

atas do 2º congresso
ibero-latino-americano
em segurança
contra incêndios

actas del 2º congreso
ibero-latino-americano
en seguridad
contra incendios

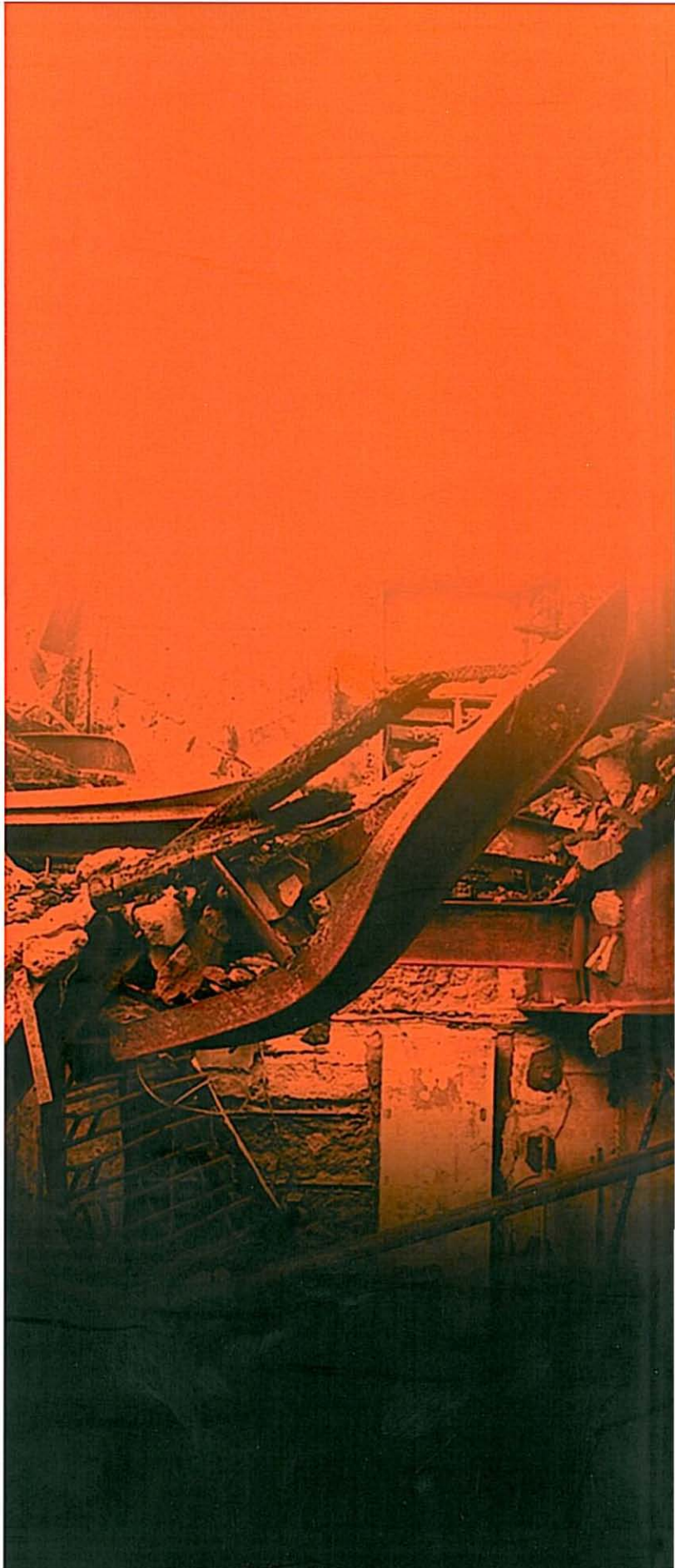
proceedings of the 2nd
ibero-latin-american
congress
on fire safety



associação luso-brasileira
para a segurança contra incêndio



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



ISBN 978-972-96524-9-3



9 789729 652493

**2º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-
Americano sobre Segurança Contra
Incêndio**

**2º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-
Americano en Seguridad Contra Incendio**

Coimbra - Portugal

29 de Maio a 1 de Junho de 2013

João Paulo Correia Rodrigues

**Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra - Portugal**

Ricardo Fakury

**Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais - Brasil**

Rosaria Ono

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de S. Paulo - Brasil

Jorge Munaiar Neto

Escola de Engenharia de S. Carlos da Universidade de S. Paulo - Brasil

**Anais do 2º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano sobre
Segurança Contra Incêndio**

**Atas do 2º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança
Contra Incêndios**

**Actas do 2º CILASCI – Congreso Ibero-Latino-Americano en Seguridad
Contra Incendio**

João Paulo Correia Rodrigues & Ricardo Fakury (editores)

Rosária Ono & Jorge Munaiar Neto (editores associados)

Primeira edição

Maior, 2013

Copyright © 2013 João Paulo C. Rodrigues & Ricardo Fakury

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotocópia, microfilmagem, gravação ou outro, sem autorização escrita das editores.

Ninguna parte de este trabajo puede ser reproducida, almacenada en un sistema de recuperación, o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico, mecánico, fotocopia, microfilmación, grabación o cualquier otro, sin el permiso escrito de los editores.

