



cmm

VIII CONGRESSO DE
**Construção
Metálica
e Mista**

Luis Simões da Silva, CMM
Paulo Cruz, UM
Nuno Lopes, UA
J. Almeida Fernandes, LNEC
António Batista, LNEC

com o apoio de



Universidade do Minho



VIII CONGRESSO DE
**Construção
Metálica e Mista**

Actas do VIII Congresso de Construção Metálica e Mista

Centro Cultural Vila Flor
24 e 25 de Novembro de 2011

Luís Simões da Silva

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

Paulo Cruz

Universidade do Minho
Guimarães, Portugal

Nuno Lopes

Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal

J. Almeida Fernandes

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal

António Baptista

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal

organização: **CMM** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
com a colaboração: **UNIVERSIDADE DO MINHO**



Universidade do Minho

VIII Congresso de Construção Metálica e Mista

Copyright © 2011

por Luís Simões da Silva, Paulo Cruz, Nuno Lopes, J. Almeida Fernandes, António Baptista

Editora:

cmm – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra
Polo II – Rua Luís Reis Santos
3030-788 Coimbra, Portugal
Tel.: +351 239 098 422; Tlm.: +351 965 061 249; Fax: +351 239 405 722
Email: cmm@cmm.pt
Url: www.cmm.pt

1ª Edição: Novembro 2011

Tiragem: 350 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: 335945/11
ISBN: 978-989-95605-2-9

Coordenação editorial: Luís Figueiredo Silva
Concepção gráfica da capa: 3LM / Rui Veríssimo
Formatação de conteúdos e paginação: Joana Filipe Albuquerque
Impressão: Multicomp 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.

Índice

Comissões	xv
Prefácio	xvii
Patrocínios	xix

Conferências

<i>Cold-Formed Steel Structures in Seismic Area: Research and Applications</i> Raffaele Landolfo	I-3
<i>Composite Steel-Glass Fins for the Lobby Façade of Iberdrola Tower</i> Francesc Arbós Bellapart	I-23
<i>Construção Metálica: Novas Fronteiras</i> António Reis	I-37
<i>Best Use of Eurocode 3 for Member Design in Frame-Structures</i> Richard Greiner	I-47

Comunicações

Arquitetura e aço

<i>As Casas para os Trópicos em Niamey e Brazzaville como Respostas aos Problemas Habitacionais dos Anos 40 e 50 do séc. XX</i> Tiago A. V. Nunes V. Murtinho Luis Simões da Silva	II-5
<i>Concepção, Dimensionamento e Construção de uma Cobertura Ligeira: Um Exemplo de "Stressed Skin Design"</i> Pedro Morujão Tiago Alves André Domingues	II-15
<i>Customização em Massa de Habitação: Questões e Enquadramento para um Desenvolvimento Prático com Recurso a Aço Enformado a Frio</i> António L. Correia Vitor Murtinho Luis Simões da Silva	II-25
<i>Estruturas Metálicas e Mistas - Opção Sustentável e Coerente na Reabilitação do Edifício Tradicional</i> Pedro M. F. S. Sousa	II-35
<i>Estudio sobre Viviendas Sociales en Zonas Asiladas con Solución de Estructura Metálica</i> Matilde M. Cobo Juan J. J. C. Fonfría Juan D. C. Álvarez	II-45
<i>Reabilitação da Estrutura da Estufa Fria</i> Tomás Nunes da Silva João Appleton Vasco Appleton	II-55
<i>Sistematização Conceptual para o Desenvolvimento de Soluções Construtivas Habitacionais Mutáveis com o Recurso ao Uso Intensivo de Aço</i> Helder J.V. Ferreira Vitor Murtinho Luis Simões da Silva	II-63

Comportamento de estruturas em situação de incêndio

- Análise Experimental do Comportamento ao Fogo de Pilares Mistos de Aço e Betão* II-77
 António M. Correia | Tiago A. C. Pires | João Paulo C. Rodrigues
- Cálculo das Deformações Globais de Secções Rectangulares de Aço em Regime Elastoplástico* II-87
 António Manuel Baptista
- Estudo Paramétrico do Comportamento de Pilares de Aço Sujeitos a Incêndio* II-97
 António M. Correia | João Paulo C. Rodrigues
- Metodologia de Dimensionamento de Parques de Estacionamento Abertos Mistos Aço-Betão em Situação de Incêndio* II-107
 Cécile Harenza | Aldina M. C. Santiago | Luís A. P. Simões da Silva
- Modelação Numérica da Resistência ao Fogo de Vigas em Aço Enformadas a Frio* II-119
 Nuno F. F. S. B. Lopes | Joana R. G. Pinho | Paulo M. M. Vila Real
- Nomogramas Para o Cálculo Expedido da Temperatura de Elementos Estruturais de Alumínio Sujeitos à Acção do Fogo de Acordo com o Eurocódigo 9* II-129
 Joaquim Pinho-da-Cruz | Paulo M. M. Vila Real | Nuno Lopes
- Performance of Partially Encased Beams at Elevated and Room Temperature* II-139
 Paulo A. G. Piloto | Ana B. R. Gavilán | Luis M. R. Mesquita
- Resistência ao Fogo de Vigas Protegidas com Tinta Intumescente: Estudo Experimental* II-149
 Luís M. R. Mesquita | Paulo A.G. Piloto | Sérgio Roque | Mário A. P. Vaz
- Utilização do Software Elefir-EN na Verificação da Resistência ao Fogo de Parques de Estacionamento Sujeitos a Incêndios Localizados Simultâneos* II-159
 Paulo Vila Real | Carlos Couto | Nuno Lopes
- Verificação da Resistência ao Fogo de Elementos Estruturais de Alumínio em Situação de Incêndio de Acordo com o Eurocódigo 9* II-169
 Joaquim Pinho-da-Cruz | Paulo M. M. Vila Real | Nuno Lopes
- Verificação da Segurança de Colunas de Pórticos Metálicos em Situação de Incêndio* II-179
 Carlos Couto | Paulo Vila Real | Nuno Lopes | João Paulo Rodrigues

