



TEST&E 2019

Monitorizar e Preservar

2º Congresso de Ensaios e Experimentação
em Engenharia Civil

19-21 FEVEREIRO 2019
PORTO · PORTUGAL

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

P.PORTO



ATAS DO 2º CONGRESSO

DE ENSAIOS E EXPERIMENTAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



TEST&E 2019

Monitorizar e Preservar

2º Congresso de Ensaios e Experimentação
em Engenharia Civil

ATAS DO 2º CONGRESSO

de

Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil

Monitorizar e Preservar

Instituto Superior de Engenharia do Porto
19-21 fevereiro 2019 | Porto | Portugal

Editores

José Neves
Diogo Ribeiro
Álvaro Ribeiro

Organização



Aviso Legal

A qualidade científica e os conteúdos das comunicações são da inteira responsabilidade dos respetivos autores. O editor não aceita qualquer responsabilidade pela informação contida nas comunicações inseridas na presente publicação. Nos termos legais em vigor, é expressamente proibida a reprodução total ou parcial desta publicação no seu todo ou em parte, não podendo ser reproduzida ou transmitida por qualquer outra forma ou processo eletrónico, mecânico ou outros, incluindo cópia, sem autorização expressa do editor. A escrita segundo o novo acordo ortográfico foi opção livre dos autores.

Ficha Técnica

Título: Atas do 2.º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil

Editores: José Neves, Diogo Ribeiro, Álvaro Ribeiro

Conceção editorial e gráfica: José Neves

Autores: vários

Copyright © RELACRE - Associação de Laboratórios Acreditados em Portugal

Estrada do Paço do Lumiar

Campus do Lumiar – Edifício D, 1º Andar

1649-038 Lisboa, Portugal

Telefone: +351 213 139 840

E-mail: geral@relacre.pt

Website: <http://www.relacre.pt>

Suporte: eletrónico

Formato: PDF

Data de publicação: Julho de 2019

ISBN: 978-972-8574-49-9

DOI: 10.5281/zenodo.3355354

<https://doi.org/10.5281/zenodo.3355354>

Website do congresso: <https://www2.isep.ipp.pt/teste2019/>

ÍNDICE

PREFÁCIO	XI
<i>José Neves, Digo Ribeiro, Álvaro Ribeiro</i>	
ORGANIZAÇÃO	XIII
APOIOS E EXPOSITORES	XV
Tema 1	
REABILITAÇÃO DO PATRIMÓNIO	
METODOLOGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS DE PEDRA UTILIZANDO ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	3
<i>Carlos Chastre, Marco Ludovico Marques</i>	
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE PAREDES DE ALVENARIA E PAVIMENTOS DE MADEIRA DO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU	15
<i>João Negrão, Romeu Vicente, Tiago Ferreira, Ricardo Almeida, José Mendes da Silva</i>	
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA A INSPEÇÃO E AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS DE ALVENARIA DE PEDRA	25
<i>Carlos Chastre, Marco Ludovico Marques, Hugo Biscaia</i>	
AVALIAÇÃO ESTRUTURAL PELO MÉTODO NÃO-DESTRUTIVO EM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO DO PATRIMÓNIO HISTÓRICO NA REGIÃO LITORÂNEA NO CEARÁ/BRASIL	37
AVALIAÇÃO	
<i>Lia Cavalcante, Moacir Rodrigues, Larissa Mota, David Gomes, João Medeiros, Maria Silva, João Fernandes, Esequiel Mesquita</i>	
AVALIAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NA EXTREMIDADE DE UMA VIGA DE MADEIRA EM CONTACTO COM ALVENARIA HÚMIDA	49
<i>Maxime Verbist, Jorge Branco, João Parracha, Lina Nunes</i>	
ENSAIOS DE TRAÇÃO EM OBRA PARA SISTEMAS DE ANCORAGEM EM BETÃO E ALVENARIA	61
<i>Bárbara Campelo, Gonçalo Carvalho</i>	
COMPORTAMENTO A CARGAS VERTICAIS DE ASNAS EXISTENTES DE MADEIRA EM TESOURA	69
<i>Alexandre Costa, Carlos Rodrigues, Jorge Fonseca, Aníbal Costa</i>	
Tema 2	
NOVOS MATERIAIS	
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS	83
<i>Inês Moreira, Ana Gomes, Maria da Luz Garcia, Diogo Araújo</i>	
COMPORTAMENTO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS - CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE ENERGIA COM FIBRAS DE AÇO E POLIMÉRICAS	95
<i>Ana Gomes, Inês Moreira, Maria da Luz Garcia, Diogo Araújo</i>	
MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA DO BETÃO NAS PRIMEIRAS IDADES: UM NOVO MÉTODO EXPERIMENTAL BASEADO NO AQUECIMENTO/ARREFECIMENTO INTERNO	107
<i>Behzad Zahabizadeh, Ali Edalat-Behbahani, José Gomes, José Granja, Rui Faria, Miguel Azenha</i>	
DESENVOLVIMENTO DE APARATO PARA MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM PASTAS DE CONCRETO	119
<i>Carlos Calado, Aires Camões, Fabrizio Elias, Tâmara Dalpane</i>	

CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ÁGUA / CIMENTO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEAVÉL <i>George Gomes, João Medeiros, Matheus Souza, Felipe Cavalcante, Lia Cavalcante, Francisco Rodrigues, Emanuel Araújo, Loyane Xavier, Esequiel Mesquita</i>	131
AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE ARGAMASSAS COM CINZAS DE CASCA DE AMÊNDOA <i>Maria da Luz Garcia</i>	141
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR PET EM ARGAMASSAS <i>Maria da Luz Garcia, Vanessa Dias, Vítor Silva</i>	149
CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA SUPERFÍCIE DE ETICS À ÁGUA, GRAFFITI E BIOCOLONIZAÇÃO <i>Inês Flores-Colen, Rosário Veiga, Sofia Malanho</i>	161
ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE OS EFEITOS DA MODIFICAÇÃO COM NANOARGILA NAS PROPRIEDADES DE UMA MISTURA SMA <i>João Crucho, José Neves, Silvino Capitão, Luís Picado-Santos</i>	171
 Tema 3 HIDRÁULICA, AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS	
MODELOS TRIDIMENSIONAIS DE SUPERFÍCIE DE QUEBRA-MARES OBTIDOS ATRAVÉS DE VANT. DO PROTÓTIPO PARA O LABORATÓRIO <i>Rute Lemos, Maria Henriques, Rui Capitão, Conceição Fortes</i>	183
ESTUDOS RECENTES ENVOLVENDO MODELAÇÃO FÍSICA E NUMÉRICA APLICADA À ENGENHARIA COSTEIRA. MARÍTIMA E OFFSHORE <i>Francisco Taveira-Pinto, Paulo Rosa-Santos, Tiago Fazeres-Ferradosa</i>	195
AVANÇOS RECENTES NA MONITORIZAÇÃO DE OBRAS MARÍTIMAS EM PORTUGAL <i>Rui Capitão, Rute Lemos, Conceição Fortes, Maria Henriques</i>	207
ENSAIOS DE AGITAÇÃO NO PORTO DE LEIXÕES EM CENÁRIO DE ALTERAÇÃO CLIMÁTICA <i>Miguel Silva, Conceição Fortes, Rute Lemos, Graça Neves, Carlos Caeiro</i>	221
EXTENSÃO DO MOLHE NORTE DO PORTO DE LEIXÕES: MODELAÇÃO FÍSICA DE UM NAVIO AMARRADO NO POSTO A <i>Liliana Pinheiro, Francisco Pedro, Hossam Abdelwahab, Conceição Fortes, João Santos, Rui Capitão</i>	233
ESTUDO EM MODELO REDUZIDO DO ESPRAIAMENTO, GALGAMENTO E DANO EM QUEBRA-MARES DE TALUDE <i>João Santos, Francisco Pedro, Mário Coimbra, Andrés Figuero, Conceição Fortes, José Sande, Moritz Körner, Rute Lemos, Antje Bornschein, Julius Weimper, Jeroen van den Bos, Bastian Dost, Rita Carvalho, Alberto Alvarelllos, Enrique Peña, Reinhard Pohl, Teresa Reis</i>	245
TÉCNICAS DE ANÁLISE E PÓS-PROCESSAMENTO DE IMAGEM APLICADA À EXTRAÇÃO DE DADOS LOCAIS DE ENSAIOS DE ROTURA DE BARRAGENS <i>Sílvia Amaral, Teresa Alvarez, Maria Teresa Viseu, Rui Ferreira</i>	257
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À GEOMETRIA DO CANAL PILOTO NA ROTURA DE BARRAGENS POR GALGAMENTO <i>Teresa Alvarez, Solange Mendes, Sílvia Amaral, Maria Teresa Viseu, Rui Ferreira</i>	269
DETERMINAÇÃO DOS CAMPOS DE VELOCIDADES DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS USANDO PIV-PTV <i>Rui Aleixo, Elsa Carvalho, Maria Manuela Lima, Rui Ferreira</i>	279

Tema 4

GEOTECNIA E TRANSPORTES

COMPARAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO PORTUGUESA EM VIGOR COM A NOVA NORMALIZAÇÃO EUROPEIA PARA CARATERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE SOLOS - ESTUDO LABORATORIAL <i>Carla Martins, Eduardo Neves, Adriano Teixeira, Manuela Carvalho</i>	291
TRATAMENTO DE SOLOS COM CAL <i>João Afonso, Sara Cardoso, Nuno Pinto</i>	301
ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS DE COMPACTAÇÃO DE SOLO-CIMENTO PELO MÉTODO SUL-AFRICANO <i>Joana Machado, Ana Cristina Freire, Simona Fontul, Vitor Antunes</i>	313
AValiação EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE MISTURAS BETUMINOSAS <i>Rui, Micaelo, José Neves, Mauro Antunes, Daniel Aelenei</i>	325
MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ZONAS DE TRANSIÇÃO DA VIA FÉRREA <i>Cristina Alves Ribeiro, Rui Calçada</i>	335
SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DA VIA PARA PESAGEM DE MATERIAL CIRCULANTE EM MOVIMENTO <i>Araliya Mosleh, Andreia Meixedo, Pedro Alves Costa, Rui Calçada</i>	347
CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO DINÂMICO DE UMA PONTE FERROVIÁRIA <i>Daniel Vaz, Gonçalo Ferreira, Diogo Ribeiro, Rui Calçada</i>	357
AValiação DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA PONTE FERROVIÁRIA SOBRE O SADO <i>Andreia Meixedo, Diogo Ribeiro, João Santos, Rui Calçada</i>	369
ANÁLISE EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS COMPONENTES E MATERIAIS DE PONTES EM ARCO DE ALVENARIA DE PEDRA <i>Rúben Silva, Cristina Costa, António Arêde, António Topa Gomes, José Menezes</i>	379
ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM PONTES FERROVIÁRIAS COM VIÉS DA REDE ESPANHOLA DE ALTA VELOCIDADE <i>Carlos Velarde, Diogo Ribeiro, Khanh Nguyen, Jaime García-Palacios, Ván Díaz, José Goicolea</i>	389
VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DA PONTE DAS VÁRZEAS COM BASE NUM ENSAIO DINÂMICO <i>Cláudio Horas, Diogo Ribeiro, Abílio de Jesus, Rui Calçada</i>	401
VALIDAÇÃO DE UM MODELO NUMÉRICO DA PONTE DA ARRÁBIDA COM BASE EM ENSAIO DINÂMICO <i>Jorge Leite, Ricardo Santos, Diogo Ribeiro, Rui Calçada</i>	409
APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO 3D À REABILITAÇÃO E INSPEÇÃO DE VIA FÉRREA COM VISTA À IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA BIM <i>Manuel Vilela, José Neves, Zita Sampaio</i>	417

Tema 5

INOVAÇÃO E TENDÊNCIAS FUTURAS

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE PAREDES NÃO PORTANTES <i>Paulo Piloto, Mohamed Khetata, Ana Gavilán</i>	429
MODELO DE CÁLCULO AVANÇADO CALIBRADO COM ENSAIO EXPERIMENTAL DE LAJES EM MADEIRA EXPOSTAS AO FOGO <i>Elza Fonseca, Paulo Piloto</i>	441

