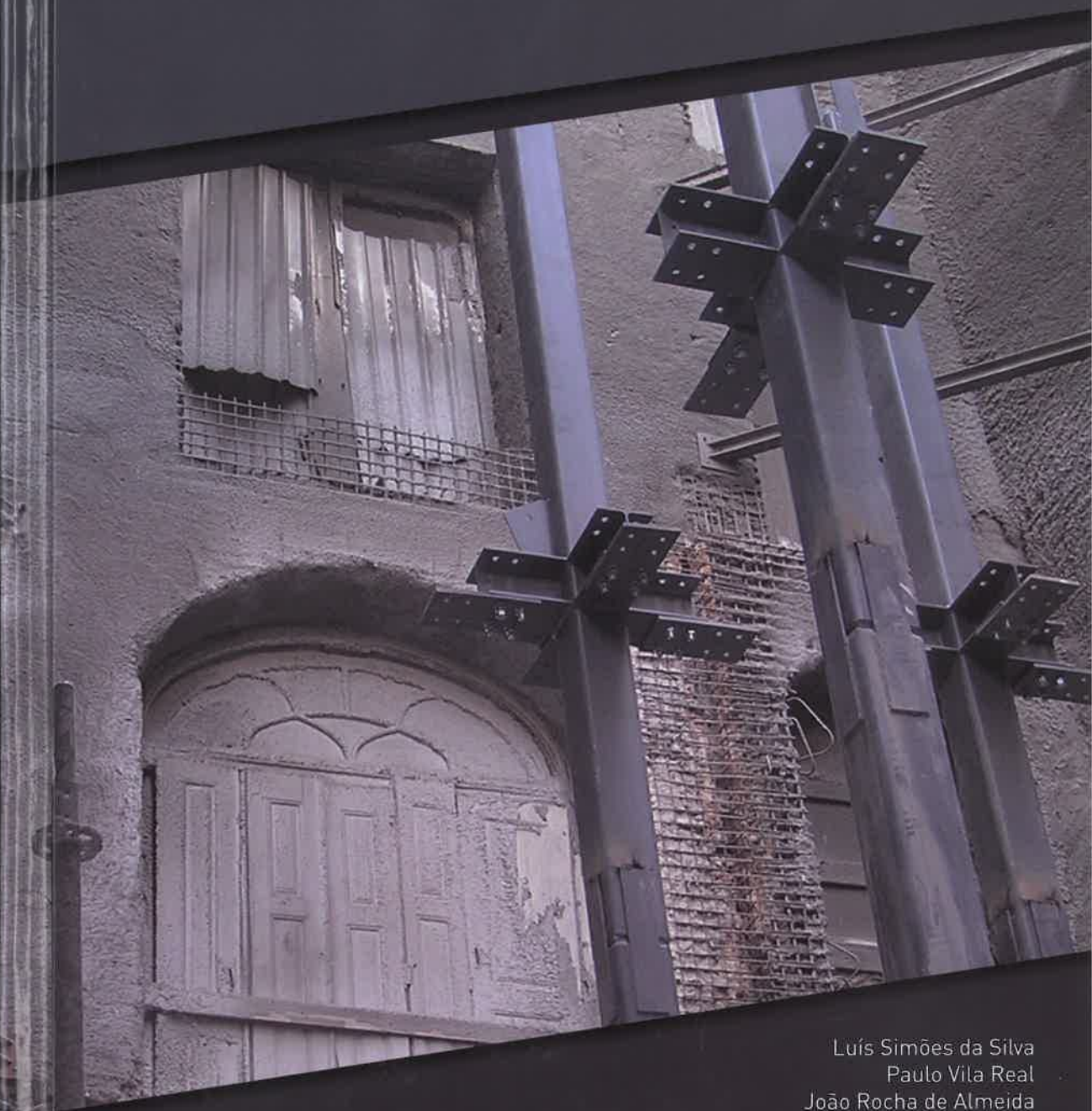


X CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA

TEMA ESPECIAL: REABILITAÇÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO



Luís Simões da Silva
Paulo Vila Real
João Rocha de Almeida
Rodrigo Gonçalves



cmm

ASSOCIAÇÃO
PORTUGUESA
DE CONSTRUÇÃO
METÁLICA E MISTA

Secretariado da CMM

Business Center Leonardo Da Vinci, It.3 iParque,
3040-540 Antanhol, Coimbra, Portugal

cmm@cmm.pt

www.cmm.pt

com o apoio de:



UNIVERSIDADE
NOVA
DE LISBOA



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



Atas do X Congresso de Construção Metálica e Mista

Coimbra
26 e 27 de Novembro de 2015

Luís Simões da Silva

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

Paulo Vila Real

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Aveiro, Coimbra

João Rocha de Almeida

Universidade Nova de Lisboa
Lisboa, Portugal

Rodrigo Gonçalves

Universidade Nova de Lisboa
Lisboa, Portugal

organização: **CMM** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
com a colaboração: **UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**



UNIVERSIDADE
NOVA
DE LISBOA



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

X Congresso de Construção Metálica e Mista

Copyright © 2015

por Luís Simões da Silva, Paulo Vila Real, João Rocha de Almeida, Rodrigo Gonçalves

Editora:

cmm – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

Business Center Leonardo da Vinci

Coimbra iParque Lote 3

3040-540 Coimbra, Portugal

Tel.: +351 239 098 422; Tlm.: +351 965 061 249; Fax: +351 239 091 216

Email: cmm@cmm.pt

Url: www.cmm.pt

1ª Edição: Novembro 2015

Tiragem: 300 exemplares

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Depósito legal: 400856/15

ISBN: 978-989-99226-1-7

Coordenação editorial: Luís Figueiredo Silva

Concepção gráfica da capa: Macasi Artes Gráficas

Formatação de conteúdos e paginação: Joana Filipe Albuquerque

Impressão: Multicom Lda, Mem Martins

Nota da editora

Este texto foi elaborado a partir da reprodução dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

Prefácio

O X Congresso de Construção Metálica e Mista realiza-se num período em que o setor da Construção Metálica portuguesa se afirmou como um motor de inovação e de internacionalização da indústria nacional. Com um volume de negócios superior a €2.500 milhões (2013) e um volume de exportações com crescimento de 30% e 80% da produção, podemos assegurar que presentemente este setor possui uma grande vitalidade, é tecnologicamente avançado e é detentor de uma forte capacidade competitiva internacional.

A CMM mantém, assim, a sua aposta na inovação tecnológica e a competitividade do setor, pretendendo potenciar uma plataforma de conciliação entre todos os atores do setor, em torno de uma estratégia e programa de ação definido para a consolidação do setor, com o foco no mercado global e potenciando o reconhecimento de excelência que detêm, contribuindo de forma decisiva para a afirmação da Construção Metálica Portuguesa a nível mundial, como uma solução construtiva sustentável de alta qualidade e inovadora.