Comportamento de ligações estruturais

- Avaliação da Resistência à Fadiga de Ligações por Atrito em Aço Estrutural de Alta Resistência S690* II-191
 Bruno F. C. Fontoura | Rui Matos | Abílio M.P. de Jesus | Carlos Rebelo | Luís S. da Silva | Milan Veljkovic
- Dimensionamento e Comportamento Sísmico de Pórticos Metálicos Semi-Rígidos Contraventados* II-201
 António Guedes | Luís Macedo | José Miguel Castro
- Innovative Beam-to-Wall Joints in Steel-Concrete Structural Solutions* II-211
 José A. G. Henriques | Luís A. P. Simões da Silva | Ana Ozbolt | Ulrike Kuhlmann

- Modelo Numérico de Ligação entre Viga Mista e Paredede de Betão Armado: Calibração e Estudo Paramétrico* II-221
José A. G. Henriques | Luís A. P. Simões da Silva | Isabel B. Valente
- Eficiência energética e sustentabilidade de edifícios metálicos**
- Al Bahr Towers* II-235
Paulo Machado
- Avaliação do Comportamento da Componente de uma Ligação com "U" Invertido a Temperaturas Elevadas* II-245
Fernanda R. C. Lopes | David M. M. Rei | Daniel A. B. de Sousa | Alberto B. S. Simões | Aldina M. C. Santiago | Luís A. Simões da Silva | Sandra F. S. Jordão | Rui A. D. Simões | José G.S. da Silva
- Construção Metálica Modular e Eco-Eficiente* II-255
Helena Gervásio | Joaquim Rodrigues | Paulo Santos | Marcelo Duarte | Luís Simões da Silva | Gilberto Vaz
- Ventilação e Eficiência Energética em Edifícios Residenciais com Estrutura em Aço – Caso de Estudo* II-265
Ana Craveiro | Paulo Santos | António Gameiro Lopes | Luís Simões da Silva
- Estabilidade e comportamento estrutural**
- Análise dos Critérios de Desempenho de Pórticos com Contraventamento Centrado* II-277
Andre Tenchini | Carlos Rebelo | Luciano Lima | Luis da Silva | Miguel Serra | Raffaele Landolfo | Mario D'aniello
- Análise Experimental de um Sistema Metálico de Fixação de Fachadas Agrafadas* II-287
Paulo J. S. Cruz | Paulo L. L. Carvalho | Conceição Casal | Eurico Silva
- Análise Fisicamente Não-Linear de Vigas Metálicas no Contexto da GBT* II-295
Miguel Abambres | Dinar Camotim | Nuno Silvestre
- Análise Numérica do Comportamento Estrutural de Vigas em Aço Enformado a Frio* II-305
Luís Laím | João Paulo C. Rodrigues
- Avaliação Experimental do Comportamento Estrutural de Vigas em Aço Enformado a Frio* II-315
Luís Laím | João Paulo C. Rodrigues
- Caracterização dos Cenário de Impacto em Estruturas de Aço* II-325
Pedro M. R. Barata | M. Constança S. Rigueiro | Aldina M. C. Santiago | João P. C. Rodrigues
- Comportamento Estrutural e Dimensionamento de Cantoneiras Comprimidas* II-335
Pedro B. Dinis | Dinar Camotim | Nuno Silvestre
- Dimensionamento de Vigas Contínuas de Aço Enformadas a Frio* II-345
Cilmar Basaglia | Dinar Camotim
- Distorção em Caixões Mistos. Noções Gerais e Aplicação a um Caso Prático* II-355
Ricardo J. Afecto | José O. Pedro | António J. Reis

- Efeito da Geometria na Resistência de Painéis Curvos em Aço* II-365
João Pedro Martins | Luís Simões da Silva | António J. Reis
- Estabilidade de Madres de Aço Enformadas a Frio Considerando a Interação com as Chapas de Cobertura* II-373
André Graça | Cilmar Basaglia | Rodrigo Gonçalves | Dinar Camotim
- Estrutura e Revestimento Envidraçado da Estação Baixa do Teleférico de Gaia* II-383
Miguel M. Guimarães | Ricardo M. Pereira
- Fatigue Behaviour of Welded Tubular Joints* II-395
Luis Borges | Alain Nussbaumer
- Influência de Elementos de Contraventamento na Estabilidade de Pórticos* II-405
Miguel Sarmento Peres | João Rocha de Almeida
- Mitigação de Vibrações Devidas ao Vento numa Chaminé Metálica* II-417
Gustavo Oliveira | Elsa Caetano | Álvaro Cunha | Fernando Bastos
- Resistência de Secções Rectangulares de Aço Totalmente Plastificadas Submetidas a Flexão Desviada e Esforço Normal* II-427
António Manuel Baptista
- Rumo à Aplicação do Método da Resistência Directa no Dimensionamento de Vigas ao Esmagamento de Alma* II-437
Pedro Natário | Nuno Silvestre | Dinar Camotim
- Sobre a Utilização de Vigas Metálicas Híbridas* II-447
Luís Salvador | António Reis
- Sobre o Comportamento Estrutural de Barras de Aço Comprimidas Formadas por Dupla Cantoneira* II-455
Wanderson Fernando Maia | Luiz C. M. Vieira Junior | Jorge Munaiar Neto | Maximiliano Malite | Benjamin William Schafer
- Técnicas de Medição Experimental: Avaliação por Contacto vs Avaliação Remota* II-467
D. Rei | S. Jordão | L. Simões da Silva | R. Simões
- Verificação da Encurvadura Lateral de Vigas de Secção Variável* II-477
Liliana Marques | Luís Simões da Silva | Richard Greiner | Carlos Rebelo

Estruturas Mistas

- Avaliação Probabilística do Comportamento até à Rotura de Estruturas: Aplicação a Vigas Mistas* II-489
José C. Matos | Maria I. B. Valente | Luís C. Neves | Paulo J. S. Cruz
- Encurvadura de Colunas Mistas Parcialmente Betonadas: Avaliação das Disposições do Eurocódigo 4* II-501
Joana Carvalho | Carina Delgado | Rodrigo Gonçalves
- Evaluation of the Resistance Moment for the Initial Stage of Composite Steel Truss and Concrete Beam* II-511
Sérgio P. P. A. Roque | Paulo M. M. Vila Real | Paulo A. G. Piloto | Giovanni A. Plizzari
- Modelação Não Linear de Vigas Mistas em Aço e Betão* II-519
Isabel B. Valente | Ricardo Lage | José António C. Matos

