo de laje numérico desenvolvido com a utilização de um programa de elementos finitos, ANSYS. O modelo numérico é transiente térmico, não linear e utiliza elementos hexaédricos. Considerou-se a não linearidade das propriedades a temperaturas elevadas. As condições de fronteira, admitidas no problema, são de convecção e radiação, sendo consideradas curvas típicas para a evolução da temperatura. Estas curvas foram registadas durante os ensaios experimentais e permitiram simular o efeito da ação do fogo na superfície exposta, interior das cavidades celulares e nas aberturas ou perfurações da laje. O comportamento físico da laje é também condicionado pela formação da carbonização, sendo este fenómeno considerado no modelo numérico.*

### ABSTRACT

*The wood slabs are lightweight, easy installation, excellent architectural, thermal and acoustic characteristics. However, its high vulnerability to fire, requires one to determine and assess their behaviour accurately. Based on experimental tests performed to determine the fire resistance, it is possible to validate a numerical slab model developed using a finite element program, ANSYS. The numerical model is thermal, nonlinear transient and uses hexahedral elements. It was considered non-linearity properties at elevated temperatures. The boundary conditions, allowed in the problem are convection and radiation and are being considered typical curves for temperature evolution. These curves were recorded during the experimental trials and allowed to simulate the effect of the action of fire on the exposed surface, inside the cell cavities and openings or perforations of the slab. The physical behaviour of the slab is also conditioned by the formation of carbonization, these phenomena is being considered in the numerical model.*

### 1. INTRODUÇÃO

A madeira tem atraído a atenção de engenheiros e arquitetos, devido às suas características arquitetónicas e estruturais,

por se tratar de um material de construção renovável e amigo do ambiente, Fonseca et al, 2013. Quando exposta a ações acidentais, como o caso de um incêndio, a madeira

sofre um processo de degradação térmica, a pirólise, produzindo gases combustíveis. Nas faces expostas ao fogo, é formada uma camada de carbonização sem resistência efetiva, que se traduz na redução do tamanho nessa direção. No entanto, essa espessura de carbonização é um bom isolante, que protege o núcleo da secção. A falha da capacidade de carga dos elementos estruturais em madeira acontece pela diminuição da secção resistente devido à carbonização.

Vários 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 a condições de incêndio tem sido estudada por investigadores de diferentes países (Schaffer 1967; White e Nordheim 1992; König 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.

Neste trabalho será definido um modelo numérico para a análise térmica em regime transiente, baseado no método de elementos finitos.

O modelo numérico pretende ser uma réplica de lajes pré-fabricadas em madeira (Frangi et al, 2008; Fonseca et al, 2013) e utilizadas em edifícios residenciais e comerciais. A laje em estudo possui três cavidades, sendo que duas delas possuem diferentes perfurações. Os resultados obtidos permitirão avaliar o efeito do tipo de perfuração no retardamento da ação térmica sobre a laje de madeira quando submetida a um incêndio. Os resultados numéricos das temperaturas serão validados por um modelo de laje experimental submetido ao fogo em laboratório.

## 2. METODOLOGIA E MATERIAIS

### 2.1. Modelo de laje

Para este estudo foram construídos dois modelos de laje iguais. Cada laje possui quatro vigas Kerto S200x27, permitindo a criação de três células independentes (célula sem perfurações ao centro, células laterais com dois tipos de perfurações retangular e quadrangular), ver Fig. 1. Cada laje é composta ainda por uma armadura exterior, constituída por duas vigas Kerto S200x37 e duas vigas S200x39.

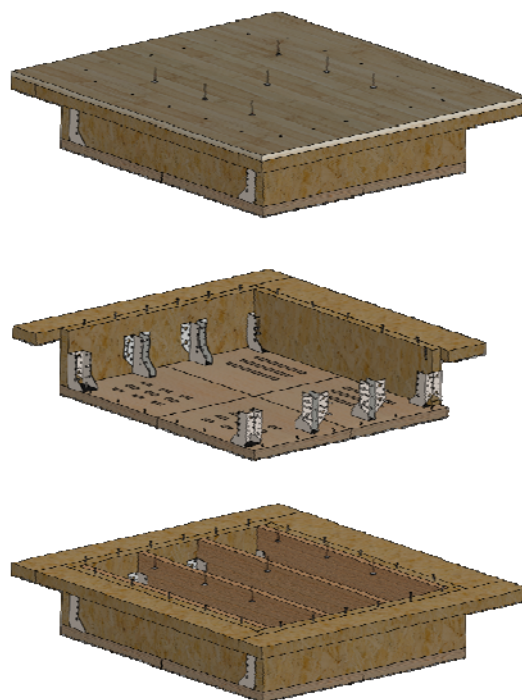


Fig. 1 – Modelo de laje celular com perfurações.