O X Congresso de Construção Metálica e Mista é a maior e mais relevante conferência nacional de construção metálica e mista, com realização bienal e promovido pela CMM, e reúne projetistas, empresas do sector e investigadores, contando com a participação de conferencistas nacionais e internacionais de renome. No seguimento das edições anteriores o X Congresso de Construção Metálica e Mista volta a apostar na promoção do uso de materiais de matriz metálica e mista na construção e assumir uma posição ativa da promoção da inovação no setor da construção metálica a nível nacional e internacional, bem como, difundir as mais recentes inovações no âmbito deste tipo de construção e dar a conhecer as linhas de orientação da investigação neste campo, fomentando o intercâmbio de experiências.

À semelhança das nove edições, o X Congresso de Construção Metálica e Mista será composto por Sessão de Palestras e Sessões Científicas e Técnicas, por Seminários, Workshops e apresentações técnico-comerciais das empresas presentes, bem como uma Exposição Técnica, que conta com várias empresas e entidades relevantes do setor, sendo este um espaço privilegiado para a troca de experiências entre as empresas e os técnicos do setor.

Mantendo a estratégia de internacionalização e a busca de mais e novos mercados, a CMM reconhece a importância que a reabilitação urbana do edificado pode ter nos próximos anos para o setor da construção metálica. Sabemos que um terço dos edifícios portugueses estão degradados e precisam de intervenções de reabilitação urbana.

A décima edição do Congresso de Construção Metálica e Mista, é dedicada ao tema específico de Reabilitação do ambiente construído, evidenciando a importância deste setor. A reabilitação urbana significa que se está a recuperar e reutilizar recursos e equipamentos já construídos, conseguindo em muitos casos recuperar para as cidades zonas históricas já há muito desertificadas. Para as empresas nacionais do setor da construção metálica, esta área de ação permite aumentar o seu negócio no mercado interno da construção tradicional, num período em que a construção e obras públicas novas ainda se mantém com número aquém do espetável.

Luís Simões da Silva
Presidente da CMM e da Comissão Organizadora do
X Congresso de Construção Metálica e Mista

Comissão Organizadora

Luís Simões da Silva, CMM
João Rocha de Almeida, UNL
Rodrigo Gonçalves, UNL

Comissão Científica

Paulo Vila Real, UA
Abílio de Jesus, FEUP
Aldina Santiago, UC
Alfredo Dias, UC
Altino Loureiro, UC
António Adão da Fonseca, FEUP
António Baptista, LNEC
António Matos Silva, MARTIFER SA
António Reis, IST
Carlos Martins, MARTIFER SA
Carlos Poço, O POÇO SA
Carlos Rebelo, UC
Constança Rigueiro, IPCB
Dinar Camotim, IST
Elsa Caetano, FEUP
Filipe Santos, VESAM
Francisco Virtuoso, IST
Helena Gervásio, UC
Humberto Varum, FEUP
Isabel Valente, UM
João Almeida Fernandes, LNEC
João Paulo Rodrigues, UC
João Rocha de Almeida, UNL

José Clemente, REFER
José Miguel Castro, FEUP
Leonor Côrte-Real, HEMPEL
Luís Borges, STRUCTURAME
Luís Bragança, UM
Luís Calado, IST
Luís Cância, J.L. CÂNCIO MARTINS, LDA
Luís Godinho, UC
Luís Simões da Silva, UC
Manuela Salta, LNEC
Manuel Peixoto, FERPINTA
Nuno Lopes, UA
Nuno Silvestre, IST
Paulo Cruz, UM
Paulo Piloto, IPB
Paulo Santos, UC
Rodrigo Gonçalves, UNL
Rui Alves, SOCOMETAL
Rui Simões, UC
Sandra Jordão, UC
Tiago Abecasis, TAL PROJECTO, Lda
Vitor Murtinho, UC

Comissão Executiva

João Rocha de Almeida, UNL
Rodrigo Gonçalves, UNL
Luís Figueiredo Silva, CMM
Ana Simões da Silva, CMM
Joana Albuquerque, CMM
Zínia Antunes, CMM

CMM Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista | **FEUP** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | **IPB** Instituto Politécnico de Bragança | **IPCB** Instituto Politécnico de Castelo Branco | **IST** Instituto Superior Técnico | **LNEC** Laboratório Nacional de Engenharia Civil | **REFER** Rede Ferroviária Nacional | **UA** Universidade de Aveiro | **UC** Universidade de Coimbra | **UM** Universidade do Minho | **UNL** Universidade Nova de Lisboa

Índice

Prefácio	v
Comissões	vii
Patrocínios	ix
Índice	xvii
Índice de Autores	xxv

Conferências

<i>Modular design of high-rise buildings</i>	I-3
R. Mark Lawson Andrew Way	
<i>New strategies in the seismic design of bolted beam-to-column connections</i>	I-11
Gianvittorio Rizzano	
<i>Perigosidade sísmica em Portugal e escolha de registos acelerométricos para análise de estruturas</i>	I-45
Carlos Sousa Oliveira João M. C. Estêvão	
<i>Reabilitação da ponte Hercílio Luz</i>	I-63
Hermes Carvalho	

Comunicações

A Construção em Aço na Indústria Petrolífera, Mineira e na Produção de Energias Renováveis

<i>Avaliação da resistência de uma estrutura offshore fixa ao impacto de um navio</i>	II-5
Constança Rigueiro João N. Ribeiro Aldina Santiago	
<i>Comportamento de painéis curvos reforçados sujeitos a ações de pressão de curta duração</i>	II-15
Tiago Manco João P. Martins Constança Rigueiro Luís S. Silva	
<i>Referencial de Qualidade ISO/TS29001:2010 para a Indústria OIL&GAS, e os requisitos relacionados com tratamentos térmicos de soldaduras – Parte 1</i>	II-25
J. Alexandre Silva	
<i>Referencial de Qualidade ISO/TS29001:2010 para a Indústria OIL&GAS, e os requisitos relacionados com tratamentos térmicos de soldaduras – Parte 2</i>	II-37
J. Alexandre Silva	
<i>Self-installing offshore platform. Concepção e análise de novas soluções de projeto</i>	II-47
João P. Matos José J. O. Pedro	

Arquitetura e Aço

<i>Do xisto ao aço. Reabilitar no interior esquecido</i>	II-59
Inês D. Campos Luís F. A. Bernardo	

Eficiência Energética e Sustentabilidade de Edifícios Metálicos

- A comparison of pedestrian accessibility indicator between different urban assessment methodologies* II-71
Jocelyn E. R. Nieto | Luís S. Silva | Vítor Murtinho | Constança Rigueiro
- An overview of existing methodologies for evaluating sustainability at the urban level* II-81
Jocelyn E. R. Nieto | Luís S. Silva | Vítor Murtinho | Constança Rigueiro
- Avaliação da sustentabilidade de edifícios com estrutura metálica nas fases iniciais de projeto* II-91
Paulo Santos | Helena Gervásio | Luís S. Silva