EFEITO DA TEMPERATURA EM LIGAÇÕES COLADAS ENTRE LAMINADOS DE CFRP E CHAPAS METÁLICAS <i>Hugo Biscaia, Manuel Silva, Pedro Ribeiro</i>	449
MONITORIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS OCUPANTES EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS – UM CASO DE ESTUDO <i>Pedro Pereira, Nuno Ramos</i>	461
PRINCIPAIS DESAFIOS E DESENVOLVIMENTOS EM ENSAIOS PARA FORA-DO-PLANO DE PAREDES DE ENCHIMENTO À ESCALA REAL <i>António Arêde, André Furtado, José Melo, Nuno Pinto, Hugo Rodrigues, Humberto Varum</i>	473
LIGAÇÕES COLADAS ENTRE BARRAS DE AÇO INOX EXTERIORMENTE COLADAS A ELEMENTOS DE BETÃO: ANÁLISE TEÓRICA VS. EXPERIMENTAL <i>Hugo Biscaia, Noel Franco, Carlos Chastre</i>	485
MONITORAMENTO NÃO-DESTRUTIVO DA EVOLUÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM ESTRUTURA STEEL FRAME <i>Lia Cavalcante, Matheus Silva, Moacir Rodrigues, Vinicius Sales, João Medeiros, Emanuel Araújo, Ana Barroso, Tallis Rubens, Esequiel Mesquita</i>	499
ANÁLISE DA DELAMINAÇÃO E SEUS EFEITOS EM COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA <i>Pedro Emanuel Silva, João Emílio Matos, Luís Miguel Durão</i>	505
AValiação IN-SITU DO DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS COM INCLUSÃO DE PIGMENTOS REFLETANTES <i>Nuno Ramos, Joana Maia, Ricardo Almeida, Bruno Carneiro</i>	517
PROJETO ELEVAR – ESTUDO LOCALIZADO DE ESTRUTURAS VERTICAIS COM AERONAVES ROBOTIZADAS. UMA CONTRIBUIÇÃO PARA AS INSPEÇÕES VISUAIS ASSISTIDAS DE OBRAS DE ENGENHARIA <i>Maria João Henriques, Tiago Pinto, João Andrade, Duarte Dornellas, Jorge Gonçalves, Ricardo Ribeiro, Alexandre Bernardino, José Santos-Victor, António Lopes Batista</i>	525
MONITORAMENTO DE OBRAS CIVIS UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO E SENSORES DE BAIXO CUSTO <i>Fabio Ioveni Lavandoscki, Douglas Cavalcante, Henrique Puhlmann, Icaro Gonçales, Diego Lapolli Bressan, Lucas Fernandes</i>	535
MONITORAMENTO REMOTO DE FISSURAS EM SALA COM PAREDES CONSTITUÍDAS DE ALVENARIA <i>Fabio Ioveni Lavandoscki, Diego Lapolli Bressan</i>	547
MONITORAMENTO DAS CARGAS EM ESCORAS TELESCÓPICAS UTILIZADAS NA INSTALAÇÃO DE VIGA-GUIA CURVA PRÉ-MOLDADA <i>Ciro José Ribeiro Villela Araujo, Diego Lapolli Bressan</i>	553
Tema 6	
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE ARGAMASSAS ATRAVÉS DE MÉTODOS DINÂMICOS <i>Ana Isabel Marques, João Morais, Carlos Santos, Paulo Morais, Dora Santos, Maria do Rosário Veiga</i>	565
VARIAÇÕES NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE ARGAMASSAS OCASIONADOS PELO EFEITO DA UMIDADE <i>João Medeiros, Felipe Cavalcante, Francisco Rodrigues, George Gomes, Matheus Silva, André Alves, Esequiel Mesquita</i>	577
UTILIZAÇÃO DE ULTRASONOGRAFIA PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE MADEIRA SUBMETIDA A AUMENTOS DE TEMPERATURA <i>Luiz António Branco, Eduardo Chahud, António Carlos Viana Silva, Romeu Rodrigues Pereira</i>	587

RASTREABILIDADE METROLÓGICA DE EXTENSÓMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA UTILIZADOS NA MONITORIZAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO <i>Luís Lages Martins, Juan Mata, Carlos Serra, António Tavares de Castro</i>	585
CALIBRAÇÃO DE SONDAS DE TEMPERATURA USADAS NA MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE SOLOS <i>Rafaela Cardoso, Mariana Sousa, Ana Vieira</i>	605
AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA CARGA ADMISSÍVEL EM VIGAS COMPOSTAS PARA MONOCARRIS DE SISTEMAS DE ELEVAÇÃO <i>Hugo Gouveia, Fernando Ferreira, Jorge Justo</i>	615
PROPOSTA DE ENSAIO ACELERADO DE EXPOSIÇÃO A CHUVAS DIRIGIDAS <i>Maria Luiza Souza Rezende, Aires Camões, Rute Eires, Carlos Jesus, Edgar Soares</i>	625
UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS TENDENCIALMENTE NÃO-DESTRUTIVOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE UMA LAJE TÉRREA INDUSTRIAL <i>João Guedes, Alexandre Costa, Bruno Quelhas, Tiago Ilharco, Valter Lopes, Joana Oliveira</i>	635
Tema 7	
VIBRAÇÕES E HIGROTÉRMICA	
VIBRAÇÕES DO SISTEMA VIA-MACIÇO NUM TROÇO DA LINHA DO NORTE <i>Nuno Correia dos Santos, Aires Colaço, Pedro Alves Costa, Rui Calçada</i>	647
VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM MODELO NUMÉRICO PARA PREVISÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS EM EDIFÍCIOS POR TRÁFEGO FERROVIÁRIO EM TÚNEIS <i>Patrícia Lopes, Pedro Alves Costa, Jesus Fernández, António Silva Cardoso, Rui Calçada</i>	659
ENSAIOS DINÂMICOS DE VEÍCULOS FERROVIÁRIOS DE MERCADORIAS <i>Rúben Silva, Diogo Ribeiro, Cristina Costa, António Arêde, Rui Calçada</i>	671
MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PASSARELAS DE PEDESTRES <i>Gilvan Lunz Debona, José Guilherme Silva</i>	681
CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE SOLUÇÕES TRADICIONAIS DE PAREDES DO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU <i>Ricardo Almeida, Romeu Vicente, Eduardo Roque, Tiago Ferreira, João Negrão, José Mendes da Silva</i>	693
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS INDUZIDOS PELO VENTO NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM <i>Diogo Ribeiro, Jorge Leite, Nuno Pinto, Rui Calçada</i>	703
AVALIAÇÃO DA PERMEABILIDADE AO AR DE VÃOS ENVIDRAÇADOS ATRAVÉS DE ENSAIOS COM PORTA VENTILADORA <i>Nuno Ramos, Ricardo Almeida, Pedro Pereira</i>	713
ANÁLISES TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIGA ENGASTADA-LIVRE CONSIDERANDO OS MÉTODOS DE RESOLUÇÃO EXATA/ANALÍTICA E MATRICIAL <i>Diego Lapolli Bressan</i>	725
ÍNDICE DE AUTORES	737
APÊNDICE DE FOTOGRAFIAS	739

PREFÁCIO

O 2º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil – TEST&E 2019 – foi realizado de 19 a 21 de fevereiro de 2019 no Instituto Superior de Engenharia do Porto, numa organização conjunta da RELACRE (Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal), do ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto) e do IST (Instituto Superior Técnico).

