



IX CONGRESSO DE
Construção
Metálica e Mista

I CONGRESSO
Luso-Brasileiro de
Construção Metálica
Sustentável

Luís Simões da Silva, CMM
Nuno Silvestre, IST
Filipe Santos, CMM



IX CONGRESSO DE
Construção Metálica & e Mista

I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

Atas do IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso Luso- Brasileiro de Construção Metálica Sustentável

Exponor
24 e 25 de Outubro de 2013

Luís Simões da Silva

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

Nuno Silvestre

Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Filipe Santos

Vesam Engenharia
Cantanhede, Portugal

organização: **CMM** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
com a colaboração: **INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**



IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável

Copyright © 2013

por Luís Simões da Silva, Nuno Silvestre, Filipe Santos

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 2013

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: 365297/13
ISBN: 978-989-95605-7-4

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.

Prefácio

O IX Congresso de Construção Metálica e Mista coincide com o 16º aniversário da **cmm**. Ao cabo destes 16 anos, a Associação está prestes a atingir a “maioridade”, facto que permite repensar assuntos com alguma maturidade e perspetivar novas iniciativas. Uma primeira iniciativa diz respeito à realização do 1º Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, o qual ocorre em simultâneo com o IX Congresso. A realização conjunta destes dois Congressos proporcionará a toda a comunidade um conhecimento mais aprofundado sobre os trabalhos técnicos e científicos de maior impacto que tenham ocorrido em Portugal e no Brasil. Por outro lado, corresponde também ao culminar de uma profícua história de cooperação e colaboração entre investigadores e engenheiros dos dois países. Espera-se que este 1º Congresso Luso-Brasileiro seja bem sucedido e que próximas edições, a repartir entre o Brasil e Portugal, possam incrementar o sucesso da construção metálica e mista nos dois países. No contexto destes congressos, sublinha-se a realização de sessões plenárias por individualidades nacionais e internacionais de relevo em várias áreas temáticas (arquitetura, produção de estruturas metálicas, regulamentação, grandes projetos, sustentabilidade). Finalmente, refere-se o lançamento de mais um manual da **cmm** dedicado à conceção e construção de estruturas em “aço leve” (Light Steel Framing – LSF), o qual se espera vir a ser útil aos agentes neste tipo de solução estrutural.

Uma segunda iniciativa da **cmm**, igualmente relevante, refere-se à realização da ISCE 2013 – International Steel Construction Exhibition, que decorre em paralelo com os congressos, na EXPONOR, no âmbito da CONCRETA - Feira Internacional da Construção para uma Regeneração Urbana Sustentável. Em Portugal, é a primeira grande exposição internacional dedicada exclusivamente ao setor da construção metálica e mista, e pretende promover a construção metálica e mista num contexto internacional, com foco na Península Ibérica, países lusófonos e da Europa do sul, não descurando a sua perspetiva industrial, produtiva, científica e técnica.

Por último, releva-se a criação da marca **Portugal Steel** (<http://portugalsteel.com>) em 2013. O projeto Portugal Steel, encerra em si a ambição de todo um setor empresarial cuja importância para a economia nacional se tem mostrado vital, através da enorme dinâmica das empresas deste setor, e da sua forte componente de exportação. Um dos objetivos do **Portugal Steel** consiste em atrair a atenção dos decisores públicos e privados, quer locais, quer nacionais, através do reconhecimento dos benefícios da construção metálica e das vantagens decorrentes de uma aposta estratégica neste setor. Tem sido realizado um conjunto de eventos **Portugal Steel** em todo o território nacional bem como publicitado nos *media* as vantagens da construção metálica, nomeadamente face às novas exigências de sustentabilidade e competitividade. Perante um cenário dramático do setor da construção actual, tem-se realçado o papel do setor da construção metálica na recuperação económica e social de Portugal, tendo como ponto de partida a dinâmica de internacionalização que as empresas deste setor têm vindo a demonstrar, a qual tem permitido a sobrevivência de grande parte delas, assim como a manutenção dos postos de trabalho de milhares de Portugueses.

Luís Simões da Silva
Nuno Silvestre
Filipe Santos

A Comissão Organizadora do
IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso Luso-Brasileiro de
Construção Metálica Sustentável

Comissão Organizadora

Luis Simões da Silva, CMM
Nuno Silvestre, IST
Filipe Santos, VESAM

Comissão Científica

Paulo Vila Real, UA, Portugal
Pedro Vellasco, UERJ, Brasil
A. Adão da Fonseca, FEUP
Alexandre Landesmann, UFRJ
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
Arlene Maria Sarmanho de Freitas, UFOP
Carlos Martins, MARTIFER SA
Carlos Rebelo, FCTUC
Dinar Camotim, IST
Eduardo Batista, UFRJ
Elsa Caetano, FEUP
Filipe Santos, VESAM
Francisco Virtuoso, IST
Helena Gervásio, FCTUC
Isabel Valente, UM
Inácio B. Morsh, URGs
J. Almeida Fernandes, LNEC
João Paulo Rodrigues, FCTUC
João Rocha de Almeida, UNL
Jorge Munaiar Neto, USP
José Clemente, REFER
José G. S. da Silva, UERJ
José Miguel Castro, FEUP
Juliana Vianna, UFES
Leonor Côrte-Real, HEMPEL
Luciano de Lima, UERJ
Luís Borges, T-INGENIERIE
Luís Bragança, UM
Luís Calado, IST
Luís Câncio, J.L. CÂNCIO MARTINS, LDA
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
Ricardo Hallal Fakury, UFMG
Ricardo R. de Araújo,
Rui Alves, SOCOMETAL
Rui Simões, FCTUC
Sebastião Andrade, PUC-Rio
Tiago Abecasis, TAL PROJECTO, Lda
Valdir Pignatta e Silva, USP
Vitor Murtinho, FCTUC