Execução e Gestão da Qualidade da Construção em Aço

- An update to the survey of failures of bridge falsework systems since 1970* II-103
João André | Robert Baele | António M. Baptista

Grandes Projetos

- Centro de alto rendimento de remo* II-115
António Monteiro | Jorge Lopes
- Contribuição das tensões residuais no comportamento estrutural de arcos tubulares de suspensão de coberturas de grande vão* II-123
Nuno C. Gomes | José J. O. Pedro | Tiago B. Abecasis
- Hotel Valverde em Lisboa. Reformulação e reabilitação* II-133
Nuno Travassos | João Saraiva | Inês A. Almeida | João Appleton

Pontes Metálicas e Mistas

- A monitorização de pontes e edifícios metálicos em África: Desafios e dificuldades* II-143
Pedro Santos | Eduardo Gonçalves | Gualter Martins | Filipe Santos
- Advanced tools for simulating monotonic and cyclic response of beam to column steel joints* II-153
Ashkan Shahbazian | Filippo Gentili | Ricardo Costa | Carlos Rebelo | Luís S. Silva
- Análise dinâmica e verificação à fadiga de pontes rodoviárias mistas (aço-concreto) submetidas ao tráfego de veículos sobre o pavimento irregular* II-161
Guilherme S. Alencar | José Guilherme S. Silva
- Fadiga em ligações tubulares de tabuleiros metálicos e mistos aço-betão* II-171
Cláudio Baptista | José J. O. Pedro | Alain Nussbaumer
- Nova ponte ferroviária sobre o rio Umbeluzi, Moçambique* II-181
Tiago Mendonça | Manuel Almeida | Bruno Rodrigues
- Ponte metálica de Abrantes sobre o rio Tejo* II-191
Tiago Mendonça | Manuel Almeida | Bruno Rodrigues
- Pontes sobre os rios Cuilo, Caluango e Luangue* II-201
Miguel Santos | Ricardo Antunes | Eva Jerónimo | João Robalo
- Processo construtivo do viaduto ao PK36+970 – linha ferroviária Thenia/Tizi-Ouzou, Argélia* II-209
Paulo M. Ramos | Adérito S. Cardoso | Francisco F. Rodrigues

- Projeto de substituição de um viaduto ferroviário urbano para remodelação da malha viária* II-219
 Maria A. Branquinho | Maximiliano Malite
- Tabuleiros de pontes híbridas aço-betão: modelos de dimensionamento das regiões de ligação* II-229
 Pedro M. Esteves | José J. O. Pedro | João F. Almeida
- Tabuleiros mistos aço-betão com solução em bi-viga e viga-caixão aberto para plataformas de grande largura* II-241
 Victor Barata | João Henriques | Fernando Gonçalves
- Viaduto misto de sigües. Conceção, dimensionamento e processo construtivo* II-251
 Francisco M. Mato | Luís Matute | Miguel O. Cornejo | Helder Figueiredo | João A. Fonseca
- Viaduto ao PK17+0 na autoestrada La Chiffa/ Berrouaghia, Argélia* II-261
 Victor Barata | Rui Tavares | Fernando Gonçalves | Pedro Pereira
- Viadutos mistos aço-betão para o corredor brt entre Caju e Deodoro* II-271
 Febin Nanguidás | Miguel Santos | Manuel Pereira | João Robalo

Segurança Estrutural e Desenho de Novos Materiais e Produtos

- A component approach for the cyclic modelling of exposed column base plate joints* II-283
 M. Latour | G. Rizzano
- A review of probabilistic approaches for fatigue* II-293
 J. A. F. O. Correia | A. M. P. De Jesus | A. Fernández Canteli | R. A. B. Calçada
- A simple numerical model to analyse the shear-bond behaviour in steel deck composite slabs* II-303
 José D. R. Jiménez | Antonio M. Concha | Hector C. Bulté | Fernando M. Encina
- Análise de encurvadura de colunas de aço enformado a frio à temperatura ambiente e elevada* II-313
 Hélder D. Craveiro | João P. C. Rodrigues | Luís Laím
- Análise experimental e numérica da conexão aço-betão leve realizada com pernos de cabeça* II-323
 David G. Fernandes | Isabel B. Valente
- Análise numérica e experimental de telha de aço autoportante* II-333
 João R. S. Baptista | Tiago F. R. Lopes | Luís C. Prola | Paulo A. L. Fernandes
- Avaliação experimental de vigas de vidro estrutural pré-esforçadas sujeitas a ação térmica* II-343
 Carla Lopes | Sandra Jordão | Aldina Santiago | Marco Pinho
- Avaliação experimental do comportamento de colunas circulares mistas preenchidas com betão com agregados de borracha reciclada* II-353
 António Silva | Yadong Jiang | José M. Castro | Nuno Silvestre
- Avaliação experimental do comportamento de elementos metálicos de secção variável* II-363
 João Rodrigues | Trayana Tankova | Liliana Marques | João P. Martins | Luís S. Silva
- Avaliação numérica do comportamento de colunas tubulares nas ligações a vigas I com perfis em U invertidos soldados* II-373
 L. Magalhães | C. Rebelo | S. Jordão

- Axial buckling load of partially encased columns under fire – new formulae* II-383
Paulo Piloto | Luís Mesquita | A. B. Ramos- Gavilán | David Almeida
- Cantoneiras de abas desiguais uniformemente comprimidas: estabilidade, pós-encurvadura e resistência última* II-393
Pedro B. Dinis | Dinar Camotim | Todd Helwig
- Caracterização do comportamento cíclico das componentes de ligações viga-coluna com recurso a modelos avançados de elementos finitos* II-403
Hugo R. G. S. Augusto | José M. Castro | Carlos Rebelo | Luís S. Silva
- Caracterização experimental do comportamento cíclico de colunas curtas tubulares mistas aço-betão com agregados de borracha* II-413
António P. C. Duarte | Bruna A. Silva | Nuno Silvestre | Jorge de Brito | Eduardo Júlio
- Colapso distorcional de vigas enformadas a frio sob flexão uniforme: caracterização e dimensionamento* II-423
André D. Martins | Alexandre Landesmann | Dinar Camotim | Pedro B. Dinis
- Comparação de técnicas de modelação de pórticos metálicos em situação sísmica* II-435
Luís Macedo | Miguel Araújo | José M. Castro
- Comportamento à flexão de vigas de aço enformadas a frio com enrijecedores na alma* II-445
Luís Laím | João P. C. Rodrigues | Helder Craveiro
- Comportamento estrutural de vigas híbridas vidro-aço simples e pré-esforçadas* II-455
Filipe Firmo | Sandra Jordão | Luís C. Neves
- Desempenho de pórticos não contraventados sob a ação do fogo natural* II-465
Thiago Silva | Carlos Couto | Paulo V. Real | Nuno Lopes | Martina Carić
Davor Skejic
- Desempenho térmico de paredes com estrutura leve em aço enformado a frio* II-475
Cláudio Martins | Nuno Rosa | Paulo Santos | Luís S. Silva
- Desenvolvimento de ferramenta vocacionada para o dimensionamento de estruturas metálicas de acordo com a NP EN 19993-1-1* II-485
João M. M. Eira | Isabel B. Valente | Miguel M. Pires
- Desenvolvimento de um software para cálculo do comportamento não-linear de T-subjuntos a carregamentos de impacto* II-495
João Ribeiro | Aldina Santiago | Constança Rigueiro
- Desenvolvimento de uma parede em aço enformado a frio para armazenamento de energia térmica* II-505
Nuno Rosa | Cláudio Martins | Paulo Santos | Helena Gervásio | Luís S. Silva
- Desenvolvimentos recentes na modelação de vigas mistas com a teoria generalizada de vigas* II-515
Rodrigo Gonçalves | David Henriques | Dinar Camotim
- Development of a new methodology for the stability design of steel members* II-525
Trayana Tankova | Liliana Marques | Luís S. Silva
- Development of a three-dimensional model for beam-to-column joints under static loading* II-535
Ricardo Costa | Filippo Gentili | Luís S. Silva
- Dimensionamento sísmico otimizado de pórticos metálicos simples* II-545
J. Nogueira | L. Macedo | José M. Castro