Foram construídas duas lajes para serem ensaiadas ao fogo num forno de resistência, conforme a Fig. 2 a).

Cada laje foi instrumentada com termopares ( $T_i$ ) para leitura das temperaturas durante a exposição ao fogo da face perfurada, Fig. 2 b).

### 2.2. Propriedades térmicas

O comportamento térmico da madeira pode ser descrito através dos processos de formação da zona da pirólise e da camada de carbonização.

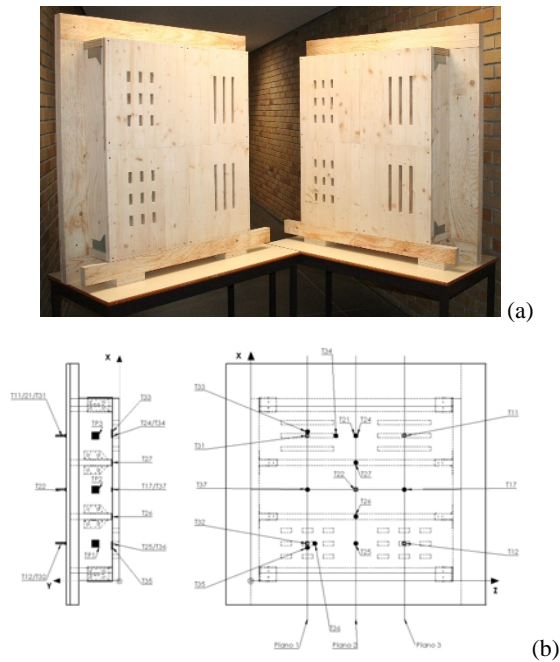


Fig. 2 – Modelo de laje experimental.

O processo de pirólise faz com que a massa volúmica da madeira varie em função do aumento da temperatura, devido à ausência de oxigénio. Por outro lado, a velocidade de carbonização da madeira, é uma característica que permite avaliar a resistência ao fogo, sendo determinada pelo avanço da carbonização.

O material utilizado no modelo em análise é a madeira de abeto (spruce), com comportamento não linear dependente da temperatura, cujas propriedades térmicas se encontram definidas no anexo B do Eurocódigo 5, 2003.

As propriedades térmicas a considerar são a condutividade térmica (Fig. 3), o calor específico (Fig. 4) e a massa volúmica (Fig. 5).

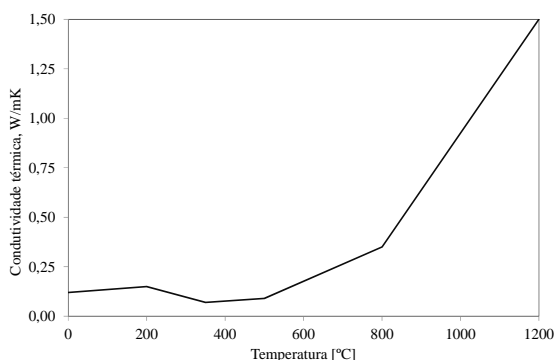


Fig. 3 – Condutividade térmica da madeira.

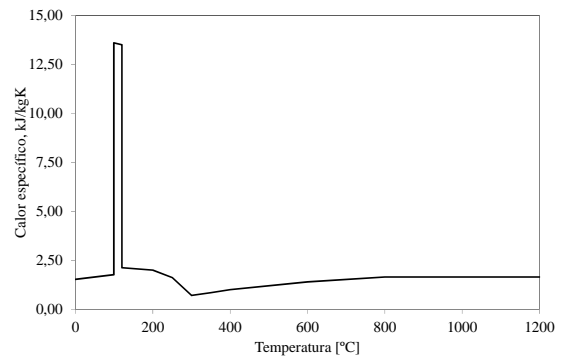


Fig. 4 – Calor específico da madeira.