- Sistemas de Conexão em Lajes Mistas Aço-Betão* II-529
Bruno M. S. Marques | Rui A. D. Simões

Estudos e produtos especiais

- Ação do Vento sobre Torres – Análises Comparativas entre RSA e Eurocódigos* II-541
Rui Travanca | Paulo Vila Real | Humberto Varum
- Análise da Robustez de Estruturas Metálicas Sujeitas a um Sismo Principal e Eventos Múltiplos Consecutivos* II-551
Filipe L. A. Ribeiro | André R. Barbosa | Luís C. Neves
- Análise e Dimensionamento Sísmico de Pórticos Metálicos Contraventados Segundo o Eurocódigo 8* II-561
Nelson Lopes | José Miguel Castro | Tiago Ribeiro | Tiago Abecasis
- Contenção das Fachadas do Palácio Lumiares* II-571
José Delgado | João Appleton
- Normas para o Cálculo Estrutural do Vidro – A Nova DIN 18008* II-581
Paulo Machado
- Soluções de Vidro com Intercalares Metálicos Embebidos - do Sombreamento ao Reforço* II-591
Paulo L. L. Carvalho | Paulo J. S. Cruz | Fred A. Veer

Execução e gestão da qualidade da construção em aço

- A Função “Qualidade” no (apoio ao) Fabrico: Perfis Ocos Estruturais Soldados e Conformados a Frio de Aços Não Ligados / NP EN 10219-1/2* II-601
Manuel Peixoto | Bruno Marques
- Controlo da Qualidade e Avaliação da Resistência de Prumos Telescópicos Extensíveis de Aço* II-611
João André | António M. Baptista | Dinar Camotim
- Guia Técnico de Recomendações para Conservação de Estruturas Metálicas* II-621
Maria J. Correia | Hugo Pernetá | Maria M. Salta | Hugo Patricio
- Principais Anomalias Observadas em Torres para Radiocomunicações em Portugal* II-633
Rui Travanca | Humberto Varum | Paulo Vila Real
- Sistemas de Protecção Contra Corrosão das Estruturas Metálicas* II-645
M. J. Correia | H. Pernetá | M. P. Rodrigues | E. V. Pereira | M. Salta

Grandes projectos e obras

- Acerca da Estrutura de uma Cruz em Fátima* II-659
João Fonseca | Bogdan Stankiewicz
- Análise à Rotura de um Tabuleiro Atirantado Misto Estudo Paramétrico* II-667
José J. Oliveira Pedro | António Reis

<i>Avaliação da Resistência ao Fogo da Estrutura Metálica do Centro de Exposições e Feiras de Oeiras</i>	II-679
Paulo M. M. Vila Real Nuno F. F. S. B. Lopes	
<i>Hotel Axis de Viana do Castelo Conceção e Dimensionamento</i>	II-691
Francisco Bernardo Marco Baptista Rui Ribeiro	
<i>Kanhangulo – Edifício de Habitação, Comércio e Escritórios</i>	II-701
António Monteiro Gonçalo Barreto Jorge Lopes	
<i>Torres Oceano Conceção e Dimensionamento</i>	II-711
Marco Baptista Rui Ribeiro Jorge Lopes	
<i>Vantagem das Estruturas Mistas em Pier e Pontes</i>	II-721
Carlos A. Figueiredo	
Pontes, viadutos e passadiços metálicos e mistos	
<i>A Aplicação de Tabuleiros Mistos no Atravessamento de Auto-estradas</i>	II-735
Pedro Cabral Susana Bispo Armando Rito	
<i>África Bridge, Novos Desenvolvimentos em Pontes Mistas</i>	II-745
Filipe Santos Luis Simões da Silva Ricardo Carmona	
<i>Calibração Experimental de um Modelo Numérico da Ponte Ferroviária de São Lourenço</i>	II-755
Diogo R. F. Ribeiro Rui A. B. Calçada Raimundo M. Delgado	
<i>Comportamento Diferido de Pontes Híbridas Constituídas por Vãos Laterais Pré-fabricados em Betão Pré-esforçado e Vão Central Misto Aço-Betão: Um Caso Prático</i>	II-765
João Marques Rui Carneiro Barros Miguel Ferraz Renato Bastos	
<i>Efeito da Interação Ponte-Comboio na Resposta Dinâmica de uma Ponte Mista de Pequeno Vão para Tráfego de Comboios de Alta Velocidade</i>	II-775
João M. P. Rocha António A. R. Henriques Rui A. B. Calçada	
<i>Efeito do Tipo de Restrição nos Bordos Longitudinais no Comportamento e Resistência de Placas Metálicas em Pontes</i>	II-785
Pedro Salvado Ferreira Francisco Virtuoso	
<i>Experimental Investigation of Bridge Falsework Cuplok Joints</i>	II-795
João Andréa Robert Beale António M. Baptista	
<i>Lançamento Incremental da Ponte de Fervença</i>	II-805
Rui Ferreira Alves	
<i>Monitorização do Tráfego e dos seus Efeitos na Nova Ponte Ferroviária sobre o Rio Sado</i>	II-815
Carlos M. C. Albuquerque Nuno M. P. Pinto Rui A. B. Calçada Joaquim G. M. Mendes	
<i>Passadiços num Parque Industrial na Azambuja</i>	II-825
Nuno Travassos Júlio Appleton João Saraiva	
<i>Pontão Sobre o Rio Grande da Pipa</i>	II-835
Rui P. C. F. Monteiro Maria J. N. M. Magalhães Miguel A. F. S. Dias	

<i>Ponte Pedonal e Ciclável sobre a 2ª Circular. Conceção Geral e Processo Construtivo</i>	II-845
António A. Fonseca António P. A. Fonseca João A. Fonseca Telmo Cruz Maximina Almeida	
<i>Viaduto Expo 2015 em Milão - Conceção Global e Processo Construtivo</i>	II-855
Cecil Balmoud António A. Fonseca Renato Bastos Tiago Alves António P. A. Fonseca	
Índice de Autores	II-865

Comissão Organizadora

Luís Simões da Silva, CMM
Paulo Cruz, UM
Nuno Lopes, UA
J. Almeida Fernandes, LNEC
António Baptista, LNEC