<i>Eficiência da geometria das seções em I submetidas a flexão composta</i> António M. Baptista	II-555
<i>Estudo experimental do comportamento de colunas pré-esforçadas de elevada esbelteza</i> Ricardo Breda João P. Martins Ashkan Shahbazian Luís S. Silva	II-565
<i>Estudo experimental e numérico sobre o comportamento de vigas mistas com conector crestbond</i> Ana R. Alves Isabel B. Valente Washington B. Vieira Gustavo S. Veríssimo	II-575
<i>Estudo numérico sobre o reforço de pilares de betão armado com cantoneiras e presilhas metálicas. Análise paramétrica</i> Mariana C. Andrade Júlio G. Roca Isabel B. Valente	II-585
<i>Evolução do processo de fabrico de perfis ocós estruturais soldados face a tendências futuras da construção metálica</i> Bruno Marques Marcos Aguiar	II-595
<i>Influence of the joint modelling strategies on the seismic response of dual-concentrically braced steel frames</i> Filippo Gentili Ashkan Shahbazian Carlos Rebelo Luís S. Silva	II-603
<i>Influência dos troços de concordância na resistência plástica de seções I em flexão composta desviada</i> António M. Baptista	II-613
<i>Intumescent fire protection of cellular beams</i> Luís Mesquita João Gonçalves Gustavo Gonçalves Paulo Piloto Kada Abdelhak	II-623
<i>Ligações aparafusadas entre vigas e pilares de secção tubular</i> Guiomar Vicente Rui Simões Carlos Rebelo Luís S. Silva	II-631
<i>Modelação numérica de vigas composta de alma cheia em aço inoxidável à temperatura normal e em situação de incêndio</i> André Reis Nuno Lopes Esther Real Paulo Vila Real	II-641
<i>Monitorização dinâmica de uma linha elétrica aérea</i> Elsa Caetano Bruno J. A. Costa Daniela Rocha António Cardoso	II-651
<i>Numerical Modeling of cold-formed z purlins fire resistance test</i> Flávio Arrais Nuno Lopes Michal Jandera Ivo Schwarz Paulo Vila Real	II-661
<i>Performance of bridge falsework structures under external hazards</i> João André Robert Baele António M. Baptista	II-671
<i>Protocolo de solicitação cíclica para ensaios de vidro estrutural</i> Carolina Tavares Sandra Jordão Carlos Rebelo Hugo Augusto	II-681
<i>Seismic protection of industrial plants – case study of a gas tank</i> José Henriques Walter Salvatore Hervé Degée	II-691
<i>Seismic response of MRF with friction joints</i> Ana F. H. P. Santos Luís S. Silva Jean-Pierre Jaspard	II-701
<i>Sistema inovador de construção metálica</i> Guiomar Vicente Pedro Andrade Rui Simões Carlos Rebelo Luís S. Silva Milan Veljkovic	II-713
<i>Structural glass design formulations used in an android application</i> Imre Vekov Sandra Jordão Aldina Santiago	II-723

Temperatura crítica de secções transversais de classe 4 II-731
Carlos Couto | Élio Maia | Paulo V. Real | Nuno Lopes

Um elemento finito geometricamente exato para colunas mistas aço-betão II-741
Rodrigo Gonçalves | David Manta

*Validação do método geral para elementos prismáticos em situação de incêndio –
comparação com o programa GeM* II-751
João D. R. Ferreira | Paulo V. Real | Carlos A. S. Couto

*Vulnerabilidade sísmica e perdas sobre a propriedade do parque industrial edificado em
aço para Portugal* II-759
Miguel Araújo | José M. Castro | Mário Marques

Soluções Industrializadas para a Construção de Edifícios

*Benefits of advanced numerical models to design fire resistant frames made out of
cold-formed steel* II-771
Luc Schueremans | Johan De Cock | Ana C. Furtado

Tecnologia de fixação direta Hilti: soluções para a reabilitação II-781
Joana C. S. Almeida

Índice de Autores

- | | | | |
|--------------------|---|----------------------|------------------------|
| A | | | |
| Abdelhak, K. | II-623 | Concha, A. M. | II-303 |
| Abecasis, T. B. | II-123 | Cornejo, M. O. | II-251 |
| Aguiar, M. | II-595 | Correia, J. A. F. O. | II-293 |
| Alencar, G. S. | II-161 | Costa, B. J. A. | II-651 |
| Almeida, D. | II-383 | Costa, R. | II-153, II-535 |
| Almeida, I. A. | II-133 | Couto, C. | II-465, II-731 |
| Almeida, J. C. S. | II-781 | | II-751 |
| Almeida, J. F. | II-229 | Craveiro, H. | II-313, II-445 |
| Almeida, M. | II-181, II-191 | | |
| Alves, A. R. | II-575 | D | |
| Andrade, M. C. | II-585 | De Cock, J. | II-771 |
| Andrade, P. | II-713 | Degée, H. | II-691 |
| André, J. | II-103, II-671 | Dinis, P. B. | II-393, II-423 |
| Antunes, R. | II-201 | Duarte, A. P. C. | II-413 |
| Appleton, J. | II-133 | | |
| Araújo, M. | II-435, II-759 | E | |
| Arrais, F. | II-661 | Eira, J. M. M. | II-485 |
| Augusto, H. | II-403, II-681 | Encina, F. M. | II-303 |
| | | Estêvão, J. M. C. | I-45 |
| | | Esteves, P. M. | II-229 |
| B | | F | |
| Baele, R. | II-103, II-671 | Fernandes, D. G. | II-323 |
| Baptista, A. M. | II-103, II-555, II-613,
II-671 | Fernandes, P. A. L. | II-333 |
| Baptista, C. | II-171 | Ferreira, J. D. R. | II-751 |
| Baptista, J. R. S. | II-333 | Figueiredo, H. | II-251 |
| Barata, V. | II-241, II-261 | Firmo, F. | II-455 |
| Bernardo, L. F. A. | II-59 | Fonseca, J. A. | II-251 |
| Branquinho, M. A. | II-219 | Furtado, A. C. | II-771 |
| Breda, R. | II-565 | | |
| Brito, J. | II-413 | G | |
| Bulté, H. C. | II-303 | Gentili, F. | II-153, II-535, II-603 |
| | | Gervásio, H. | II-91, II-505 |
| C | | Gomes, N. C. | II-123 |
| Caetano, E. | II-651 | Gonçalves, E. | II-143 |
| Calçada, R. A. B. | II-293 | Gonçalves, F. | II-241, II-261 |
| Camotim, D. | II-393, II-423, II-515 | Gonçalves, G. | II-623 |
| Campos, I. D. | II-59 | Gonçalves, J. | II-623 |
| Canteli, A. F. | II-293 | Gonçalves, R. | II-515, II-741 |
| Cardoso, A. | II-651 | | |
| Cardoso, A. S. | II-209 | H | |
| Carić, M. | II-465 | Helwig, T. | II-393 |
| Carvalho, H. | I-63 | Henriques, D. | II-515 |
| Castro, J. M. | II-353, II-403, II-435,
II-545, II-759 | Henriques, J. | II-241 |
| | | Henriques, J. | II-691 |