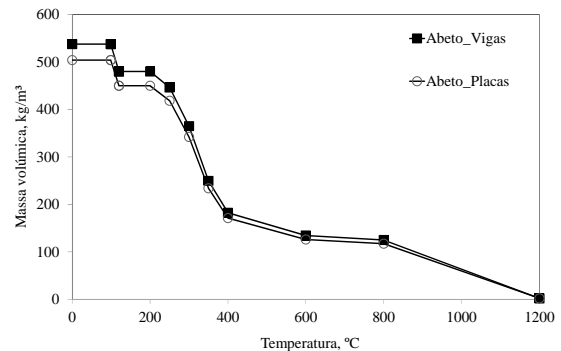


Fig. 5 – Massa volúmica da madeira.

### 3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Na análise numérica é utilizado o método dos elementos finitos através do programa ANSYS. Para cada modelo é calculado o perfil de temperaturas e a espessura de carbonização, sendo os resultados comparados com os obtidos experimentalmente. O método de solução numérico é transiente e não linear, com uma duração de 1500 s para a laje 1 e 950 s para a laje 2, conforme o tempo de ensaio em laboratório nas mesmas lajes.

Na análise numérica, a face inferior de cada laje, foi submetida à ação do fogo. De acordo com o Eurocódigo 5, 2003, a evolução da temperatura de um incêndio ao longo do tempo pode ser definida por curvas de incêndio normalizado.

Neste trabalho adotou-se a utilização da curva de incêndio obtida através do forno de resistência nos ensaios experimentais, tendo sido consideradas condições fronteira de convecção e radiação, na face da laje exposta ao fogo. No instante inicial, o modelo foi considerado à temperatura ambiente com 16 °C. Foi utilizado um coeficiente de convecção igual a 25 W/m<sup>2</sup>K na superfície exposta ao

fogo,  $4 \text{ W/m}^2\text{K}$  na superfície não exposta ao fogo e  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  nas paredes internas das células. Foi ainda considerado um fator de emissividade de 1 para a ação do fogo e um fator de emissividade de 0,8 para a madeira, EC5.

As curvas consideradas para a evolução da temperatura ambiente no interior das cavidades foram também obtidas previamente através da leitura de termopares de placa em cada célula (TP<sub>i</sub>) durante o ensaio das lajes (TP1, TP2 e TP3), Fig. 6. Nas faces das aberturas laterais quadrangulares e retangulares foram impostas essas mesmas curvas.

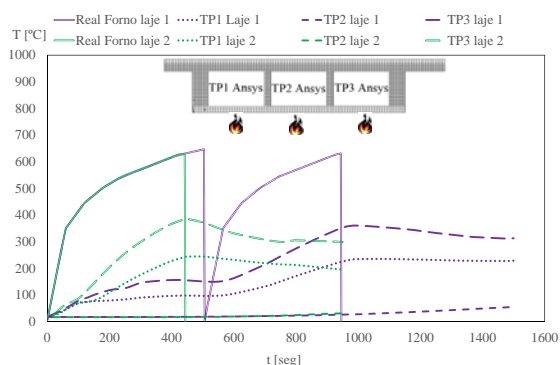


Fig. 6 – Curvas reais no forno e nas cavidades.

O modelo numérico utiliza elementos hexaédricos do tipo SOLID70 de 8 nós. A malha é regular, tendo sido aplicado um teste de convergência para determinar o tamanho adequado. Na Fig. 7 está representado o modelo de elementos finitos da laje, sem representação de duas das vigas da armadura exterior.

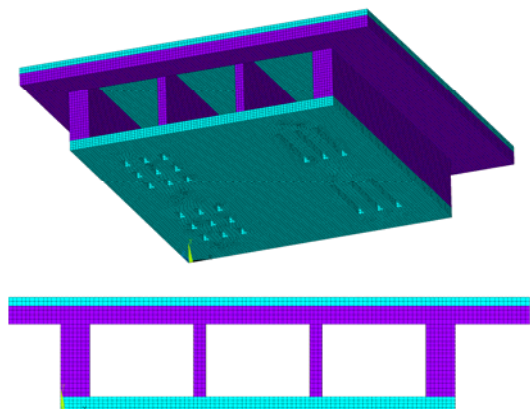


Fig. 7 – Malha de elementos finitos.

## 4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. Temperaturas nodais

Os resultados dos campos de temperaturas numéricos (num) foram obtidos em regime transiente para diferentes posições nodais e comparados com os resultados experimentais (exp) obtidos por termopares nas duas lajes. A Fig. 8 representa a comparação de resultados na zona das vigas, para a laje 1 e laje 2, respetivamente.