ISBN: 978-972-96524-9-3

Editado por:

**Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra. Rua Luís Reis Santos. 3030-786 Coimbra. Portugal**

PREFÁCIO

A segurança contra incêndio dos edifícios (SCIE) constitui hoje uma realidade na vida das sociedades, pois continuam a ocorrer de incêndios, mais ou menos importantes, com elevadas perdas materiais e algumas humanas, em diferentes pontos do mundo. Não interessa recordar aqui episódios tristes do passado recente que deixam na nossa alma um profundo sentimento de consternação, mas devemos refletir com esses acontecimentos e concluir que muito ainda há a fazer nessa área no espaço ibero-latino-americano. Na época atual, em todo o mundo, existem regulamentos de segurança contra incêndios para os diferentes tipos de edifícios, bem como regras e códigos de dimensionamento em situação de incêndio dos elementos construtivos e sistemas. O lançamento de novos sistemas de proteção ao fogo das estruturas, de novos materiais de comportamento melhorado ao fogo e sistemas de deteção e extinção de incêndio, tem sido uma constante nos últimos anos, conferindo a essa área um caráter inovador e em constante transformação. Com o intuito de reunir os técnicos, pesquisadores, formadores e pessoal interessado na área da SCIE a Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio (ALBRASCI) realiza bianualmente um congresso ibero-latino-americano sobre segurança contra incêndio que tem como objetivo permitir a apresentação de trabalhos científicos realizados em Portugal, Espanha e demais países da América Latina, os últimos desenvolvimentos tecnológicos na área e criar um espaço de discussão para os técnicos, cientistas, legisladores, bombeiros e demais pessoas que atuam na área.

Após o sucesso do primeiro congresso que ocorreu em 2011, em Natal, no Brasil, realiza-se agora em Coimbra, Portugal, o segundo congresso. Neste congresso para além dum conjunto de palestras de grande interesse, dadas por alguns dos maiores especialistas mundiais nas temáticas das mesmas, tem também um conjunto de apresentações de trabalhos científicos de grande valor por vários pesquisadores do espaço ibero-latino-americano. Os congressos CILASCI afirmaram-se já como uma referência na área, no espaço ibero-latino-americano, havendo já várias propostas para sua realização noutros países da América Latina nos próximos anos. Os resultados destes congressos potencializam o desenvolvimento da pesquisa, ensino, formação, normatização, regulamentação, métodos de cálculo e dos sistemas em SCIE, principalmente no espaço ibero-latino-americano.

João Paulo C. Rodrigues
(Universidade de Coimbra – Portugal)

Ricardo Fakury
(Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil)

PREFACIO

La seguridad contra incendios de edificios (SCIE) es hoy una realidad en la vida de las sociedades, pos continúan ocurriendo incendios, más o menos importantes, con grandes pérdidas de bienes materiales y humanos, en diferentes partes del mundo. No interesa aquí recordar los tristes episodios pasados que dejan en nuestra alma un profundo sentimiento de consternación, pero debemos reflexionar sobre estos acontecimientos y concluir que mucho aún hay que hacer en esta área en el espacio ibero latino-americano. En la época actual, en todo el mundo, existen normas de seguridad contra incendios para diferentes tipos de edificios, así como normas y códigos de dimensionamiento al fuego de sistemas y elementos constructivos. La aparición de nuevos sistemas de protección contra incendios de estructuras, nuevos materiales de comportamiento mejorado al fuego y de sistemas de detección y extinción de incendios, ha sido una constante en los últimos años, dando a esta área un carácter innovador y en constante evolución.

Con el fin de cumplir con los técnicos, investigadores, formadores y otras personas interesadas en el área de SCIE, la Asociación Luso-Brasileña de Seguridad contra Incendios (ALBRASCI) realiza dos veces al año un congreso ibero latinoamericano sobre seguridad contra incendios, cuyo objetivo es permitir la presentación de artículos científicos de Portugal, España y otros países de América Latina, los últimos desarrollos tecnológicos en el área y crear un espacio de discusión para técnicos, científicos, legisladores, bomberos y otras personas que trabajan en el área.

Después del éxito del primero congreso en 2011, en Natal, en Brasil, se realiza ahora en Coimbra, Portugal, el segundo congreso. En este congreso, además de un conjunto de conferencias de gran interés, dada por algunos de los principales expertos del mundo en los temas de las mismas, tiene también un grande conjunto de presentaciones de artículos científicos de gran valor por varios investigadores de universidades de lo espacio ibero latinoamericano. El congreso de CILASCI se ay afirmado como una referencia en el área, y ya hay varias propuestas para su realización en otros países de América Latina en los próximos años. Los resultados de estés congresos levan al desarrollo de la investigación, educación, formación, normalización, reglamentación, métodos de cálculo y sistemas de SCIE, principalmente en el espacio Ibero latino-americano.