J			
Jandera, M.	II-661	Nogueira, J.	II-545
Jaspart, J.-P.	II-701	Nussbaumer, A.	II-171
Jerónimo, E.	II-201	Oliveira, C. S.	I-45
Jesus, A. M. P.	II-293		
Jiang, Y.	II-353	P	
Jiménez, J. D. R.	II-303	Pedro, J. O. P.	II-47, II-123, II-171, II-229
Jordão, S.	II-343, II-373, II-455, II-681, II-723	Pereira, M.	II-271
Júlio, E.	II-413	Pereira, P.	II-261
		Piloto, P.	II-383, II-623
L		Pinho, M.	II-343
Laím, L.	II-313, II-445	Pires, M. M.	II-485
Landesmann, A.	II-423	Prola, L. C.	II-333
Latour, M.	II-283		
Lawson, R. M.	I-3	R	
Lopes, C.	II-343	Ramos-Gavilán, A. B.	II-383
Lopes, J.	II-115	Ramos, P. M.	II-209
Lopes, N.	II-465, II-641, II-661, II-731	Real, E.	II-641
Lopes, T. F. R.	II-333	Real, P. V.	II-465, II-641, II-661, II-731, II-751
		Rebelo, C.	II-153, II-373, II-403, II-603, II-631, II-681, II-713
M		Reis, A.	II-641
Macedo, L.	II-435, II-545	Ribeiro, J.	II-5, II-495
Magalhães, L.	II-373	Rigueiro, C.	II-5, II-15, II-71, II-81, II-495
Maia, E.	II-731	Rizzano, G.	I-11, II-283
Malite, M.	II-219	Robalo, J.	II-201, II-271
Manco, T.	II-15	Roca, J. G.	II-585
Manta, D.	II-741	Rocha, D.	II-651
Marques, B.	II-595	Rodrigues, B.	II-181, II-191
Marques, L.	II-363, II-525	Rodrigues, F. F.	II-209
Marques, M.	II-759	Rodrigues, J.	II-363
Martins, A. D.	II-423	Rodrigues, J. P. C.	II-313, II-445
Martins, C.	II-475, II-505	Rosa, N.	II-475, II-505
Martins, G.	II-143		
Martins, J. P.	II-15, II-363, II-565	S	
Mato, F. M.	II-251	Salvatore, W.	II-691
Matos, J. P.	II-47	Santiago, A.	II-5, II-343, II-495, II-723
Matute, L.	II-251	Santos, A. F. H. P.	II-701
Mendonça, T.	II-181, II-191	Santos, F.	II-143
Mesquita, L.	II-383, II-623	Santos, M.	II-201, II-271
Monteiro, A.	II-115	Santos, P.	II-91, II-475, II-505
Murtinho, V.	II-71, II-81	Santos, P.	II-143
		Saraiva, J.	II-133
N		Schueremans, L.	II-771
Nanguidás, F.	II-271		
Neves, L. C.	II-455		
Nieto, J. E. R.	II-71, II-81		

Schwarz, I.	II-661	T	
Shahbazian, A.	II-153, II-565, II-603	Tankova, T.	II-363, II-525
Silva, A.	II-353	Tavares, C.	II-681
Silva, B. A.	II-413	Tavares, R.	II-261
Silva, J. A.	II-25, II-37	Travassos, N.	II-133
Silva, J. G. S.	II-161		
Silva, L. S.	II-15, II-71, II-81, II-91, II-153, II-363, II-403, II-475, II-505, II-525, II-535, II-565, II-603, II-631, II-701, II-713	V	
	II-465	Valente, I. B.	II-323, II-485, II-575, II-585
Silva, T.	II-465	Vekov, I.	II-723
Silvestre, N.	II-353, II-413	Veljkovic, M.	II-713
Simões, R.	II-631, II-713	Veríssimo, G. S.	II-575
Skejic, D.	II-465	Vicente, G.	II-631, II-713
		Vieira, W. B.	II-575
		W	
		Way, A.	I-3



INTUMESCENT FIRE PROTECTION OF CELLULAR BEAMS

Luis Mesquita^{a,*}, João Gonçalves^a, Gustavo Gonçalves^a, Paulo Piloto^a, Kada Abdelhak^b

^a*Polytechnic Institute of Bragança, Portugal*

^b*Faculty of Civil Engineering and Arch., Hassiba Benbouali University of Chlef, Algeria*

Abstract. Cellular beams are structural steel beams that are deeper than normal rolled sections and have holes cut into their webs. As the web post failure may occur before the section reaches the limiting temperature usually an increase in the fire protection may be required for members with web openings in comparison to its equivalent solid section. The aim of this work is to present an experimental study of unloaded solid and cellular beams with circular holes in fire conditions with and without intumescent fire protection. These preliminary tests are the basis for generating an elemental multi-temperature analysis (EMTA) needed to assess cellular beams with intumescent protection as prescribed by the prEN13381-9.

1. Introduction

Cellular beams are widely used in multi-storey buildings, especially to achieve long spans and the same time providing passage for ducts, cables and other technical installations. These beams are steel sections with distributed circular openings that are produced by cutting and welding hot rolled steel sections (Westok method). The split halves are then offset and welded together to form a deeper beam with full circular or hexagonal shaped web openings. A different method, the Fabsec method, consists on cutting circular openings in a steel plate and the cellular beams are fabricated from welding three fabricated steel plates.

A cellular beam is a modern version of the traditional 'castellated' beam. A hot rolled steel section is castellated which results in a beam approximately 40-60% deeper than its solid parent section, [1]. The finished depth, cell diameter and cell spacing are very flexible. A cellular beam can have a bending resistance up to 2.5 times higher than its parent solid section and so improve the cost efficiency of a design. The cutting process and an application of cellular beams in buildings is illustrated in Fig. 1.