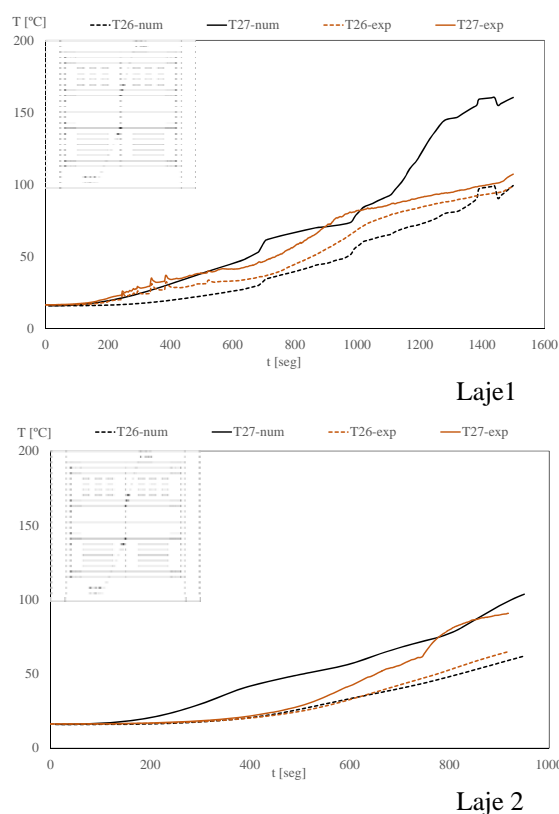
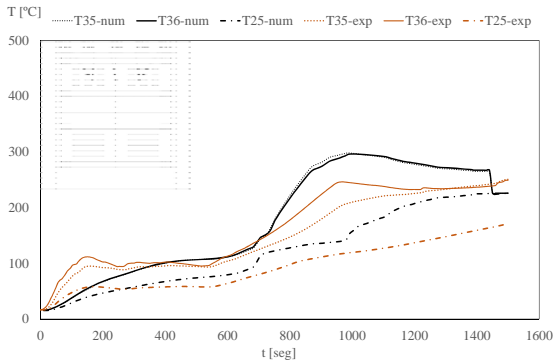


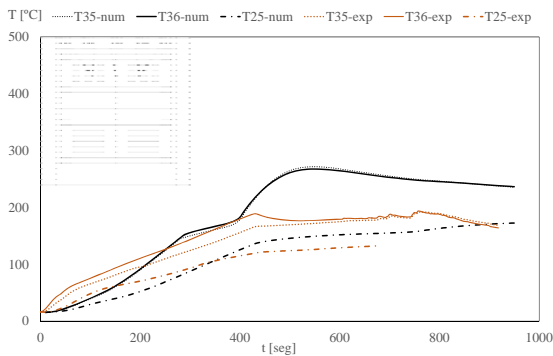
Fig. 8 – Temperaturas nas vigas.

Verifica-se que as temperaturas nesta zona da laje, durante o tempo de exposição ao fogo, não ultrapassam os  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Apesar de se registar alguma variação nos resultados numéricos e experimentais, a tendência é muito semelhante.

A Fig. 9 representa os resultados para a célula lateral com perfurações quadrangulares. Na cavidade celular com perfurações quadrangulares as temperaturas nas arestas atingem valores próximos de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , sendo que os resultados numéricos são ligeiramente superiores aos registados experimentalmente.



Laje 1



Laje 2

Fig. 9 – Temperaturas na célula com perfurações quadrangulares.

Na parede interior desta célula, distante das perfurações, as temperaturas numéricas aproximam-se das experimentais.

A Fig. 10 representa a comparação de resultados para a célula central sem perfurações, laje 1 e laje 2. No interior desta célula as temperaturas são inferiores a 100 °C. Nota-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

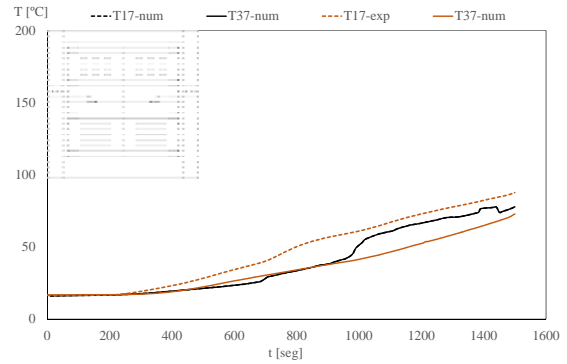
A Fig. 11 apresenta os resultados para a célula com perfurações retangulares.