João Paulo C. Rodrigues

(Universidade de Coimbra – Portugal)

Ricardo Fakury

(Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil)

Comissão Organizadora

João paulo C. Rodrigues (Coordenador)
Universidade de Coimbra – Coimbra – Portugal

António J. Moura Correia (Co-coordenador)
Instituto Politécnico de Coimbra – Coimbra – Portugal

Edna Moura Pinto (Co-coordenadora)
URN – Rio Grande do Norte – Natal – Brasil

Luís M. Santos Laím (Co-coordenador)
Universidade de Coimbra – Coimbra – Portugal

Cecília M. Pires Barra
Câmara Municipal de Loulé - Portugal

Cristina Calmeiro dos Santos
IPCB – Instituto Politécnico de Castelo Branco - Portugal

Jorge Munaiar Neto
Escola de Engenharia de São Carlos – USP – Universidade de São Paulo -
Brasil

José Pedro Lopes
INEM – Instituto Nacional de Emergência Médica – Portugal

Tiago Ancelmo Pires
UFP – Universidade Federal de Pernambuco – Brasil

Comissão Científica

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Ricardo Hallal Fakury (Coordenador) | UFMG – Brasil |
| Jorge Munaier Neto | USP – Brasil |
| Rosária Ono | USP – Brasil |
| Luiz Carlos Pinto da Silva Filho | UFRGS – Brasil |
| Aldina Maria da Cruz Santiago | UC – Portugal |
| Alexandre Itiu Seito | USP - Brasil |
| Alexandre Landesmann | COPPE – Brasil |
| Armando Lopes Moreno Júnior | UNICAMP – Brasil |
| Carlito Calil Júnior | USP – Brasil |
| Carlos Pina Santos | LNEC – Portugal |
| Carlos Guedes Soares | IST – Portugal |
| Carlos Quaglia | Stephen Grubits & Associates |
| Carlos Pina dos Santos | LNEC – Portugal |
| Dario Lauro Klein | UFRGS – Brasil |
| Edna Moura Pinto | UFRN – Brasil |
| Enrique Mirambell Arrizabalaga | UPC – Espanha |
| George Cajaty Barbosa Braga | CBMDF - Brasil |
| Geraldine Charreau | INTI – Argentina |
| João Paulo Correia Rodrigues | UC - Coimbra |
| José Cralos Lopes Ribeiro | UFV - Brasil |
| José Luis Torero | LNEC – Portugal |
| Larissa Deglioumini Kirchhoff | UNIPAMPA - Brasil |
| Lino Forte Marques | DEEC – FCTUC – Portugal |
| Manuel Romero | UPV - Brasil |
| Maria Cruz Alonso | CISDEM – UPM – CSIC – Espanha |
| Miguel Chichorro Gonçalves | DEC – FEUP – Portugal |
| Paulo A. G. Piloto | IPB – Bragança |
| Paulo Jorge de M. M. F. de Vila Real | UA – Portugal |
| Pedro Martins Arezes | UMinho - Portugal |
| Poliana Dias de Moraes | UFSC – Brasil |
| Ricardo Alfredo Cruz Hernandez | UIS – Colômbia |
| Rodrigo Barreto Caldas | UFMG – Brasil |
| Rodrigo Machado Tavares | IPT – Brasil |
| Valdir Pignatta e Silva | USP – Brasil |
| Vitor Carlos Trindade Abrantes | DEC – FEUP – Portugal |

Análise dos parâmetros de maior influência na resposta de um elemento de madeira em altas temperaturas
Julio Cesar Molina, Carlito Calil Junior, Edna Moura Pinto
.....219

Modelo numérico para avaliação do efeito do isolamento em lajes de madeira submetidas ao fogo
Diana Coelho, Elza Fonseca, Paulo Vila Real, José Amorim Faria, António Arede
.....229

Resistência ao fogo de vigas de madeira laminada colada reforçadas
Luis Alberto Gómez, Pedro J. V. P. de Brito, Ângela do Valle, Manuel J. Manriquez Figueroa, Poliana Dias de Moraes, João Paulo C. Rodrigues, João H. Negrão
.....239

Reação ao fogo de madeira antiga protegida com tratamentos retardadores de combustão
João Laranjeira, Helena Cruz, Ana Paula Ferreira Pinto, Carlos Pina dos Santos
.....249

Resistência ao cisalhamento da madeira de telhado após incêndio
Danilo S. Galdino, Edna Moura Pinto, Elen A. M. Morales, Ricardo M. Barreiros, André G. Lima
.....259

ESTRUTURAS DE CONCRETO ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Projeto de vigas de concreto em situação de incêndio. Aperfeiçoamento de recomendações do Eurocode
Valir Pignatta Silva
.....271

Comparação entre métodos simplificados para a determinação do momento fletor resistente de vigas de concreto em situação de incêndio
Gabriela B. M. L. Albuquerque, Valdir Pignatta Silva
.....281

MODELO NUMÉRICO PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DO ISOLAMENTO EM LAJES DE MADEIRA SUBMETIDAS AO FOGO

Diana Coelho^{*1}; Elza Fonseca²; Paulo Vila Real³; José Amorim Faria¹; António Arede¹

* diana.coelho@gmail.com

¹Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

²Instituto Politécnico de Bragança

³Universidade de Aveiro

Palavras-chave: laje de madeira, fogo, isolamento, elementos finitos

Resumo

O objetivo fundamental deste artigo é desenvolver um modelo numérico térmico para a análise de lajes em madeira, com e sem isolamento. Será utilizado o método de elementos finitos, através do programa ANSYS para determinar os perfis de temperaturas, a espessura e a velocidade de carbonização. O cálculo dos perfis de temperaturas será obtido em regime transiente, através de uma análise não linear em que as propriedades térmicas dependem da temperatura. Estas propriedades foram estabelecidas de acordo com dados referenciados e calibrados numericamente. Pretende-se aproximar os resultados numéricos, com os resultados experimentais obtidos por Frangi [1], obtendo-se assim um modelo numérico calibrado. Serão apresentadas conclusões relevantes sobre a utilização de diferentes isolamentos em lajes de madeira, assim como a determinação das curvas típicas de carbonização. Os resultados permitirão identificar soluções de projeto, facilitando a verificação da segurança em situação de incêndio em lajes ou pavimentos de madeira com ou sem isolamento.