Comissão Científica

Paulo Vila Real, Presidente, UA
A. Adão da Fonseca, FEUP
Abílio de Jesus, UTAD
Aldina Santiago, FCTUC
Altino Loureiro, FCTUC
Ana Girão Coelho, ISEC
António Baptista, LNEC
António Matos Silva, MARTIFER SA
António Reis, IST
Carlos Martins, MARTIFER SA
Carlos Rebelo, FCTUC
Dinar Camotim, IST
Elsa Caetano, FEUP
Francisco Virtuoso, IST
Helena Gervásio, FCTUC
Isabel Valente, UM
J. Almeida Fernandes, LNEC
João Paulo Rodrigues, FCTUC
João Rocha de Almeida, UNL
José Clemente, REFER
José Miguel Castro, FEUP
José Mota Freitas, FEUP
José Rodrigues, MARTIFER SA
Leonor Côrte-Real, HEMPEL
Luís Borges, BG INGÉNIEURS CONSEILS
Luís Bragança, UM
Luís Calado, IST
Luís Câncio, J.L. CÂNCIO MARTINS, LDA
Luís Costa Neves, FCTUC
Luís Simões da Silva, FCTUC
Manuela Salta, LNEC
Manuel Peixoto, FERPINTA
Nuno Lopes, UA
Nuno Silvestre, IST
Paulo Cruz, UM
Paulo Piloto, IPB
Paulo Santos, FCTUC
Pedro Bandeira, UM

Rui Alves, SOCOMETAL
Rui Simões, FCTUC
Tiago Abecasis, TAL PROJECTO, Lda
Vitor Murtinho, FCTUC

Comissão Executiva

Paulo Cruz, UM
Isabel Valente, UM
Nuno Silvestre, IST
Luís Figueiredo Silva, CMM
Zínia Antunes, CMM
Joana Albuquerque, CMM

CMM Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista | **FCTUC** Faculdade De Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra | **FEUP** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto | **IPB** Instituto Politécnico de Bragança | **ISEC** Instituto superior de Engenharia de Coimbra | **IST** Instituto Superior Técnico | **LNEC** laboratório Nacional de Engenharia Civil | **REFER** Rede Ferroviária Nacional | **UA** Universidade de Aveiro | **UM** Universidade do Minho | **UNL** Universidade Nova de Lisboa | **UTAD** Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



VIII CONGRESSO DE
Construção
Metálica e Mista

PERFORMANCE OF PARTIALLY ENCASED BEAMS AT ELEVATED AND ROOM TEMPERATURE

Paulo A. G. Piloto^{a,*}, Ana B. R. Gavilán^b and Luis M. R. Mesquita^c

^{a,c} IDMEC, Polytechnic Institute of Bragança, Portugal

^b University of Salamanca, Spain

Abstract. The purpose of this paper is to analyse the performance of IPE100 Partially Encased Beams (PEB) at room and elevated temperature. The study includes a comparison with the behaviour of IPE 100 steel bare beam at room temperature. Seven specimens with four meters long were tested under bending, grouped in three series: PEB at elevated temperature, PEB at room temperature, and steel bare beams at room temperature. All beams attained the ultimate limit state by lateral torsional buckling. The ultimate load of PEB increased 85% in comparison with steel beam at room temperature. A decrease of 24% in the ultimate load of PEB was verified at elevated temperature, when compared to the bending resistance at room temperature.

1. Introduction

Partially Encased Beams (PEB) are elements in which the web of the steel section is encased by reinforced concrete. They are usually built-up with I-Shape or H-shape steel sections. Concrete between flanges increases fire resistance, load bearing and stiffness, without enlarging the overall size of the cross section in comparison to steel sections. These advantages outweigh the increasing self-weight of the element.

Partially Encased Beams (PEB) have been widely tested at room temperature. Kindmann *et al.* [1], performed 13 tests on PEB with and without slabs, proving the importance of the reinforced concrete between flanges for the ultimate bending moment. This research adjusted the pre-standard Eurocode 4 for the design of partially encased composite beams, considering the effect of encased concrete for load bearing capacity and deflection calculations. Lindner and Budassis [2], developed a new design proposal for lateral torsional buckling, taking into account the torsional stiffness of concrete, based on 22 full-scale tests with PEB. Maquoi *et al.* [3], improved the knowledge on lateral torsional buckling of beams, including PEB, and prepared new design rules that were not satisfactorily covered by the existing standards. The elastic critical moment and the ultimate lateral torsional buckling moment resistance were revised and improved. Nardin and El Debs [4] studied the behaviour of three composite PEB under flexural loading, testing some alternative positions for shear studs. Results confirmed that studs are responsible for composite action and increase bending resistance.

A small number of experiments under fire conditions are reported [5]. Authors developed several fire resistance tests using short beam lengths, comparing the behaviour under three different load levels and the effect of non-welded stirrups.

This paper presents a new set of experimental bending tests, using large beams, to determine the performance of PEB under bending at room and elevated temperature (400 °C). Bending resistance is also compared to IPE100 steel bare beam at room temperature.

2. Experimental programme

2.1 Specimens

Seven specimens were prepared to be tested at different temperature levels. Table 1 refers the conditions of each test and the initial imperfection of each specimen. The initial out-of-straightness was measured with a laser beam. Residual stresses were not measured. Tests were grouped in three series.

Table 1: List of tested beams

Series	Specimen	Temperature	Section	Mid span imperfection [mm]
1	B/3.9-01	400°C	PEB IPE100	2.0
	B/3.9-02	400°C	PEB IPE100	5.0
	B/3.9-03	400°C	PEB IPE100	3.0
2	B/3.9-11	Room	PEB IPE100	2.0
	B/3.9-12	Room	PEB IPE100	5.0
3	B/3.9-11A	Room	IPE100	1.0
	B/3.9-12A	Room	IPE100	3.0

Partially encased section consists of IPE100 steel beam grade S275 JR, with C20/25 encased concrete, using four longitudinal steel B500 rebars with 8 [mm] in diameter. Stirrups were built with 6 [mm] in diameter using rebars with steel grade B500, distributed along the length, spaced by 167 [mm]. Stirrups were also welded to the longitudinal steel reinforcement, as represented in Fig. 1a.

Simply supported beams were tested under four-point bending load using two fork supports. The distance between the fork supports was 3.9 [m]. Two point-Load (F1 and F2) were symmetrically applied on the top flange, spaced by 3 [m]. See Fig. 1b.