Este congresso pretendeu proporcionar um amplo fórum de divulgação e partilha de conhecimentos e experiências entre os seus participantes das áreas da investigação e ensino, indústria e serviços, sob o tema principal: Monitorizar e Preservar.

No atual ciclo de atividade com enfoque na preservação e valorização do património construído, este congresso pretendeu dar a devida importância à monitorização como ferramenta de apoio imprescindível à gestão desses mesmos ativos, com a finalidade última da sua melhor preservação no ciclo de vida. A monitorização assume ainda maior relevância no âmbito da utilização de novos materiais ou processos construtivos, sobretudo na reabilitação ou reconstrução, onde interessa aprofundar conhecimentos relativos ao seu comportamento em serviço. A implementação das mais variadas técnicas de monitorização, usufruindo com vantagem das tecnologias de informação e comunicação da atualidade, baseia-se em grande medida em ensaios e experimentação que estão em permanente evolução.

Neste livro são apresentados os 68 artigos de 204 autores, de acordo com os seguintes temas:

1. Reabilitação do património
2. Novos materiais
3. Hidráulica, ambiente e recursos naturais
4. Geotecnia e transportes
5. Inovação e tendências futuras
6. Ensaios não destrutivos
7. Vibrações e higrotérmica

Os editores expressam os seus maiores agradecimentos: aos autores, pela confiança na divulgação dos seus trabalhos neste congresso; à Comissão Científica, pela contribuição dada à qualidade técnica e científica dos artigos; à Comissão Organizadora Local e à Comissão Executiva, pela garantia de concretização do congresso com todo o sucesso. Um agradecimento geral é dirigido a todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a excelência da qualidade deste congresso.

Lisboa, julho de 2019.

Os editores

José Neves (CERIS, IST, ULIsboa)

Diogo Ribeiro (ISEP, CONSTRUCT)

Álvaro Ribeiro (LNEC, RELACRE)

ORGANIZAÇÃO

Comissão Organizadora

Álvaro Ribeiro (LNEC, RELACRE)
Diogo Ribeiro (ISEP, CONSTRUCT)
José Neves (IST, ULisboa)

Comissão Organizadora Local

Alexandre Costa (ISEP, CONSTRUCT)
Eduardo Vivas (H2OPT)
Patrícia Lopes (ISEP, CONSTRUCT)
Ricardo Santos (ISEP, CONSTRUCT)
Rui Camposinhos (ISEP, CONSTRUCT)
Tiago Abreu (ISEP, CONSTRUCT)

Comissão Executiva

Ana Duarte (RELACRE)
Cláudia Silva (RELACRE)
Horácio Macedo (ISEP)
Joel Vilas Boas (ISEP)
Jorge Moutinho (ISEP)
Maria João Conceição (RELACRE)

Comissão Científica

Aires Camões (UMinho)	João Alfredo Santos (ISEL)
Aldina Santiago (FCTUC)	João André (APEB)
Alexandre Cury (UFJF, Brasil)	Jorge Branco (UMinho)
Ana Cristina Freire (LNEC)	José Neves (IST, ULisboa)
Ana Velosa (UAveiro)	José Santos (UMadeira)
António Arêde (FEUP)	José Varandas (FCT, UNova)
António Vilhena (LNEC)	Leandro Trautwein (UNICAMP, Brasil)
António Tadeu (FCTUC, ITECONS)	Luís Evangelista (ISEL)
Armando Camelo (EDP, ISEP)	Luís Martins (LNEC)
Baldomiro Xavier (Teixeira Duarte)	Luís Oliveira Santos (LNEC)
Carla Sousa (Mota-Engil)	Luis Picado Santos (IST)
Carlos Chastre (FCT/UNL)	Luiz António Branco (UFMG, Brasil)
Cristina Alves Ribeiro (Senqual)	Miguel Azenha (UMinho)
Cristina Costa (IPTomar)	Nuno Cristelo (UTAD)
Cristina Silva (IPT, Brasil)	Nuno Ramos (FEUP)
Diogo Ribeiro (ISEP)	Paulina Faria (FCT, UNova)
Eduardo Neves (CICCOPN)	Paulo Amaral (LREC, Açores)
Elsa Caetano (FEUP)	Rafaela Cardoso (IST)
Francisco Araújo (Euromodal)	Romeu Vicente (UAveiro)
Francisco Taveira Pinto (FEUP)	Rui Calçada (FEUP)
Hugo Biscaia (FCT, UNova)	Rui Camposinhos (ISEP)
Hugo Costa (ISEC)	Rui Ferreira (IST)
Hugo Patrício (IP)	Rui Micaelo (FCT, UNova)
Hugo Rodrigues (IPLeiria)	Silvino Capitão (ISEC)
Inês Flores Colen (IST)	Victor Cavaleiro (UBI)
Isabel Torres (FCTUC)	

MODELO DE CÁLCULO AVANÇADO CALIBRADO COM ENSAIO EXPERIMENTAL DE LAJES EM MADEIRA EXPOSTAS AO FOGO

ADVANCED CALCULATION MODEL CALIBRATED WITH EXPERIMENTAL TEST OF WOODEN SLABS EXPOSED TO FIRE

Fonseca, Elza M M; *Instituto Politécnico do Porto, ISEP; LAETA, INEGI, Porto, Portugal, elz@isep.ipp.pt*

Piloto, Paulo A G; *Instituto Politécnico de Bragança, ESTiG, LAETA, INEGI, Bragança, Portugal, ppiloto@ipb.pt*

RESUMO

As lajes em madeira são elementos estruturais com larga aplicação, em particular, na reabilitação de edifícios, espaços interiores e construção de novas estruturas em edifícios. As propriedades mecânicas, térmicas e acústicas fazem deste material uma solução ideal para lajes de pavimentos e coberturas. No entanto, quando expostas a uma ação de acidente tipo fogo é necessário a avaliação do seu comportamento vulnerável com rigor. Neste trabalho, apresenta-se um modelo de cálculo avançado, com base na utilização de elementos finitos, calibrado com os resultados experimentais obtidos. Os ensaios experimentais foram realizados em lajes de madeira expostas a uma frente de fogo por baixo do elemento. As lajes foram instrumentadas com termopares para medição da temperatura em diferentes pontos de controlo ao longo da ação de incêndio num forno de resistência ao fogo, com a utilização da curva de incêndio padrão ISO 834. O modelo de cálculo avançado permite também a obtenção das temperaturas em regime transiente e incorpora as propriedades não-lineares da madeira. O comportamento físico da laje é ainda condicionado pela formação da carbonização, sendo este fenómeno também considerado no modelo de cálculo avançado.