1. INTRODUÇÃO

A madeira tem atraído a atenção de engenheiros e arquitetos, devido às suas características arquitetónicas, estruturais e por se tratar de um material de construção renovável e amigo do ambiente. Quando exposta a acções acidentais, como o caso da situação de 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 efectiva, fazendo com que as dimensões transversais do elemento reduzam o seu tamanho. No entanto, esta espessura de carbonização é um bom isolante, que protege o núcleo da secção.

Vários investigadores têm apresentado modelos experimentais e numéricos para o cálculo da degradação física de madeira na presença de altas temperaturas, White [2], Poon [3], Janssens [4]. A velocidade de carbonização da madeira macia ou estrutural quando exposta a condições de incêndio tem sido estudada por investigadores de diferentes países, Schaffer [5], White [6], König [7], Gardner [8], Collier [9], Pun [10], Cachim [11], Fonseca [12]. Modelos empíricos para a determinação da velocidade de carbonização e condições de transferência de calor foram desenvolvidos por Schaffer [5], White [6].

Neste trabalho será definido um modelo de verificação numérico, através da calibração com um modelo de pavimento experimental proposto por Frangi [1], tendo sido utilizado um programa

comercial de elementos finitos para o efeito. O modelo numérico apresentado pretende ser uma réplica das lajes pré-fabricadas em madeira, comum nos países Nórdicos, e utilizadas maioritariamente em edifícios residenciais e comerciais. Nas cavidades da laje serão colocados elementos de isolamento, fibra de vidro ou lã de rocha, de modo a melhorar as propriedades térmicas e acústicas, o que permitirá avaliar o efeito na retardação térmica sobre a laje de madeira.

2. RESISTÊNCIA DA MADEIRA A ALTAS TEMPERATURAS

A combustão superficial da madeira produz uma camada de carbonização isolante, que dificulta a transmissão do calor e a progressão do fogo para o interior, devido à baixa condutividade térmica desta camada. Sob a zona de carbonização existe uma pequena camada, com espessura inferior, em que a madeira se encontra alterada, mas não totalmente decomposta. A restante secção mantém as suas propriedades inalteradas.

O comportamento térmico da madeira pode ser descrito através dos processos de formação da zona da pirólise e da camada de carbonização. 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. A falha da capacidade de carga dos elementos estruturais em madeira acontece pela diminuição da secção resistente devido à carbonização.

De acordo com o Eurocódigo 5 [13], a evolução da temperatura de um incêndio ao longo do tempo pode ser definida por curvas de incêndio normalizado. Neste trabalho adoptou-se a utilização da curva de incêndio padrão ISO834 para a evolução da temperatura ambiente, tendo sido consideradas condições de fronteira de convecção e radiação, na face da laje exposta ao fogo.

3. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados no modelo em análise são a madeira de abeto (spruce), a fibra de vidro e a lã de rocha. Será ainda identificado um modelo da laje não isolado com a presença de ar na sua cavidade. Os vários materiais têm um comportamento não linear devido às suas propriedades serem dependentes da temperatura.

São considerados dois tipos de madeira, a madeira 1 cujas propriedades térmicas se encontram definidas no anexo B do Eurocódigo 5 [13] e a madeira 2 em que as propriedades se encontram degradadas, quando comparadas com as da madeira 1, pelo efeito da influência da libertação de gases e perda da massa resistente, devido à formação do carvão na frente de fogo. As propriedades relativas à madeira 2, pelo motivo apresentado, foram calibradas através de várias análises numéricas, de modo a ser possível a aproximação ao modelo experimental de referência. As propriedades térmicas a considerar são a condutividade térmica (figura 1), o calor específico (figura 2) e a massa volúmica (figura 3).

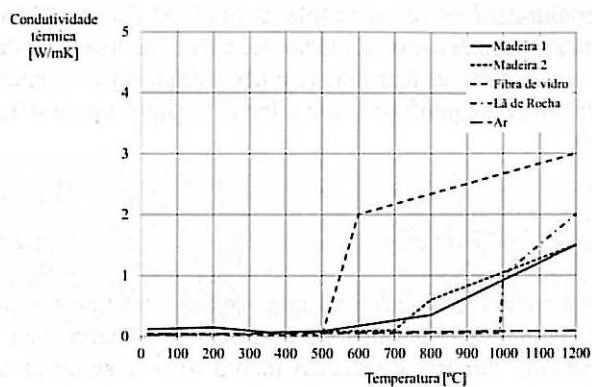


Figura 1 – Condutividade térmica dos materiais [W/m⁰K].

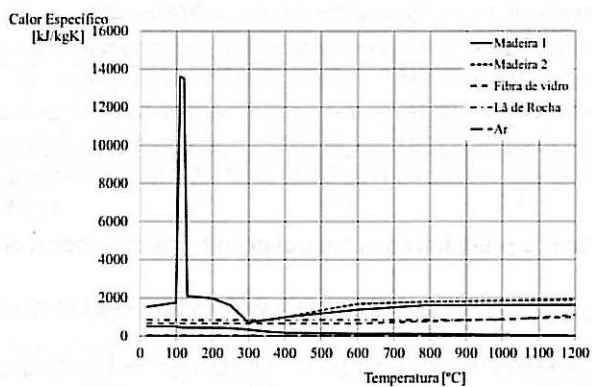


Figura 2 – Calor específico dos materiais [kJ/kg⁰K].