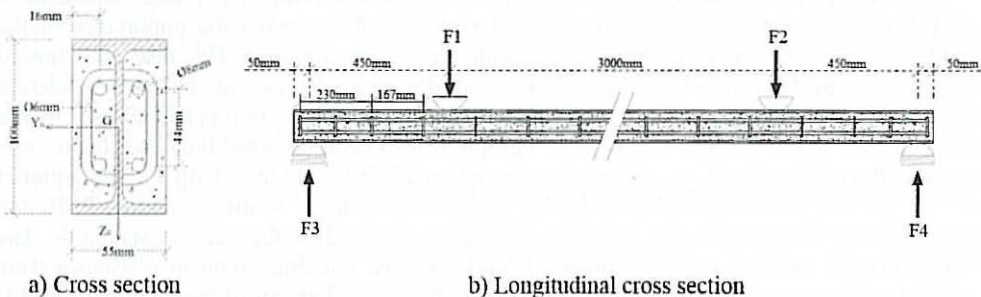


Fig. 1: Geometry and test set-up for Partially Encased Beams

Steel was characterized according international standards, [6], for hot rolled and cold formed steel, see table 2. The stress-strain curves are represented in Fig. 2, for all the three samples collected from the web of steel, representing the full graphics and detailing the first part of each tensile test.

Table 2: Tensile tests for hot rolled and cold formed steel

Properties	Hot rolled		Cold formed	
	Average	Std. Deviation	Average	Std. Deviation
E [GPa]	197.901	2.948	203.294	2.110
$R_{p0.2\%}$ [MPa]	300.738	6.720	524.993	3.521
ReH [MPa] (fy)	302.466	5.749	531.508	7.908
ReL [MPa]	300.856	4.028	520.825	4.068
Rm [MPa] (fu)	431.252	5.020	626.574	11.539
At [%]	41.584	0.231	25.155	0.495

E- Elastic modulus, $R_{p0.2\%}$ - proof strength for 0.2%, ReH- upper yield strength, ReL- lower yield strength, Rm- tensile strength, At- total extension at the moment of fracture.

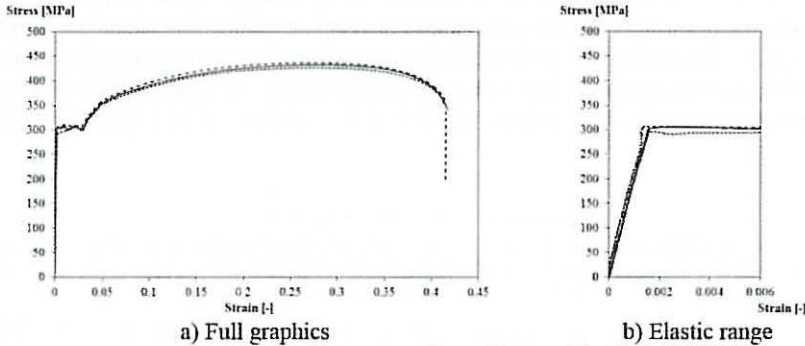


Fig. 2: Stress-strain curves of hot rolled profile IPE 100

Concrete was obtained from ordinary Portland cement, sand and siliceous aggregates. Table 3 represents the results for the compressive strength of concrete, using three compressive tests for cubic samples ($f_{ck,cube}$) and three compressive tests for cylindrical samples (f_{ck}), according to material testing standard, [7].

Table 3: Compressive tests for concrete

Properties	Cure [days]	Average	Std. Deviation
$f_{ck,cube}$ [MPa]	29	21.45	1.03
f_{ck} [MPa]	29	20.36	0.30

2.2 Instrumentation at room temperature

Partially Encased Beams were prepared to be tested at room temperature, measuring strain in middle section (SM). Five electrical strain gauges were placed over flanges and web (SM-WS, SM-OSt and SM-OSb), and over the rebars (SM-RC1 and SM-RC2). For the latest fixation, rebars were machined 1 [mm] in depth and appropriate length to accommodate the extensometers. Fig. 3 represents the position for strain recording.

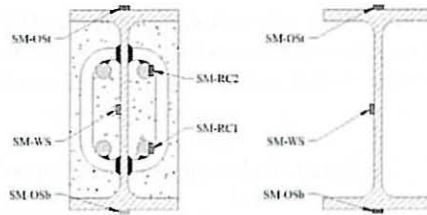


Fig. 3: Strain gauge position on PEB and steel section

Displacement of the cross section was determined at mid span of each beam, using three displacement transducers with an accuracy of $\pm 0.1\text{mm}$, fixed in two points of the middle section, connected to the data acquisition centre.

2.3 Instrumentation at elevated temperature

Thermocouples type K were positioned along the length of each beam, in five distinct sections S1/S1A/S2/S3A/S3, according to Fig. 4. Most of thermocouples were positioned inside the cross section, using the spot welding machine. For concrete temperature readings in positions Si-IC and Si-OC, thermocouples were welded to a small steel washer, wrapped in concrete.

The heating power unit used four dedicated thermocouples to control the heating process. Insulation mat increased heating process and was also responsible for keeping the temperature level.

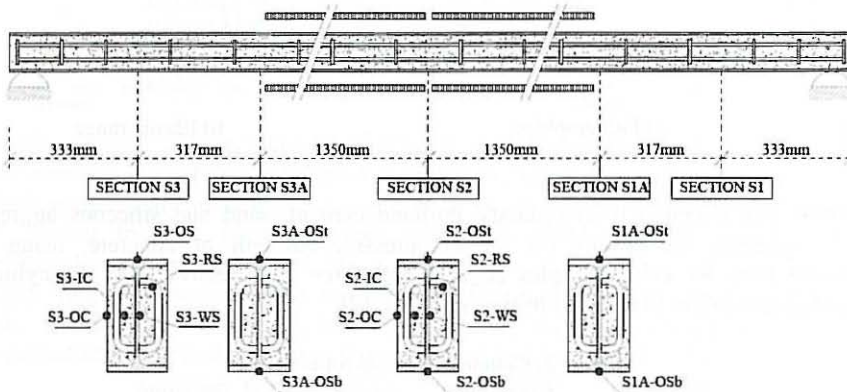


Fig. 4: Thermocouple positions

Displacement of the cross section was determined at mid span of each beam, using the room temperature procedure.