Fig. 1: The cutting process of cellular beams. The use of cellular Beams in buildings, [2]

For a beam with web openings at a design degree of utilisation, web post failure may occur before the section reaches the critical temperature of members in bending. This is due to the fact that the temperature of the web-post in a cellular beam increases at a faster rate compared to its equivalent (similar web size) solid beam. If the temperature of the web-post increases faster than expected then the cellular beam failure may occur by local buckling instability of the web-post between the openings or the Vierendeel bending at the opening [3]. In a fire situation the elastic modulus of steel reduces rapidly in comparison to its strength, which results in more rapid reduction of capacities based on buckling than those based on strength. Hence the buckling capacity of web-posts reduces more rapidly with temperature than those based on other failure types. Therefore web-post buckling tends in general to be the critical mode of failure in fire, even for beams with low web slenderness (d/t) ratios, [4].

To avoid this premature collapse, in relation to the behaviour of equivalent solid beams, when a fire protection is used, an increase in the fire protection thickness may be required for members with web openings.

Traditionally the design guidance “Fire Protection for Structural Steel in Buildings” from the Association for Specialist Fire Protection (ASFP), known as the ‘Yellow Book’, until its 3rd edition from the [5] indicates that a 20% increase in thickness of passive fire protection material should be used for members with web openings (the 20% being 20% increase in thickness from that required for the solid section). This 20% rule is for passive fire protection thickness, and has therefore been widely used for intumescent coating thickness (DFT) on cellular beams as their use has increased.

The fire resistance design of cellular beams was controversial in last decade, with most of the debate being concerned with their requirements for intumescent protection. The mentioned empirical prescriptive “rule” was subjected to criticism on the basis of the fire resistance test results on beams coated with intumescent products [6]. In fact, work by the Steel Construction Institute (SCI) showed that there are many other parameters that need to be taken into account when calculating the increase in the thickness required to protect these beams. The SCI issued a temporary guidance (RT 983) which gave some conservative advice until further tests could be carried out. A simplified document AD 269 was issued about the same time giving a more general method of calculating the increased DFTs. The cellular beams parameters used in AD 269 were: the ratio of Span/depth, distance between holes and its diameter (S/d_o), the web-post width, the web high to thickness ratio and the degree of utilization at cold design, [7].

From the fact that different intumescent coatings behaved differently, a testing procedure was developed to allow coatings manufactures to test their products on a set of specified cellular beams, [8]. This methodology required that one loaded cellular beam and four short unloaded cellular beams were testes. From the tests, the temperatures of the web posts and bot-

tom flanges were measured and the ratios of web post temperature to bottom flange temperature calculated for each web post width. This data allows to draw a regression line of the ratios in function of web post widths and the failure temperature is converted to the required protection thickness using the multi-temperature loading tables defined for different fire resistant times and sections factors of the beam taken as 1400 divided by the web thickness.

After a great effort from the coatings manufactures to produce the DFT tables for cellular beams, and with the used of beams with rectangular and elongated holes, a more general protocol (engineering based) was established valid for rectangular and oval holes. This does not require the loaded beam to be tested and the major difference is that the web post temperatures are compared to the temperature of a plain web, instead of the bottom flange, [9]. This assessment procedure was also on the basis for the establishment of the European standard prEN13381-9 [10].

2. Assessment of cellular beams protected with intumescent coatings

The questions raised about the temperature of the web post being higher than a similar solid beam motivated the need of further experimental fire tests. These were mainly conducted by the coatings manufactures due to their necessity to supply their own loading tables, and its results were kept confidential.

The published work of Bailey about experimental fire resistance tests of unloaded solid and cellular beams showed that on beams without fire protection the flange and web post temperatures of the cellular beams were slightly lower than the corresponding temperatures of the solid beams [11]. The author justifies that this behaviour can be due to the influence of the flow of hot gases in the furnace.

Also the same author perform a set of fire resistance tests on unloaded solid and cellular beams, with circular holes, protected with intumescent paint. The results comparison shows that, in all the tests, the temperatures in the web post and flange temperatures were higher in the cellular beam than the corresponding temperatures of the equivalent solid beams. The author justifies this difference due to intumescence shrinkage around the circular hole perimeter, but he also refers the lack of protection within the holes, consistent with a deficient coating [12]. The results show that the difference between the web post and bottom flange temperatures depends on type and thickness of the intumescent fire protection.

It is recognised that the intumescent fire protection thickness required to provide a given fire resistance to a cellular beam depends on its web thickness, the hole shape and dimensions, the width of the web post, the degree of the beam asymmetry and the structural utilisation factor, as well as the protection efficiency of the intumescent coating, [8].

The assessment method of cellular beams protected with intumescent coatings needs a multi-temperature analysis (MTA) of the coating assessment on solid beams, for each fire protection period, performed accordingly to EN 13381-8 [13]. The solid beam assessment provide a DFT baseline against which a suitable enhancement for cellular beams is added. Each fire test is carried out using five cellular beam sections, which enables a range of web post widths and section factors to be evaluated, instrumented with thermocouples around the holes, web post and bottom flange, as standardized in prEN 13381-9 [10]. The sections must be fabricated with welded plates to ensure a constant thickness, and a different set of standard cellular sections are specified for 60, 90 and 120 minutes fire resistance assessment.

3. Test Programme

The set of experimental tests performed at the Polytechnic Institute of Bragança to evaluate the behaviour of solid and cellular beams with and without fire protection is the presented in Table 1. The table shows the set of performed experimental tests considering solid beams with and

without intumescent protection and also cellular beams with and without intumescent fire protection. The aim was to consider for all tested beams the same nominal intumescent DFT, equal to 1000 [μm], but as can be seen in the table the coating of the test P4 has resulted in a little higher DFT. A water based intumescent coating supplied by International Coatings was used. Also were studied different combinations of the hole diameter and web post widths.

All the sections are made from hot rolled IPE220 steel profiles with 600 [mm] length and in case of the cellular sections the circular holes cutted directly from the web, resulting in a section with the same high, as represented in the Fig. 2.