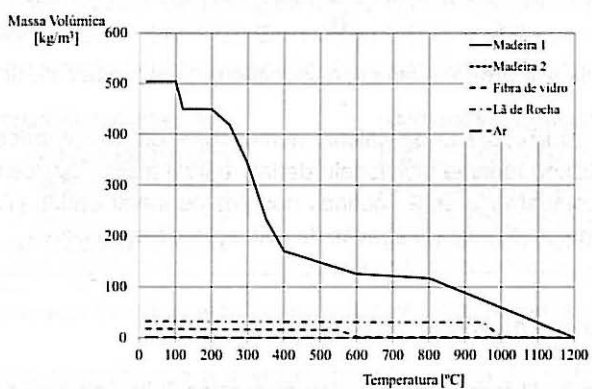


Figura 3 – Massa volúmica dos materiais [kg/m³].

Associada à condutividade térmica, os isolamentos em fibra de vidro e lã de rocha têm a particularidade da temperatura de fusão acontecer aos 600 [°C] e 1000 [°C] respetivamente, Frangi [1]. Este efeito é obtido pelo aumento repentino da condutividade térmica nesses materiais, conforme se verifica na figura 1. A massa volúmica à temperatura ambiente nos materiais utilizados foi de 503 [kg/m³] para a madeira, 18 [kg/m³] para a fibra de vidro e para a lã de rocha 32 [kg/m³].

4. MODELO DE LAJE EM ESTUDO

No presente trabalho é estudada a réplica de uma laje pré-fabricada em madeira exposta a um cenário de incêndio, com duas soluções construtivas, a primeira com preenchimento das cavidades com isolamento térmico e acústico (figura 4) e a segunda sem isolamento nas cavidades (figura 5).

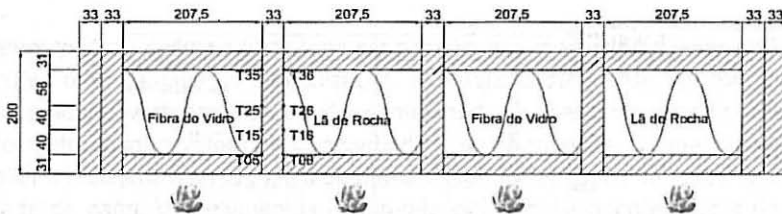


Figura 4 – Modelo da laje pré-fabricada com isolamento nas cavidades, dimensões em [mm].

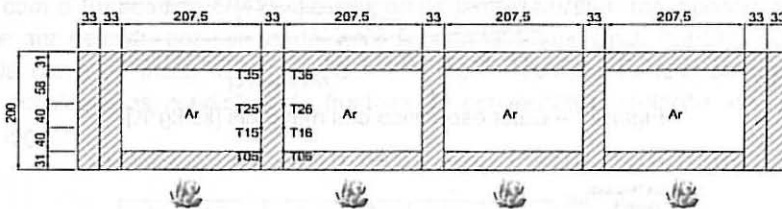


Figura 5 - Modelo da laje pré-fabricada sem isolamento nas cavidades, dimensões em [mm].

Para a simplificação do processo de cálculo numérico, e devido à simetria geométrica e de aquecimento, foi utilizado metade do modelo da laje apresentado. Os resultados do campo de temperaturas para comparação serão obtidos nos pontos identificados (T_k) nas figuras 4 e 5, conforme apresentado por Frangi [1] através da utilização de termopares.

4.1. Modelos numéricos de laje

Na análise numérica é utilizado o método dos elementos finitos através do programa ANSYS. Para cada modelo em estudo é calculado o perfil de temperaturas e a espessura de carbonização. Na figura 6, encontram-se definidas as malhas de elementos finitos utilizadas, tendo sido escolhido um elemento de 8 nós (Plane77) com capacidade para análise térmica em

Modelo numérico para a avaliação do efeito do isolamento em lajes de madeira submetidas ao fogo

regime transiente. No primeiro modelo considerou-se uma malha de elementos finitos com os diferentes materiais de madeira e isolamento no interior das cavidades. Em relação ao segundo modelo considerou-se a existência de ar no interior das cavidades, através de uma discretização por elementos finitos. Por este motivo, a transmissão de calor no interior da cavidade será efetuada por condução, não tendo sido considerado o efeito de radiação.

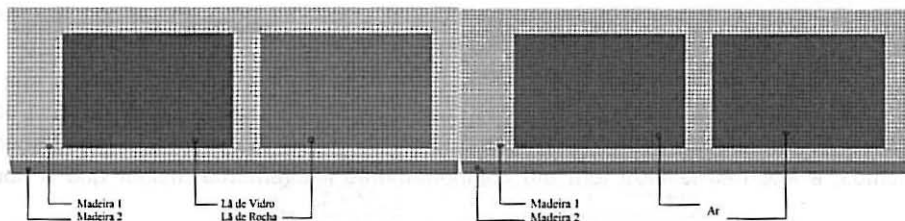


Figura 6 – Malhas de elementos finitos utilizadas.