2.4 Experimental set-up and test procedure

Room temperature tests were developed using the hydraulic system, with incremental load. Load was slowly increased until the ultimate limit state was attained, based on the load cell readings. Teflon was applied between the hydraulics and top of each beam to decrease lateral restraint.

For high temperature tests, temperature was increased using the heating power unit system (70 [kVA] maximum power) and the electro-ceramic resistances applied to beam flanges, as

represented in Fig. 4. A heating rate of 800 [°C/h] was applied up to the specified temperature level (400°C). Supports were adjusted and load was applied after temperature stabilization (90 minutes after the start of heating).

3. Results at room temperature

3.1 IPE 100 Steel beam at room temperature

IPE100 steel beam failed by elastic lateral torsional buckling, see Fig. 5. Lateral displacement increased suddenly under small incremental load. The average ultimate load of 20186 N was determined for this test series, for an average vertical displacement of 48.9 [mm].

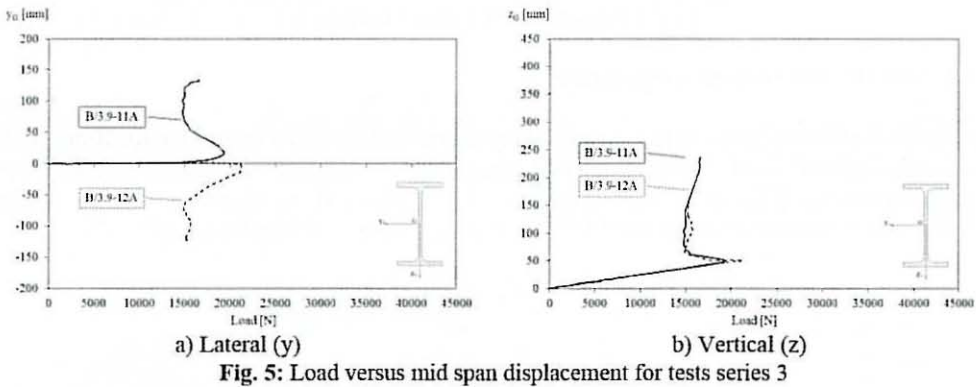


Fig. 5: Load versus mid span displacement for tests series 3

Load decreased immediately after the specimens start to develop lateral displacement and cross section rotation. Lateral displacement movement depends on the shape of the initial out-of-straightness.

Fig. 6 represents strain measurement during this test series. All registered values are below the elastic strain limit.

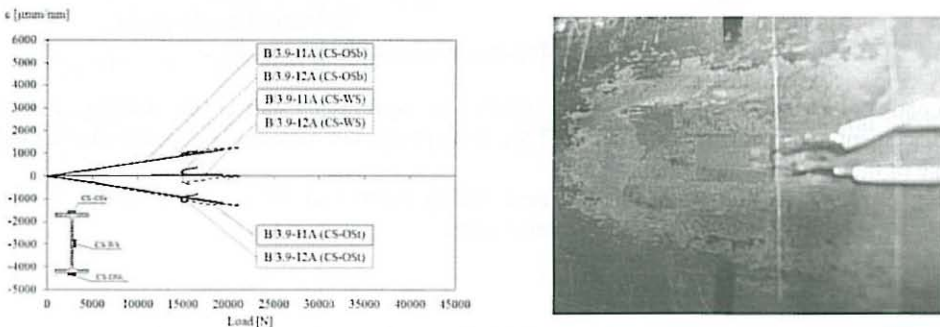
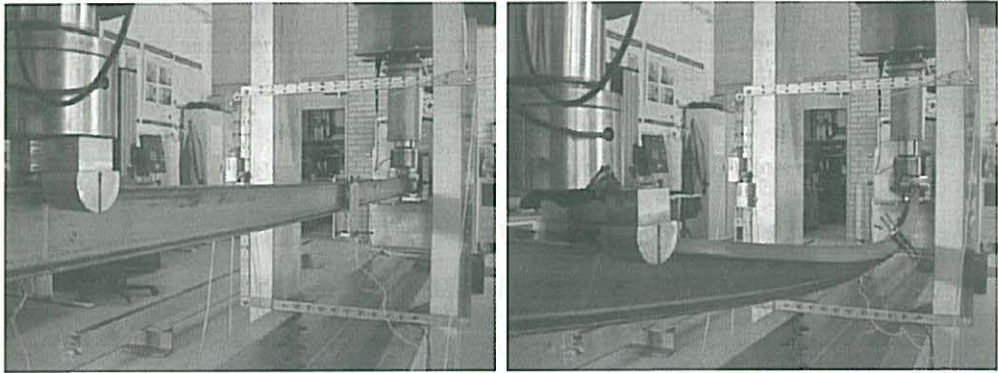


Fig. 6: Load-strain in medium section in beams B/3.9-11A and B/3.9-12A

Fig. 7 represents two loading steps regarding one bending test for test series 3 (before and after instability).



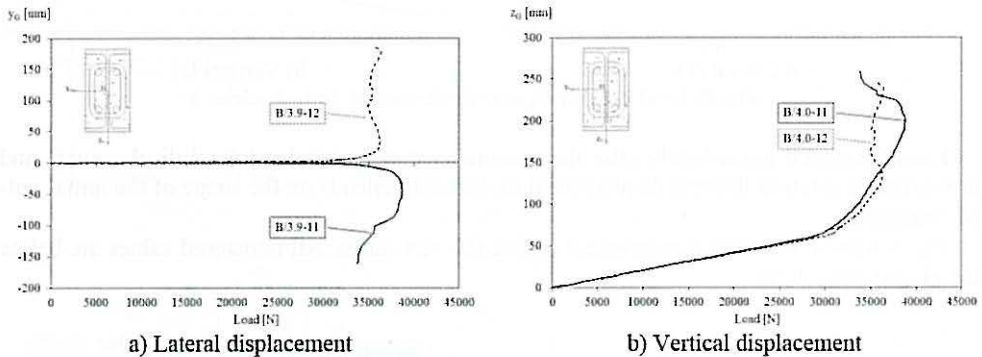
a) Initial load step

b) Final load step

Fig. 7: Beam B/3.9-11A during bending test

3.2 PEB IPE100 at room temperature

PEB IPE100 beams were tested at room temperature and failed by lateral torsional buckling as well. Vertical displacement increased with load as expected and lateral displacement suddenly increased for an average ultimate force of 37431 [N], as represented in Fig. 8. The stiffness in the elastic part increased 15 % in comparison to steel bare beam.



a) Lateral displacement

b) Vertical displacement

Fig. 8: Load versus mid span displacement for tests series 2

Load continued to increase, even when the specimen started to develop lateral displacement and cross section rotation. Lateral displacement movement depends also on the shape of the initial imperfection.