Table 1: Geometries and properties of the tested beams

Ref.	Beam type	DFT [μm]	Hole Diameter [mm]	Web post [mm]	W/D
P1	Solid	-	-	-	-
P3	Solid	1047,3	-	-	-
P4	Solid	1187,5	-	-	-
P5	Cellular	-	120	60	0.5
P9	Cellular	-	120	75	0.625
P12	Cellular	-	160	80	0.5
P13	Cellular	993,7	160	80	0.5
P15	Cellular	-	160	100	0.625
P16	Cellular	943	160	100	0.625

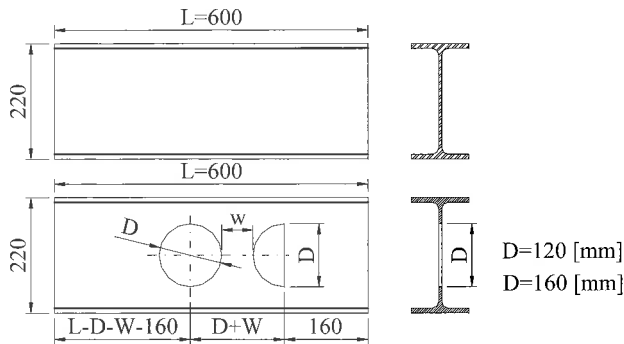


Fig. 2: Dimensions of the tested solid and cellular beams

4. Experimental setup and element instrumentation

The fire resistance tests were performed on a fire furnace with interior dimensions of 1x1x1 [m^3], insulated with refractory bricks and ceramic fibber. It is a gas furnace with four gas burners in which the temperature evolution follows the specifications of the standard EN1363-1 (CEN, 1999) and is controlled by a plate thermocouple.

For the analysis of the steel temperature evolution several thermocouples type K were used as recommended by the standard prEN13381-9 [10], positioned and numbered as shown in Fig. 3. Two types of type K thermocouples were used. For the case of unprotected beams the thermocouples wires were welded to the steel surface, but for the sections with fire protection, the thermocouples were installed after coating the steel member and mineral insulated thermocouples with Inconel sheath were used by means of a drilled hole of 1.5 [mm]. By this

procedure it was wanted to minimize the influence of the thermocouple wires on the coating expansion and therefore on the fire protection efficiency.

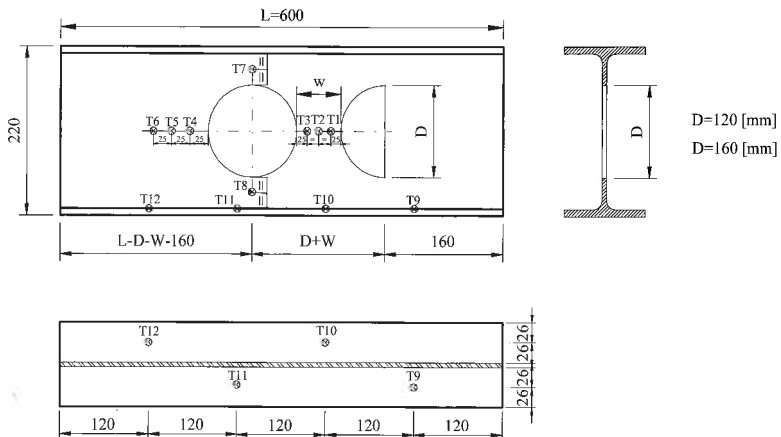


Fig. 3: Position and numbering of the thermocouples

The protected and unprotected sections were placed with the top flange fixed to the furnace roof and with a ceramic mat layer of 50 [mm] in-between, simulating in all the cases a fire exposure by three sides. Also the beams ends were also insulated by an equivalent ceramic mat to avoid the heat transfer from the ends, as can be seen in Fig. 4 and Fig. 5, for unprotected and protected beams, respectively.



Fig. 4: Tests P12 and P15 before and after the test



Fig. 5: Tests P4 and P3 before and after the test

5. Temperature results of protected and unprotected sections

The steel temperature evolution of the tests were measured by the attached thermocouples. The flange temperature is determined by the thermocouples T9 to T12 and the web post temperatures by the thermocouples T1, T2 and T3. The data obtained from T7 and T8 can be used to verify the non-uniform temperature distribution across the section due to the three side fire exposure. During the test some of the thermocouple temperatures presented some unrealistic fluctuations, possibly due to an intermittent contact to steel and as a consequence were disregarded from the following graphs and analysis.

The temperature results from the unprotected solid and cellular beams are presented in Fig. 6.

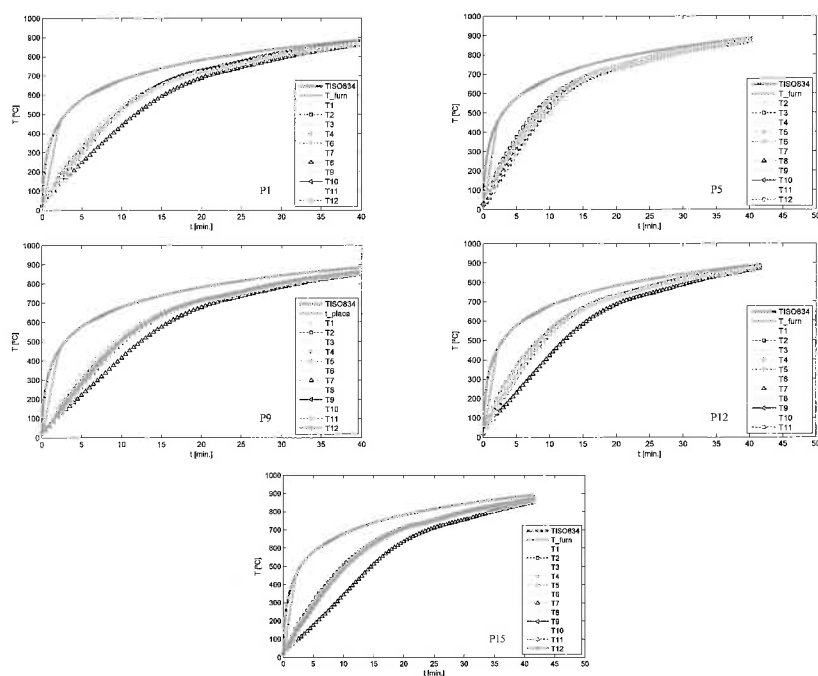


Fig. 6: Temperature evolution results of unprotected solid and cellular beams

Considering for comparison the results of the tests P1 and P9, a solid and a cellular beam tested simultaneously, one can compare the evolution of the mean temperature of the web post temperature (WT) and the mean flange temperature (FT), presented in Fig. 7. In both elements, the temperature of the cellular beams is smaller than its equivalent solid beam.

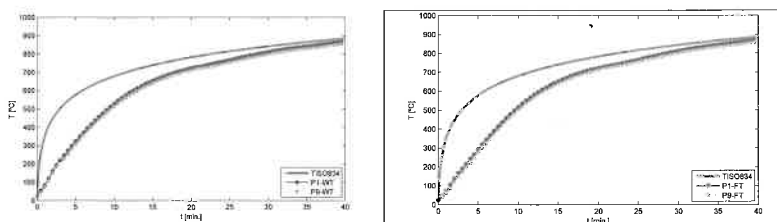


Fig. 7: Evolution of the mean temperature registered on the web post and flanges of test P1 and P9

For the case of solid (P3 and P4) and cellular beams (P13 and P16) tested with intumescent fire protection, the temperature evolution is presented in the Fig. 8. The curves present an higher non-uniformity of the temperature in the elements, when compared to the unprotected beams.