As condições de fronteira impostas na superfície inferior dos modelos, são de radiação e convecção, sendo que a temperatura ambiente evolui de acordo com a curva ISO834. A superfície superior se encontra totalmente isolada, sem contacto com a fonte de calor. Considerou-se ainda, o contacto perfeito na transmissão de calor entre os vários materiais. Os resultados foram obtidos para diversos instantes de tempo (30 [min], 40 [min], 50 [min] e 60 [min]), tendo sido calculado o perfil de temperaturas na interface da secção vertical onde se encontram os termopares.

4.2. Discussão dos resultados: efeito do isolamento na laje

Nas figuras 7 e 8, encontram-se representados os campos de temperaturas obtidos para as secções cuja cavidade se encontra com ou sem isolamento. Em ambos os modelos apresentam-se as temperaturas para o instante de tempo correspondente a 3600s. Pode observar-se os máximos valores de temperaturas, e com a aplicação do critério em que a camada carbonizada ocorre aos 300 [°C], Eurocódigo 5 [13], verifica-se a secção residual na laje, representada pela secção perdida e identificada na cor cinza em ambas as figuras.

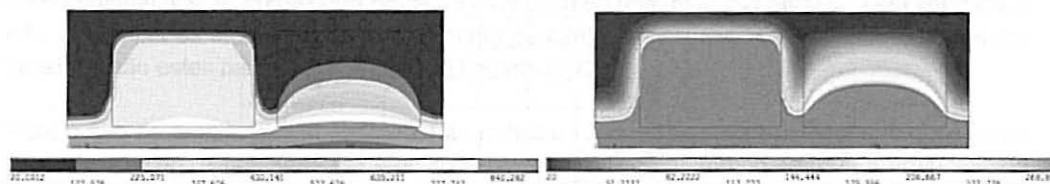


Figura 7 – Temperaturas na laje e secção residual, cavidades isoladas, no final de 3600s.

Na figura 7 é possível observar que a cavidade isolada com lã de rocha permite retardar o aquecimento da laje quando comparada com o isolamento da lã de vidro. Esta conclusão pode ser verificada também no modelo experimental de referência.

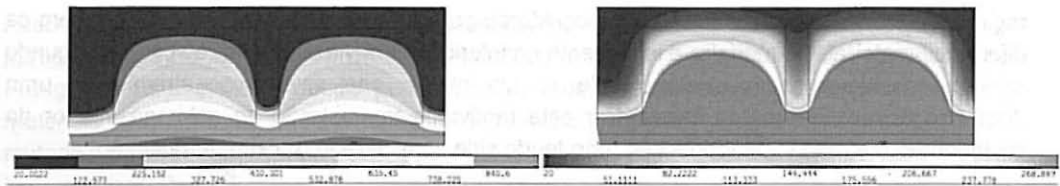


Figura 8 – Temperaturas na laje e secção residual, cavidades preenchidas com ar (não isoladas), no final de 3600s.

Em relação às cavidades da laje preenchidas com ar e por condução de calor, verifica-se que há degradação da madeira por carbonização no final de 3600s. No entanto, e em relação aos isolamentos, a laje não isolada terá um comportamento ligeiramente melhor que a fibra de vidro.

Nas figuras 9 e 10 encontram-se os perfis de temperatura na interface entre a madeira e os isolamentos, comparados com os resultados de referência, Frangi [1].

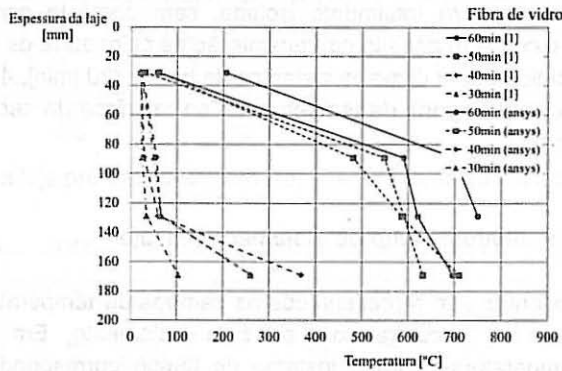


Figura 9 – Temperaturas na interface entre a madeira e o isolamento fibra de vidro.

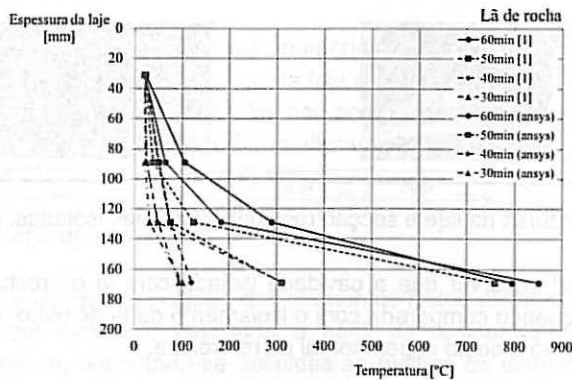


Figura 10 – Temperaturas na interface entre a madeira e o isolamento lã de rocha.

Modelo numérico para a avaliação do efeito do isolamento em lajes de madeira submetidas ao fogo

Na figura 9, o cálculo numérico apresenta boas aproximações aos valores experimentais de referência, excepto para os dados do termopar T05 e para a curva de 60 [min].