ABSTRACT

The wooden slabs are structural elements with wide application, in particular, in building rehabilitation, interior spaces and in new building structures. The mechanical, thermal and acoustic properties make this material as an ideal solution for floor and roof slabs applications. However, when exposed to an accidental fire condition it is necessary to assess their vulnerable behaviour accurately. In this work, an advanced calculation model is presented, based on the use of finite elements, calibrated with experimental results. The experimental tests were performed on wooden slabs exposed to a fire from below the element. The slabs were instrumented with thermocouples to measure the temperature at different control points along the fire duration in a fire resistance furnace, following the standard fire curve ISO 834. The advanced calculation model also allows the obtained the transient effect and incorporates the non-linear wood properties. The physical behaviour of the wooden slab is conditioned by the char layer formation, and this phenomenon is also considered in the advanced calculation model.

1 - INTRODUCTION

The perforated wooden slabs combine the aesthetics and the acoustic properties, based on design, style, in strength and stability of the element. The wooden slabs or typical wood panels offer a rustic and decorative look to almost all building structures (auditoriums, offices, restaurants, concert halls, schools, hotels, gymnasiums, etc.). The perforations in these panels are available in a large variety of patterns, sizes and finishes.

Considering the behaviour of wood when submitted to a developing fire, wood-based materials will burn and are rated as combustible. Wood material when exposed to fire produces a surrounding charring depth layer, with no mechanical resistance, resulting a reduced cross-section. In perforated cellular wooden slabs, the size of perforations influences the fire effect over the slab and the temperature evolution in the unexposed side. The constructive elements should be design in accordance, to prevent and delay the fire damage effect, allowing that the slab could remain in service for long time. The perforations increase the slab surface exposed to the fire effect, facilitating the penetration of flames and heat flow.

Several researchers have presented experimental and analytical methods to calculate the physical degradation of wood due high temperatures, (White, 1999), (Poon, 2003), (Janssens, 2004). The charring rate of different species when exposed to fire conditions has been examined by others

researchers in different countries, (Schaffer, 1967), (White, 1992), (White, 1992), (Konig and Walleij, 1999), (Gardner and Syme, 1991), (Collier, 1992), (Pun et al., 1997), (Frangi and Fontana, 2003), (Pinto and Junior, 2007), (Frangi et al., 2008), (Cachim and Franssen, 2010), (Fonseca and Barreira, 2009), (Fonseca and Barreira, 2010), (Fonseca and Barreira, 2011), (Fonseca et al., 2012). Also, empirical models for determining the charring rate and the heat transfer conditions were developed by (Schaffer, 1967), (White, 1992).

The main goal of this work is to present an advanced calculation model, calibrated with experimental tests, to predict the time-temperature evolution, during a fire scenario, using a finite element method. Different constructive solutions of wooden slabs, with different sizes of rectangular and circular perforations will be analysed. The influence of the size effect was verified and is determinant to the temperature evolution inside the cellular wooden slabs. This factor has a bigger effect when compared with the geometry shape effect. This study carries out the results according others previous investigations developed by the authors of this work (Fonseca et al., 2013), (David et al., 2015), (Jorge et al., 2015).

2 - EXPERIMENTAL TESTS AND RESULTS

Four wooden slabs with perforations were considered for test and analysis. The spruce specie was used for all the wooden slab. The constructive model considers three different cellular zones (two cells with different perforations and one cell with no perforation). Slab 1 and slab 2 present two types of rectangular perforations with different sizes, R1=250x20 mm in Cell 3 and R2=50x20 mm in Cell 1. Slab 3 and Slab 4 present circular perforations with different diameters, d1=20mm in Cell 3 and d2=10mm in Cell 1. Fig. 1 represents all dimensions used in the constructive solution model, being each slab made by four beams inside with a thickness to 27mm, and an external framework composed by two beams S200x37 and two beams S200x39.

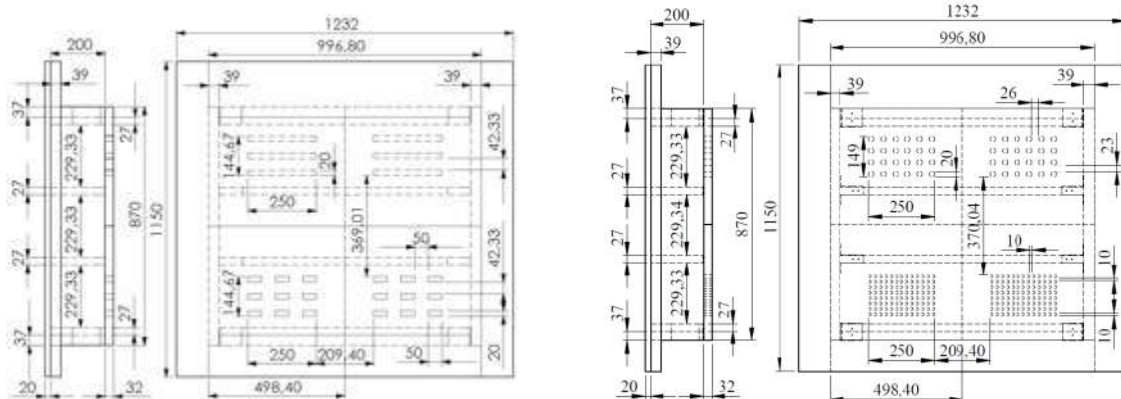


Figure 1 – Geometry of wooden slabs: a) Slab_1_2 rectangular perforations, b) Slab_3_4 circular perforations

The dimension of each perforation is compared between Cell 1 and Cell 3, for each wooden slab, see Table 1. Cell 1 has a similar open space between slabs with rectangular and circular perforations. Cell 3 with circular perforations represents only 50% open space in comparison to the higher rectangular perforations.