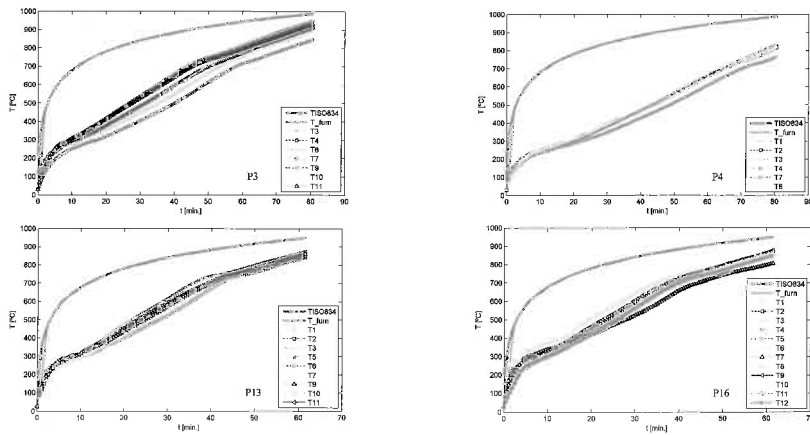


Fig. 8: Temperature evolution results of intumescent protected solid and cellular beams

Considering the global mean temperature of the beams, the time to reach a temperature of 550 [°C] is 36 and 49 minutes for the solid beams P3 and P4, respectively, but for the cellular beams P13 and P16 the time decreases significantly to 28 minutes in both beams.

The intumescent coating expansion of the cellular beams P13 and P16, protected with a DFT of intumescent coating close to 1000 [μm], measured at the web post and after the test end was equal to 30 [mm]. The expansion measured at the web of the solid beams P3 and P4, with a DFT equal to 1047 [μm] and 1187 [μm], respectively, was significantly higher, resulting in 85 [mm] and 75 [mm], respectively. The intumescent char expansion of both beams is shown in Fig. 9.

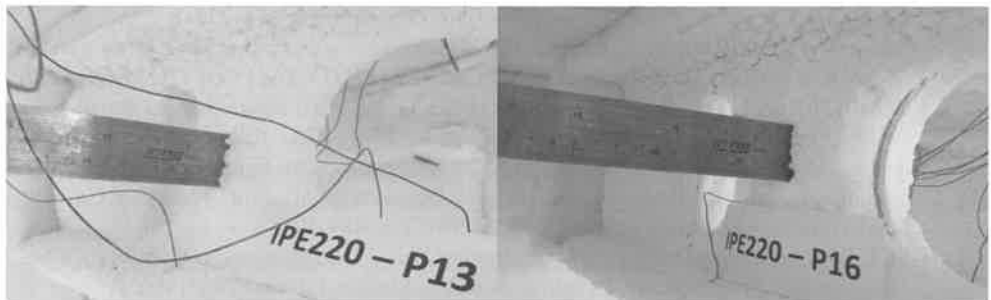


Fig. 9: Intumescent coating expansion of test P13 (left) and P16 (right) after test

6. Conclusions

This work presents the results of a set of experimental tests on protected and unprotected solid and cellular beams subjected to a fire exposure on three sides. The parametric analysis allows comparing the performance of an intumescent coating as a fire protection material using beams with and without intumescent protection. Additionally, it is also studied the effect of intumescent thickness, the hole diameter and the web post width in the case of cellular beams.

The experimental tests are carried out with reference to the standards EN13381-8 for solid beams protected with intumescent paint and prEN13381-9 for the analysis of cellular beams protected with intumescent paint.

The experimental temperature results show intumescent coating efficiency when applied to solid beams and also for cellular beams, resulting from its application an increase fire the re-

sistance time in both cases. Considering for example the time required for the steel to reach 550 [°C], with the application of a nominal thickness of 1000 [µm], an increase of the fire resistance time of 25 minutes is achieved for solid beams, while for cellular beams with a hole diameter of 160[mm] the increase is equal to 17 minutes.

Tests performed in cellular beams with web posts of 80 and 100[mm] does not show any significant temperature difference neither in relation to the fire resistance time. For both beams, when is applied a nominal DFT equal to 1000 [µm], the temperature of 550 [°C] is achieved after 28 minutes. For longer fire exposure periods a slight difference can be already verified.

For the case of a cellular beam with intumescent coating, test P16, a small contraction of the intumescent char around the circular hole, leaving a small area of steel directly exposed to fire.

This study is being extended to a wider parametric analysis considering different cellular beams geometries and intumescent coatings thicknesses to allow for a general elemental multi-temperature analysis (EMTA).

Acknowledgments

The author acknowledge the support from the coating manufacture International Coatings/AkzoNobel.

References

- [1] Pachpor, P.D., et al., *Finite Element Analysis and Comparison of Castellated and Cellular Beam*. Advanced Materials Research, 2011. **264-265**: p. 694-699.
- [2] TATASteel and BCSA, *Steel Construction Fire Protection*, ed. B.A. Barrett. 2013.
- [3] Wang, P., et al., *Web-post buckling of fully and partially protected cellular steel beams at elevated temperatures in a fire*. Thin-Walled Structures, 2015.
- [4] Wong, V.Y.B., I.W. Burgess, and R.J. Plank, *Behaviour of composite floor beam with web openings at high temperatures*, in *SDSS'Rio 2010 STABILITY AND DUCTILITY OF STEEL STRUCTURES*, P.V. E. Batista, L. de Lima (Eds.), Editor. 2010: Rio de Janeiro, Brazil, .
- [5] ASFP, *Fire Protection for Structural Steel in Buildings (The Yellow Book), 3th Edition revised Jan 2004*. 3th Edition ed. 2004: ASFP - Association for Specialist Fire Protection.
- [6] Nadjai, A., et al., *Performance of cellular composite floor beams at elevated temperatures*. Fire Safety Journal, 2007. **42**(6-7): p. 489-497.
- [7] SCI, *Structural Fire Design: Off-site Applied Thin Film Intumescent Coatings (Second Edition)*, L.C. Newman, J.J. Dowling, and W.I. Simms, Editors. 2005: Ascot.
- [8] ASFP, *Fire Protection for Structural Steel in Buildings (The Yellow Book), 4th Edition revised 24 Aug 2010*. 2010: ASFP - Association for Specialist Fire Protection.
- [9] ASFP, *Fire Protection for Structural Steel in Buildings (The Yellow Book), 5th Edition revised Jan 2014*. 2014: ASFP - Association for Specialist Fire Protection.
- [10] CEN, *prEN 13381-9: Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 9: Contribution of fire resistance to steel beams with web opening*. 2013, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- [11] Bailey, C., *Indicative fire test on a cellular and solid web steel beam*. 2003, Manchester Centre for Civil and Constructional Engineering: Manchester
- [12] Bailey, C., *Indicative fire tests to investigate the behaviour of cellular beams protected with intumescent coatings*. FIRE SAFETY JOURNAL, 2004: p. 689-709.
- [13] CEN, *EN13381-8 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 8: Applied reactive protection to steel members*. 2010, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.