Analisando a figura 10, os resultados obtidos numericamente são próximos dos valores de referência nas curvas a 30 e 40 [min], nos termopares T36 e T26 da curva 50 [min].

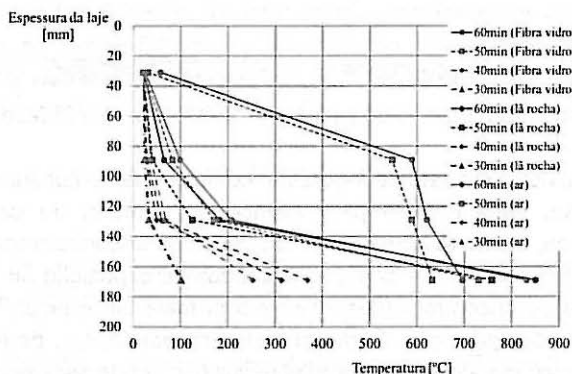


Figura 11 – Comparação dos perfis de temperaturas.

Comparando os dois isolamentos, a lã de rocha exerce maior protecção nos elementos, uma vez que a sua temperatura de fusão é atingida aos 1000 [°C]. Por outro lado, o isolamento em fibra de vidro derrete a partir dos 600 [°C] o que significa que para os 50 [min] e 60 [min] de exposição ao fogo, este isolamento já não existe no posicionamento de alguns dos termopares, mostrando a sua incapacidade na protecção dos elementos verticais. Analisando os resultados nas lajes com isolamento e com as cavidades de ar, verifica-se que existe uma aproximação maior ao campo de temperaturas com o isolamento a lã de rocha.

4.3. Discussão dos resultados: velocidade de carbonização

De acordo com o Eurocódigo 5 [13], a velocidade de carbonização em elementos de madeira macia submetidos ao fogo e sem protecção é de $\beta_0=0,65$ [mm/min]. No entanto, esta velocidade não contempla os efeitos de arredondamento de cantos e fissuras. A velocidade que tem em consideração estes parâmetros é $\beta_n=0,80$ [mm/min] [13].

Para o tipo de estruturas em estudo neste trabalho é considerada a existência de duas fases de carbonização. A primeira fase é definida como o período de tempo em que a profundidade de carbonização ainda não afetou toda a camada de madeira exposta ao fogo, comportando-se como uma laje de madeira maciça, figura 12. A taxa de carbonização $\beta_{1,n}$ define a carbonização da laje de madeira durante a primeira fase e é calculada através da expressão (1).

$$\beta_{1,n} = \frac{h_u}{t_1} \quad (1)$$

Em que, h_u é a espessura de carbonização e t_1 é o tempo de exposição ao fogo que decorre até que a espessura de carbonização, iguale a espessura de madeira exposta ao fogo.

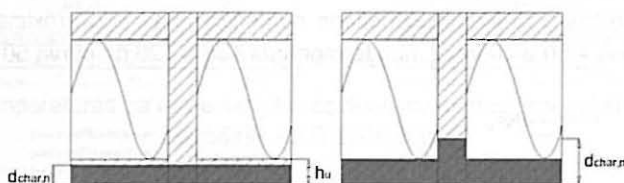


Figura 12 – Modelo para o cálculo da secção residual: 1ª fase e 2ª fase de carbonização.

Após a camada de madeira exposta ao fogo estar completamente consumida, inicia a segunda fase de carbonização, caracterizada pelo avanço da camada de carbonização para os membros verticais finos, figura 12. Quando as cavidades se encontram vazias ou não isoladas, os membros verticais encontram-se expostos a 3 lados de exposição ao fogo. Por outro lado, quando as cavidades se encontram preenchidas com material isolante, a exposição ao fogo mantém-se a um lado de exposição. Para um tempo requerido, t_{req} , de resistência ao fogo, a espessura de carbonização para os membros verticais ocios pode ser calculada através de:

$$d_{char,n} = \beta_{1,n} \times t_{req} \quad \text{para } 0 \leq t_{req} \leq t_1 \quad (2)$$

$$d_{char,n} = h_u + \beta_{2,n} \times (t_{req} - t_1) \quad \text{para } t_{req} \geq t_1 \quad (3)$$

A secção transversal resultante ou residual é definida pela figura 13.

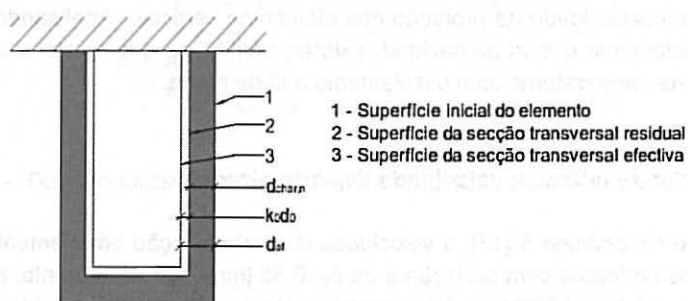


Figura 13 – Definição da secção residual e da secção efetiva.

A espessura efetiva carbonizada da secção é calculada através da expressão (4).