Table 1 - Size of the openings in each cell

	SLAB 1 AND 2 (RECTANGULAR PERFORATIONS)	SLAB 3 AND 4 (CIRCULAR PERFORATIONS)
Cell 3, mm ²	30000 (R1)	15072 (d1≅50%R1)
Cell 1, mm ²	18000 (R2≅60%R1)	16328 (d2≅91%R2)
Total, mm ²	48000	31400 (≅65% Slab_1_2)

In the experimental tests, thermocouples were installed to measure the temperature in different locations (ceiling plate, beams and cellular zones) and located in the same positions in all slabs, based on the criteria defined by the European standard (EN 1365-2, 1999), as presented in Fig. 2. Three types of thermocouples were used: single wire for spot measurements, copper discs protected with plasterboard for measuring the temperature in the unexposed side and plate thermocouples for measuring the temperature within the cellular zones. The thermocouples signal acquisition was made with a HBM system (MGC Plus and Spider 8).

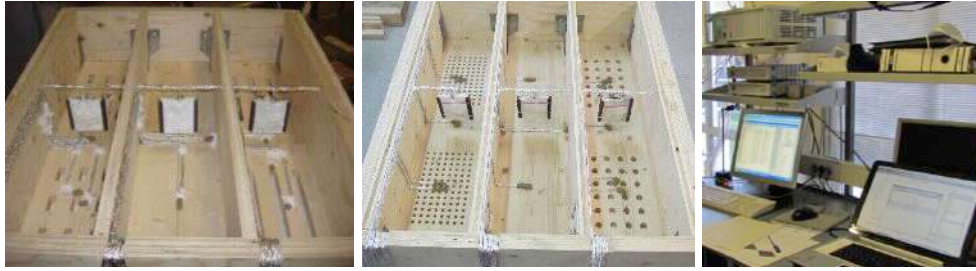


Figure 2 – Thermocouples installation and data acquisition systems

The bottom surface of each slab (perforated side) was submitted to standard fire. The slabs were tested in the fire resistance furnace at the Polytechnic Institute of Bragança, see Fig. 3. This furnace is equipped with 4 burners running with natural gas, with a total power of 360kW, and a working volume of 1m³, prepared to work with any standard fire curve, in particular to the standard fire curve ISO834 (ISO TC 92, 1999).



Figure 3 – Fire resistance furnace in laboratory, before and after the test

At the end of the fire exposure, cells without perforations do not exceeded 100°C, while cells with perforations presented a triple of this value. The temperature measured with plate thermocouples, within the cellular zones, is proportional to the size of the openings. Fig. 4 represents the char layer in all tested slabs. The charring rate was also determined at the end of the test.



Laje_1

Laje_2

Laje_3

Laje_4

Figure 4 – Char layer in all four wooden slabs, after the experimental test

The charring rate of the perforated Cell is almost the double in comparison to the non-perforated cell, which also justifies the temperatures recorded within the cellular cavities of each slab. The temperature evolution in Cell 3, for rectangular perforations (Slab_1_2) enables a faster heating process with higher temperatures compared to the circular perforations (Slab_3_4). The temperature evolution in Cell 1 has similar behaviour independently of the shape of the perforated wooden slabs (circular or rectangular). The shape of perforated zone is not a relevant factor to the temperature evolution inside the cellular slab. For the same time of the fire exposure, Slabs_3_4 have a better behaviour in terms of the char layer formation through the bottom surface, when compared with Slabs_1_2.

3 - NUMERICAL MODEL AND RESULTS

A 3D finite element (Solid70) with 8 nodes was used for thermal and nonlinear transient analysis, using Ansys program. In order to fully satisfy the nonlinear conditions of the numerical problem, an iterative procedure in each time step it is necessary to apply. A modified Newton-Raphson method was adopted to solve the nonlinear problem, and the time interval considered for each step was equal to 10s. Fig. 5 shows the mesh used in all numerical simulations, respectively for each constructive solution.

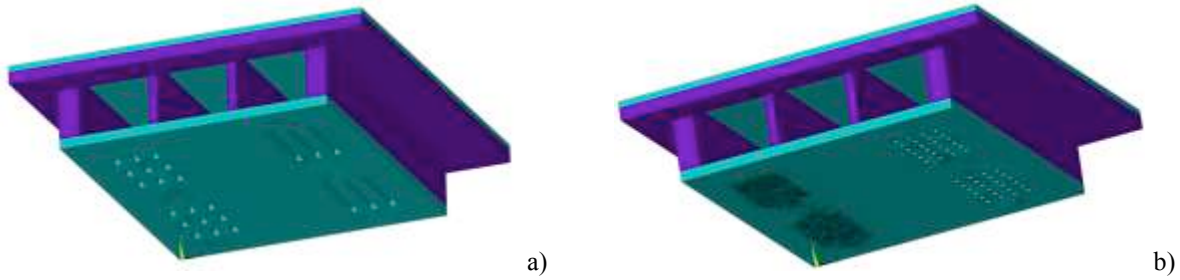


Figure 5 – 3D numerical model for each: a) Slab_1_2, b) Slab_3_4

The bottom surface of the wooden slab was exposed to fire during 900s.

For fire calculation we have used a standard temperature-time curve ISO 834 according Eurocode 1 (EN1991-1-2, 1995) with the following expression and represented in figure 6:

$$T_{\infty} = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (5)$$

where t is the time in minutes min.

The temperature on the boundary (exposed surface and internal cavities) follows real heating curves obtained during experimental tests, measured with plate thermocouples. The convection coefficient is taken equal to $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (EN1991-1-2, 2002) inside cavities and in the exposed surface. At the unexposed surface the room temperature is kept constant and the value of convection coefficient is equal to $9 \text{ W/m}^2\text{K}$. The emissivity of the flames is taken equal to 1.0 for exposed side and internal cavities (EN1991-1-2, 2002).

The non-linearity due to the temperature dependence of the material properties will be considered during the numerical simulation. The thermal properties of wood vary considerably with temperature and was applied according Eurocode 5 (EN1995-1-2, 2003), figure 6.