Fig. 9 represents the strain measurement during loading of PEB for tests series 2. The elastic strain limit was exceeded in all strain gauges.

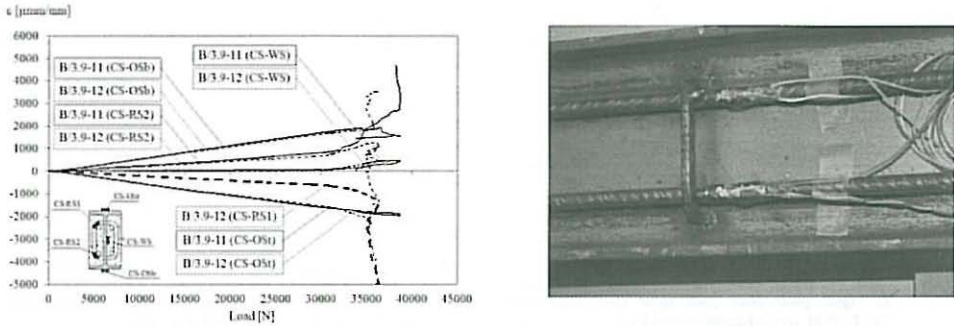
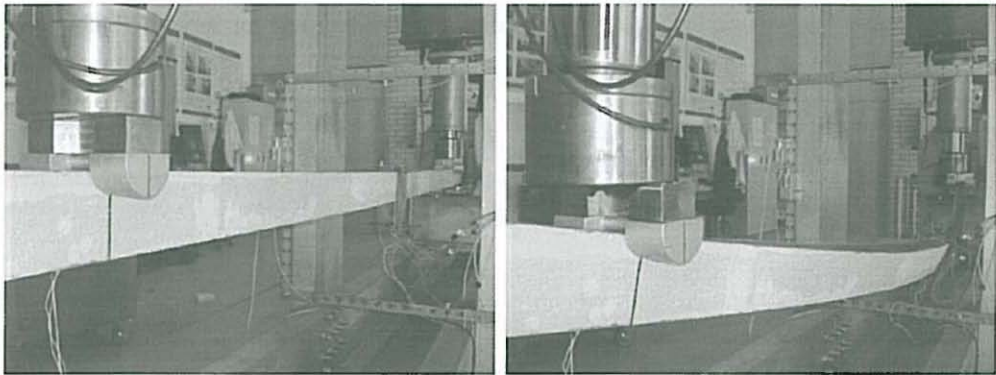


Fig. 9: Load-strain in medium section in beams B/3.9-11 and B/3.9-12

Fig. 10 represents two loading steps regarding the bending test B/3.9-12 for test series 2 (before and after instability).



a) Initial load step

b) Final load step

Fig. 10: Beam B/3.9-12 during test

4. Results at elevated temperature

4.1 PEB IPE100 at elevated temperature (400 °C)

Partially Encased Beams were tested at elevated temperature and failed by lateral torsional buckling as well. The average ultimate load was 28585 [N] for test series 1. Fig. 11 represents lateral and vertical displacement during loading.

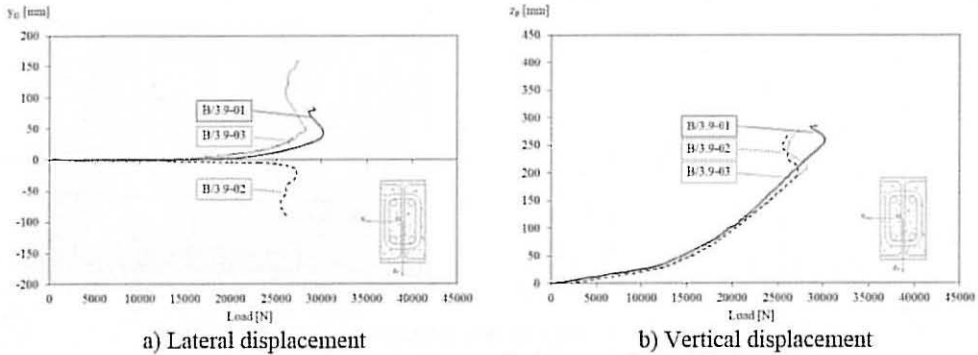


Fig. 11: Load versus mid span displacement for tests series 1

The same plastic behaviour was verified at elevated temperature. Failure occurred for smaller ultimate load.

Fig. 12 represents two loading steps regarding one bending test for series 1 (before and after instability).

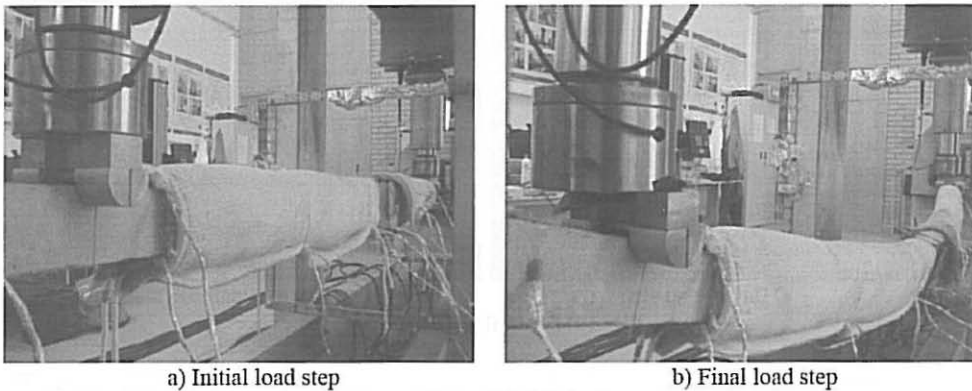


Fig. 12: Beam B/3.9-2 during test

Thermal insulation by fibre mats allowed high heating rate during experiments. After 90 minutes of heating exposure, temperature was considered uniform in section ($400\text{ }^{\circ}\text{C}$), the supports were adjusted and load was applied slowly, see Fig. 13.