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (4)$$

De acordo com o Eurocódigo 5 [13], os parâmetros k_0 e d_0 , têm em consideração a temperatura para a redução da secção transversal. O parâmetro k_0 varia entre 0 e 1 até ao tempo de exposição de 20 [min]. A partir desse tempo, k_0 toma sempre o valor de 1. Para a primeira fase

Modelo numérico para a avaliação do efeito do isolamento em lajes de madeira submetidas ao fogo

de carbonização, o Eurocódigo 5 [13], propõe o valor de 7 [mm] para d_0 . A velocidade de carbonização da fase 2 é calculada através da expressão (5).

$$\beta_{2,n} = k_s \times k_2 \times k_n \times \beta_{1,n} \quad (5)$$

De acordo com o Eurocódigo 5 [13], k_s é o fator da secção transversal, que toma o valor de 1,5, devido à espessura de madeira exposta do fogo, na primeira fase de carbonização. O parâmetro k_2 é o fator de isolamento, calculado através da expressão (6), igual a 0,82 e k_n o fator de conversão da secção irregular para regular com o valor de 1,5.

$$k_2 = 1,05 - 0,0073 \times h_u \quad (6)$$

A tabela 1 mostra os valores médios da taxa de carbonização para as duas fases de carbonização, que se encontram representados na figura 14.

Tabela 1 – Valores das velocidades de carbonização.

| | Modelo Experimental [1] | Modelo Numérico | Modelo Analítico [22] |
|------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------------|
| $\beta_{1,n}$ [mm/min] | 0,80 | 0,74 | 0,80 |
| $\beta_{2,n}$ [mm/min] | 1,60 | 1,53 | 1,48 |

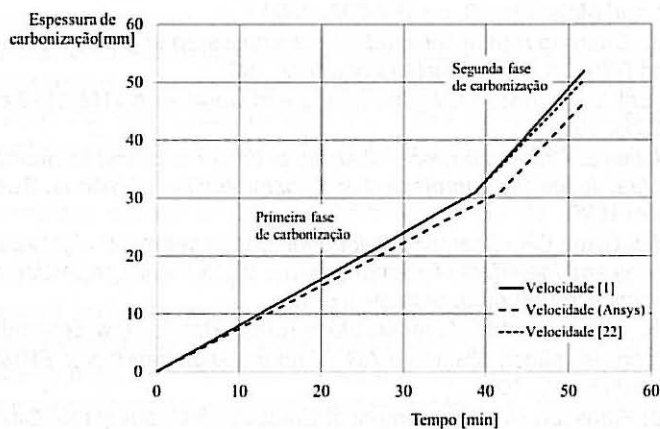


Figura 14 – Representação das velocidades de carbonização.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente através de Frangi [1], os obtidos com o modelo numérico calibrado e os valores tabelados no Eurocódigo 5 [13], pode verificar-se que para ambas as fases de carbonização há uma concordância nos resultados.

Conclusões

O modelo numérico revelou-se de grande importância na determinação da camada carbonizada em modelos de lajes de madeira com e sem isolamento. Para além do cálculo do perfil de temperaturas em regime transiente, foi possível registar e calcular as velocidades de carbonização para cada uma das fases, que ocorre na situação de exposição ao fogo em lajes ocas de madeira. Comparando os isolamentos utilizados nas cavidades da laje, pode-se concluir que a lâ de rocha exerce maior protecção aos elementos verticais do que a fibra de vidro. Quando as cavidades apenas se encontram preenchidas por ar, verifica-se que o comportamento do ar é ligeiramente superior ao registado para a lâ de vidro. Pode ainda concluir-se que existe uma boa concordância entre os valores de Frangi [1] e Eurocódigo 5 [13] e os resultados numéricos obtidos através do modelo em estudo.

Referências

- [1] Frangi A, Knobloch M, Fontana M. *Elsevier – Fire design of timber slabs made of hollow core elements*. Elsevier – Engineering Structures, USA, 2008.
- [2] White RH, Dietsberger MA. *Fire Safety*, Chapter 17, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service, 1999.
- [3] Poon L, England JP. *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, pp.1-78, 2003.
- [4] Janssens ML. Modeling of the thermal degradation of structural wood members exposed to fire. *Fire and Materials*, **28**, pp.199-207, 2004.
- [5] Schaffer EL. *Charring rate of selected woods transverse to grain*. Research paper FPL 69. Madison (WI): Forest Products Laboratory; 1967.
- [6] White RH, Erik V, Nordheim EV. Charring rate of wood for ASTM E119 exposure. *Fire Technol*, **28(1)**, 1992.
- [7] König J, Walleij L. *One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations*. Swed Inst Wood Technol Res, 1999.
- [8] Gardner WD, Syme DR. *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, 1991.
- [9] Collier PCR. *Charring rates of timber*. Study report, Branz, New Zealand, 1992.
- [10] Pun CY, Seng HK, Midon MS, Malik AR. *Timber design handbook*. FRIM, Malayan Forest Records no.42, 1997.
- [11] Cachim PB, Franssen JM. Assessment of Eurocode 5 Charring rate Calculation Methods. *Fire Technology*, **46**, pp.169-181, 2010.
- [12] Fonseca EMM, Barreira L. Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures. WIT Press, *Third International Conference on Safety and Security Engineering*, M. Guarascio, C.A. Brebbia, F. Garzia (Ed.), Italy, **108**, pp.449-457, 2009.
- [13] EN1995-1-2: 2003. Eurocode 5: *Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design*. CEN - Comité Européen de Normalisation, 2003.