Na célula com perfurações retangulares, as temperaturas nas arestas atingem valores superiores a 300 °C, tanto numericamente como experimentalmente. Na parede interior desta célula, distante das perfurações, as temperaturas são ligeiramente inferiores.

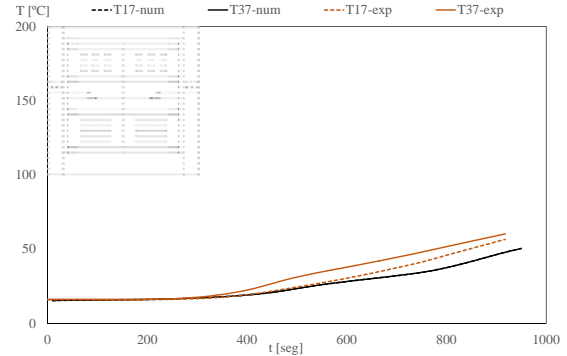
#### 4.1. Carbonização

No final do ensaio de cada laje foi possível registar a camada carbonizada que afetou a parte exposta ao fogo, Fig. 12.

Também no modelo numérico, e para o último instante de tempo, foi aplicado o critério em que a camada carbonizada

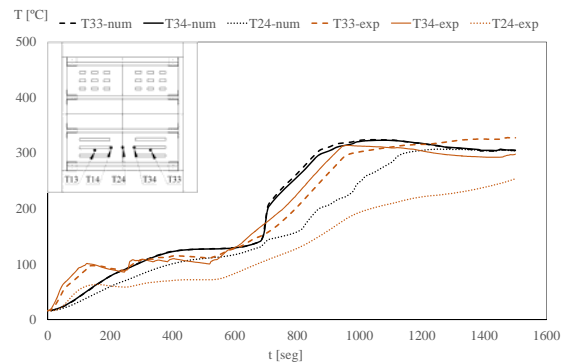


Laje 1

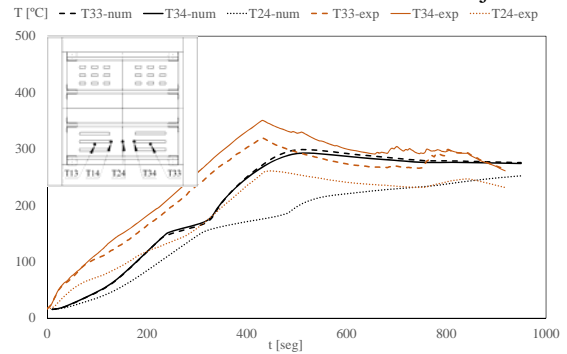


Laje 2

Fig. 10 – Temperaturas na célula sem perfuração.



Laje 1



Laje 2

Fig. 11 – Temperaturas na célula com perfurações retangulares.

ocorre entre 280 a 300 °C, Eurocódigo 5 2003, verificando-se a secção residual em cada laje, conforme a Fig. 13. A secção residual, apresentada no modelo numérico, cor-

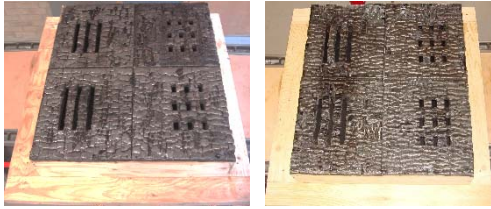


Fig. 12 – Carbonização nos modelos de laje.

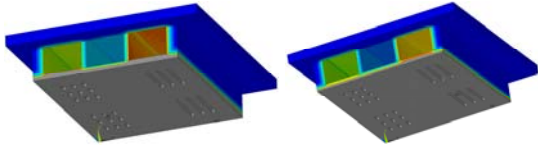


Fig. 13 – Carbonização nos modelos numéricos.

responde à espessura em cor cinza. A dimensão desta espessura, em função do tempo em que ocorre, permite determinar a velocidade de carbonização.

Para aferir a velocidade de carbonização em cada célula da laje, experimental e numérica, foram efetuados diferentes registos de medições, nas direções identificadas na Fig.14. Em cada um desses cortes encontram-se diferentes posições para medição da espessura carbonizada no instante final. O valor médio dessas medições, função do tempo, permitem determinar a velocidade de carbonização conforme os resultados apresentados na Tabela 1.