Due to low thermal conductivity of concrete, low temperature was registered in concrete near the load and support positions. Temperature was also measured by infrared thermography during and after removing the insulation mat, confirming that temperature was uniform distributed along the heating length.

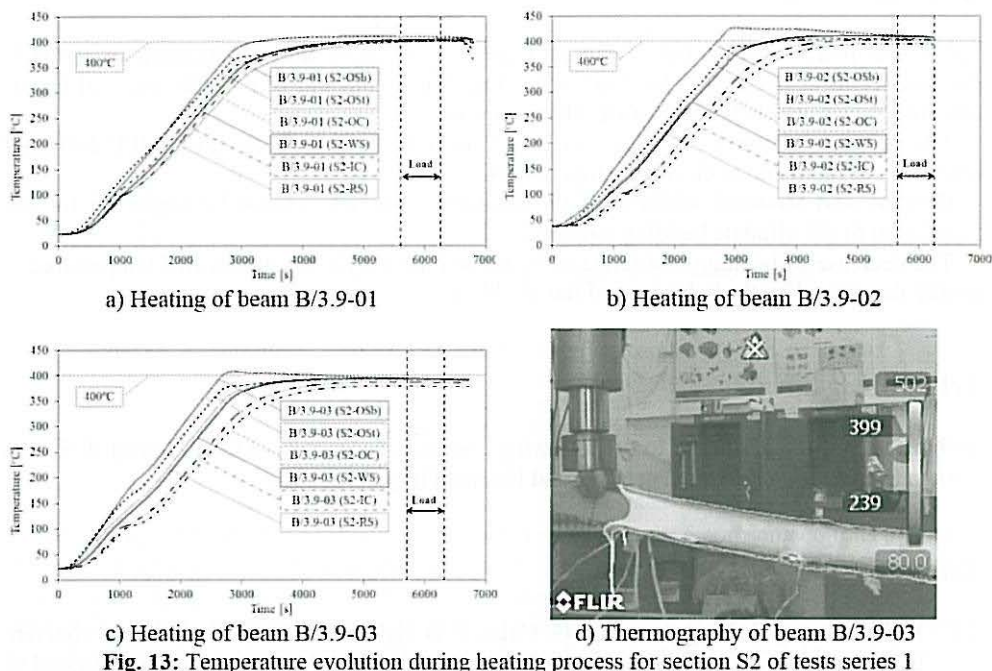


Fig. 13: Temperature evolution during heating process for section S2 of tests series 1

5. Discussion of results

Table 4 represents the ultimate load for each tests series. Lateral torsional buckling was attained for all bending tests.

Table 4: Ultimate limit load for tests series

Series	Specimen	Fu [N]	Fu (average)	Std. Deviation.
1	B/3.9-01	30204	28585 [N]	±1476 [N]
	B/3.9-02	27290		
	B/3.9-03	28337		
2	B/3.9-11	38718	37431 [N]	±1790 [N]
	B/3.9-12	36187		
3	B/3.9-11A	19369	20186 [N]	±1179 [N]
	B/3.9-12A	21037		

The ultimate limit load on PEB sections increased 85% with respect to steel bare sections.

The design buckling resistance moment of PEB, calculated according to EN1994-1-1 [6], only reflects an increase of 40% with respect to the buckling resistance moment of the steel bare section, calculated according to EN1993-1-1 [7], because the effect of the transversal reinforcement is not considered. Stirrups welded to the web of profile are responsible for higher torsional stiffness that cannot be neglected.

Tests performed on PEB at elevated temperature showed a decrease of 24% on the ultimate limit load when compared to the PEB tested at room temperature. This reduction value is in accordance with the calculated values of EN1994-1-2 [8].

6. Conclusions

Seven four-point bending tests were performed to evaluate the performance of partially encased beams at room and elevated temperature. The behaviour of partially encased beams was compared to the behaviour of steel bare section.

The ultimate load under bending was determined for IPE100 PEB and for IPE 100 steel bare beam at room and at elevated temperatures.

Bending and torsional stiffness of the reinforced concrete cannot be neglected for the calculation of the ultimate bending moment.

The decrease of bending resistance of Partially Encased Beams at elevated temperature is mainly dominated by the behaviour of the steel beam.

Acknowledgements

Authors acknowledge support to the following companies: Arcelor – Mittal (Spain), J. Soares Correia (Portugal), Fepronor (Portugal) and Hierros Furquet (Spain).

References

- [1] R. Kindmann, R. Bergmann, L—G. Cajot, J. B. Scleich; “Effect of reinforced concrete between the flanges of the steel profile of partially encased composite beam”; *Journal of Constructional Steel Research*, 27, pp 107-122, 1993.
- [2] Joachim Lindner, Nikos Budassis; “Lateral torsional buckling of partially encased composite beams without concrete slab”; *Composite construction in steel and concrete IV*, conference proceedings, May 28th to June 2nd, Banff, Alberta, Canada, 2000.
- [3] R. Maquoi, C. Heck, V. Ville de Goyet, et al, (European commission), “Lateral torsional buckling in steel and composite beams”; ISBN 92-894-6414-3; Book 1,2 and 3; *Technical steel research final report EUR 20888 EN*; August 2002.
- [4] Silvana de Nardin, Ana Lucia H.C. El Debs, “Study of partially encased composite beams with innovative position of stud bolts”, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 65, Issue 2, Pages 342-350, February 2009.
- [5] Paulo A. G. Piloto, Ana B. R. Gavilán, Luís M. R. Mesquita; “Temperature analysis on fire resistance experiments of partially encased beams”; *Safety and Security Engineering IV*, pp. 313- 324, WIT Press, ISBN 978-1-84564-522-9, ISSN: 1746-4498 (PRINT), ISSN:1743-3509 (ON-LINE), University of Antwerp, Belgium, 4-6 July 2011.
- [6] ISO 6892-1: *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*. Switzerland: International Standard, 2009.
- [7] NP EN 12390-3, (Ed. 2) – *Ensaio do betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão*, 2009.
- [8] CEN - EN 1994-1-1; “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”; Brussels, December 2004.
- [9] CEN - EN 1993-1-1; “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”; Brussels, May 2005.
- [10] CEN - EN 1994-1-2; “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”; Brussels, August 2005.