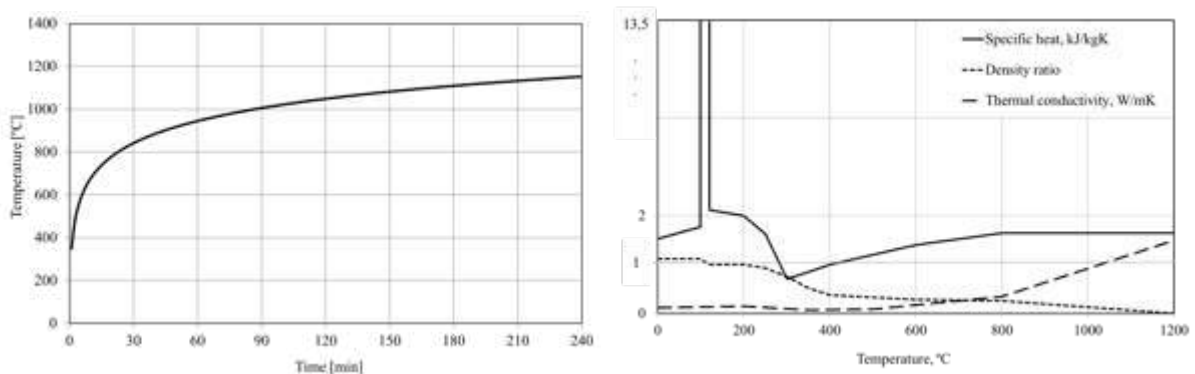


Fig. 6 – Nominal fire curve (ISO 834) and wood thermal properties.

Fig. 7 represents the char layer formation for all numerical models of the slabs at the end of the fire exposure, in grey colour. For the last time step a criterion for determine the carbonized layer is applied, that will be compared with the experimental record obtained in each slab (Fig. 4), allowing to evaluate the residual cross section and the influence of different perforations on the fire resistance.

The assessment of the charred layer allowed to verify that the cavity without perforations presents the lowest values of charring rate (between $0,65 - 0,8 \text{ mm/min}$), being the perforated rectangular layer that reaches higher temperatures values (between $1,0 - 1,4 \text{ mm/min}$). It is possible to confirm that wooden slabs with perforations can limit the use of these constructive elements in terms of fire resistance.

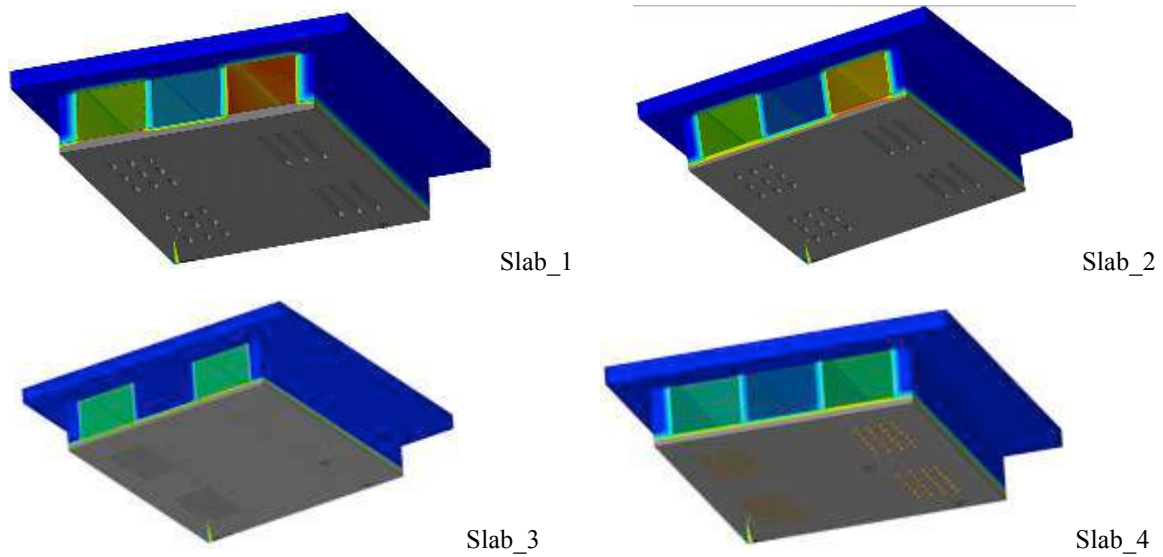


Figure 7 - Char layer in all four wooden slabs with 3D numerical model, $t=900s$.

4 - TEMPERATURE EVOLUTION IN PERFORATED CELLS

The temperature evolution for each wooden slab was compared between the experimental (T_{exp}) and numerical (T_{num}) results. Fig. 8 shows some graphs with the time-temperature history in perforated cells (Cell 1 and Cell 3) for different thermocouples and nodal positions. The numerical results are in agreement with the experimental results.

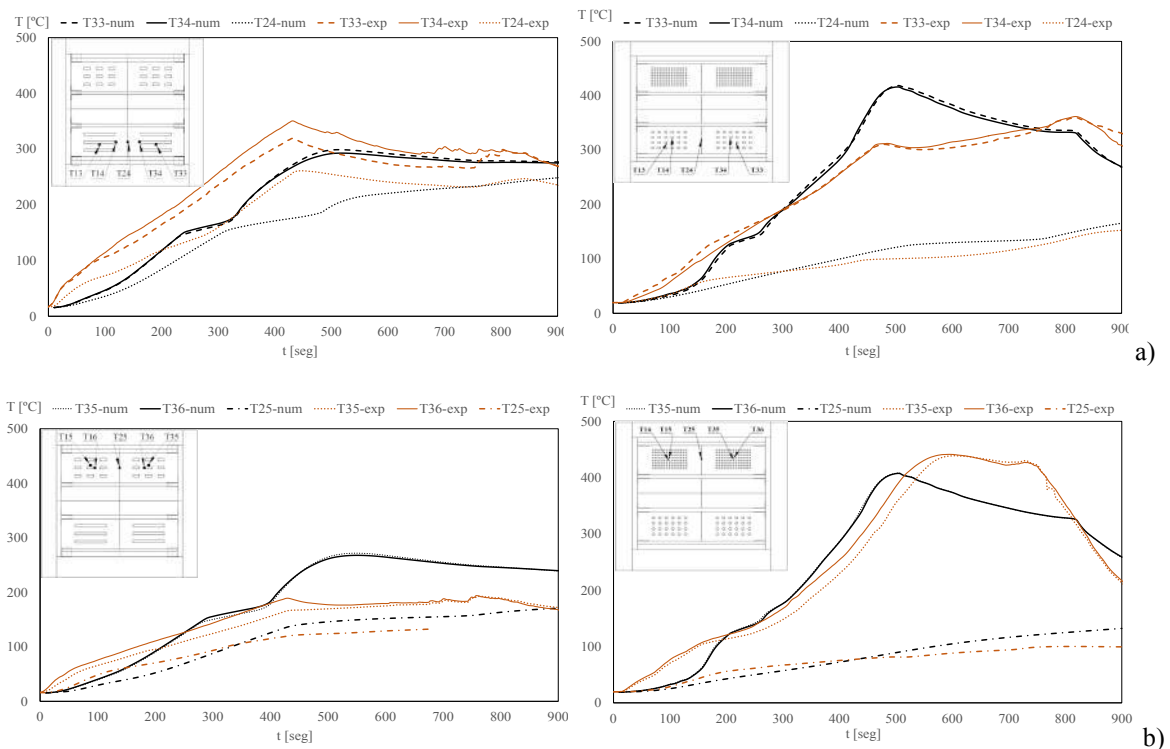


Figure 8 - Time-temperature history for wooden slab (Slab_1_2 and Slab_3_4): a) Cell 3, b) Cell 1

Wood material when exposed to fire presents a thermal physical degradation. The evolution of the temperature inside the cellular zones was characterized and the shape and size of perforations could be compared with the unperforated cell.