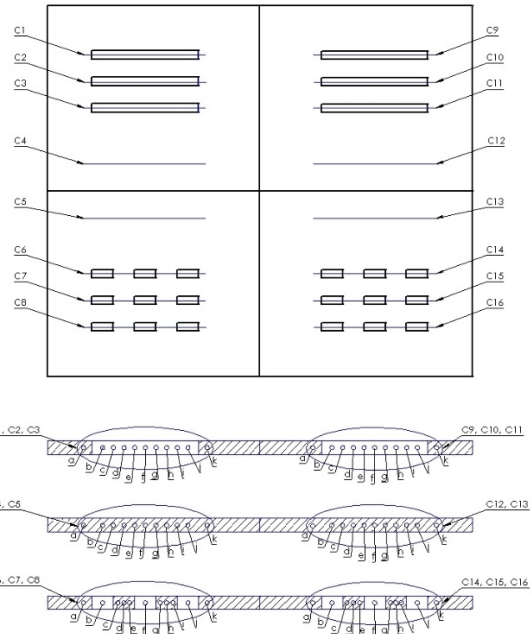


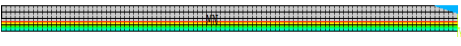



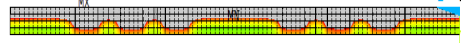

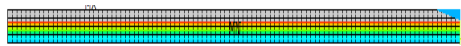

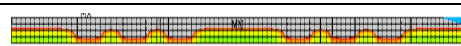



Fig. 14 – Cortes para medição da espessura.

Os resultados apresentados permitem retirar conclusões sobre a velocidade de carbonização em cada uma das zonas celulares da laje. A zona de corte relativa à célula sem perfurações apresenta os valores mais baixos de carbonização, sendo a célula com perfurações retangulares a que atinge os maiores valores. No instante final, em que se registaram estes valores, nota-se uma relação de quase o dobro da velocidade de carbonização nas células com perfurações em relação à célula sem perfurações.

Tabela 1: Velocidade de carbonização, comparação numérica e experimental.

Cortes	Carbonização_Ansys	Carbonização_Experimental
Laje1 C1, C2, C3, C9, C10, C11	 1,3 mm/min	 1,2 mm/min
Laje1 C4, C5, C12, C13	 1,0 mm/min	 0,65 mm/min
Laje1 C6, C7, C8, C14, C15, C16	 1,4 mm/min	 1,0 mm/min
Laje2 C1, C2, C3, C9, C10, C11	 1,3 mm/min	 1,4 mm/min
Laje2 C4, C5, C12, C13	 0,7 mm/min	 0,8 mm/min
Laje2 C6, C7, C8, C14, C15, C16	 1,2 mm/min	 1,0 mm/min

## 5. CONCLUSÕES

O modelo numérico revelou-se de grande importância na determinação do campo de temperaturas e da camada carbonizada em modelos de lajes de madeira. Comparando as diferentes células utilizadas nas lajes em estudo, pode concluir-se que as células com perfurações atingem um valor de carbonização quase duas vezes maior em relação às não perfuradas. Isto explica-se pelas temperaturas registadas dentro das cavidades celulares de cada uma das lajes. Para o tempo final de cada ensaio, as células sem perfurações não ultrapassam os 100 °C, enquanto que nas células com perfurações os valores de temperatura triplicam. Pode ainda concluir-se que existe uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

## REFERÊNCIAS

- Cachim P. B., Franssen J. M. 2010. Assessment of Eurocode 5 Charring rate Calculation Methods. *Fire Technology*, 46, p.169-181.
- Collier PCR. 1992. Charring rates of timber. Study report, Branz, New Zealand.
- EN1995-1-2: 2003. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design. CEN - Comité Européen de Normalisation.
- 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*, Vol.134, Fifth Int. Conference on Safety and Security Engineering, 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.
- Janssens M. L. 2004. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and Materials*, 28, p. 199-207.
- Poon L., England J. P. 2003. Literature Review on the Contribution of Fire Resistant Timber Construction to Heat Release Rate-Timber Development Association, Warrington Fire Research Aust. Pty. Ltd., Project No.20633, version 2b, p. 1-78.
- 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 Lab.
- 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).
- Konig J, Walleij L. 1999. One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations. *Swed Inst Wood Technol Res*.