In the border of the rectangular slots ($T33=T13$ and $T34=T14$, Cell 3) and circular slots ($T35=T15$ and $T36=T16$, Cell 1) the values of temperatures are higher when compared with all inside nodal positions which remain at lower temperatures ($T24$ and $T25$, Cell 3 and Cell 1, respectively).

Attending to the Table 1, the circular perforations for Cell 1 or Cell 3 have almost the same open space in Slab_3_4, which allows to conclude a similar temperature evolution (T24 and T25) inside the Cell. In Slab 1_2 the temperature inside Cell 3 is higher when compared with Cell 1, which agrees with the calculated open space between R1 and R2. In Cell 3 and Cell 1 the temperature increases until switch off the furnace (450-500s) and decreases after this time.

The results in Cell 2 have similar behaviour in all tested wooden slabs with temperatures below 100°C.

5 - CONCLUSIONS

During the real fire test exposure, the insulation criteria were verified, in both wooden slabs, since the temperature rise on the unexposed surface did not exceed 180°C on any of the disc thermocouples or 140°C in average with respect to the initial average temperature, defined according to the European standard for fire resistance tests (EN 1365-2, 1999). The integrity criteria were also verified during experimental tests using the cotton ignition test, where no flame appearance occurred during the wooden slabs testing (EN 1365-2, 1999). The time-temperature numerical simulation results are in agreement and have the same behaviour with the experimental results. The size effect of the perforation is responsible for the temperature evolution, as expected, and the shape of the perforations has no significant effect, in particular for the tested perforations models.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge to Jular company, who provided all technical support.

REFERENCES

- Cachim, P. B., Franssen, J. M. (2010). Assessment of Eurocode 5 Charring rate Calculation Methods, *Fire Technology*, 46, DOI: 10.1007/s10694-009-0092-x, pp. 169-181.
- CEN EN1365-2- *Fire resistance tests for loadbearing elements. Floors and roofs*, Brussels, 1999.
- CEN EN 1363-1- *Fire resistance tests - General requirements*, Brussels, 1999.
- CEN EN1991-1-2- *Eurocode 1: Actions on Structures- General actions- Actions on Structures Exposed to Fire*, Brussels, 2002.
- CEN EN1991-2-2- *Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures - Actions on Structures - Actions on Structures Exposed to Fire*, Brussels, 1995.
- CEN EN1995-1-2- *Eurocode 5: Design of timber structures- Structural fire design*, Brussels, 2003.
- Collier, P. C. R. (1992). *Charring rates of timber*, Study report, Branz, New Zealand.
- Frangi, A., Erchinger, C., Fontana, M. (2008). Charring model for timber flame floor assemblies with void cavities, *Fire Safety Journal Zurich*, 43:8, DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.12.009, pp. 551-564.
- Frangi, A., Fontana, M. (2003). Charring rates and temperature profiles of wood sections, *Fire Mater*, Zurich, 27:2, DOI: 10.1002/fam.819.
- Fonseca, E. M. M., Barreira, L. M. S. (2009). Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures. WIT Press, 3 Int. Conf. on Safety and Security Eng., 108, pp.449-457.
- Fonseca, E. M. M., Barreira L. (2010). Método experimental para determinação da espessura carbonizada na madeira quando submetida a altas temperaturas, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas RPEE*, 7, pp. 33-40.
- Fonseca, E. M. M., Barreira, L. (2011). Experimental and Numerical Method for Determining Wood Char-Layer at High Temperatures due an Anaerobic Heating, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 1(1), pp. 65-76.
- Fonseca, E. M. M., Coelho, D. C. S., Barreira, L. M. S. (2012). Structural Safety in Wooden Beams under Thermal and Mechanical Loading Conditions, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2:3, pp. 242-255.

- Fonseca, E. M. M., Couto D., Piloto P. A. G. (2013). Fire safety in perforated wooden slabs: a numerical approach, WIT Press, 5 Int. Conf. Safety and Security Eng., 134, DOI: 10.2495/SAFE130511, pp.577-584.
- Fonseca, E. M. M., Barreira, L. M. S., Meireles, J. M., Piloto, P. A. G. (2013). Numerical Model to Assess the Fire Behaviour of Cellular Wood Slabs with Drillings, 4 Int. Conf. on Integrity, Reliability & Failure, S.Gomes et al (Eds.).
- David, C., Elza F., Paulo, P., Jorge, M., Luísa B., Débora, F. (2015). Fire Resistance of Cellular Wooden Slabs with Rectangular and Circular Perforations; 6 Int. Conf. on Mechanics and Materials in Design M2D2015, Azores, pp. 2323-2330.
- David, L. P. C., Elza, M. M. F., Paulo, A. G. P., Jorge, M. M., Luísa, M. S. B., Débora. R. S. M. F. (2016). Perforated cellular wooden slabs under fire: numerical and experimental approaches. Journal of Building Engineering, 8, DOI: 10.1016/j.job.2016.10.007, pp. 218-224.
- Jorge, M., Elza, F., Paulo, P., Débora, F. (2015). Fire Resistance of Wooden Cellular Slabs with Rectangular Perforations, Proceedings of the Int. Fire Safety Symposium 2015, Coimbra, pp. 203-212.
- 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, 28:2-4, DOI: 10.1002/fam.848, pp.199-207.
- Koenig, 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, p.45.
- Pinto, E. M., Junior, C. C. (2007). Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de Eucalyptus de uso estrutural exposta ao fogo, Pesquisa & Tecnologia Minerva, 2:3, pp. 131-140.
- 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, pp.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 Laboratory.
- White, R. H., Dietenberger, M. A. (1999). Fire Safety, Chapter 17, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service.
- White, R. H., Erik, V. N. (1992). Charring rate of wood for ASTM E119 exposure, Fire Technol, 28:1, pp.5-30.