Comissão Executiva

Nuno Silvestre, IST
Filipe Santos, VESAM
Luís Figueiredo Silva, CMM
Zínia Antunes, CMM
Joana Albuquerque, CMM
Ana Simões da Silva, 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 | **PUC-Rio** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro | **REFER** Rede Ferroviária Nacional | **UA** Universidade de Aveiro | **UERJ** Universidade do Estado do Rio de Janeiro | **UFES** Universidade Federal do Espírito Santo | **UFMG** Universidade Federal de Minas Gerais | **UFOP** Universidade Federal de Ouro Preto | **UFRJ** Universidade Federal do Rio de Janeiro | **URGS** Universidade Federal do Rio Grande do sul | **UM** Universidade do Minho | **UNL** Universidade Nova de Lisboa | **USP** Universidade de São Paulo | **UTAD** Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Índice

Conferências

- Brasil – vivências de um grupo de engenheiros de pontes* I-3
Antônio A. Fonseca
- Building sustainably in steel* I-15
John Dowling
- Structural stainless steel: research and design* I-25
Leroy Gardner
- The design of steel bridges: examples of redesign of places* I-35
Enzo Siviero | Andrea Totaro | Alessandro Stocco | Michele Culatti
- The scramble for Africa, doing business in Africa – A key global 21st century opportunity for business growth* I-45
João E. N. F. Silva

Comunicações

Arquitetura e Aço

- A pureza da forma estrutural em aço na arquitetura habitacional* II-5
Inês D. Campos
- Soluciones intensivas en acero para la rehabilitación de centros urbanos* II-15
Jocelyn E. R. Nieto | Luis S. Silva | Vítor Murtinho
- Uma gramática de reticulados espaciais em aço* II-25
Juarez M. S. Franco | Eduardo M. Batista | Alexandre Landesmann

Eficiência Energética e Sustentabilidade de Edifícios Metálicos

- Análise paramétrica de uma solução passiva para uma moradia com estrutura leve em aço* II-37
Bruno Cabanas | Paulo Santos | Helena Gervásio
- Otimização de estruturas modulares de aço enformado a frio* II-47
Ricardo Breda | Helena Gervásio | Luís Simões da Silva

Execução e Gestão da Qualidade da Construção em Aço

- Avaliação do comportamento de ligações de emenda entre perfis tubulares* II-59
Rui Simões | Sandra Jordão | Paulo Freitas
- Desenvolvimento de um sistema de monitorização da integridade estrutural* II-69
Filipe Santos | Bruno Jorge | Pedro Santos
- Influência do aperto dos parafusos no comportamento de ligações aparafusadas* II-79
Nuno Sousa | Rui Simões | Tiago Abecasis

<i>Light steel frame na produção de moradias no Brasil</i>	II-91
Carlos E.M. Gomes André L. Vivan Eduvaldo P. Sichieri J. C. Paliari	
Grandes Projetos	
<i>A estrutura de aço da Arena Amazônia</i>	II-101
Ana Lydia R. C. Silva Ricardo H. Fakury Gilson Queiroz José A. G. Fernandes	
<i>Astilleros del Alba: projeto básico dos estaleiros navais na península de Araya, Venezuela</i>	II-111
Kalil J. Skaf Pedro Morujão Tiago Alves Sérgio Vale Daniel Martinez	
<i>Cobertura Mineirão: solução integrada concreto-aço</i>	II-123
Antônio S. Rezende Afonso H. M. Araújo Aécio F. Lira Euler O. Guerra	
<i>Estrutura da cobertura da Arena Grêmio</i>	II-133
Tiago B. Abecasis Tiago P. Ribeiro	
<i>Medição de forças axiais da cobertura do estádio olímpico de Londres 2012</i>	II-147
Elsa Caetano	
Pontes Metálicas e Mistas	
<i>Análise da integração entre modos de instabilidade em placas metálicas reforçadas longitudinalmente usando o método semi-analítico</i>	II-159
Pedro S. Ferreira Francisco Virtuoso	
<i>Análise dinâmica e estimativa da vida útil de pontes rodoviárias mistas submetidas à travessia de veículos</i>	II-169
Fernando N. Leitão Irwing A. R. Silva José G. S. Silva Luis F. C. Neves Rui Simões	
<i>Aplicação do método dos elementos finitos na análise de vigas mistas considerando efeito de longa duração</i>	II-179
Maiga M. Dias Inácio B. Morsch Armando M. Awruch Jorge L. P Tamayo	
<i>Calibração e validação experimental de um modelo dinâmico da ponte ferroviária de São Lourenço sob ação de tráfego</i>	II-189
Diogo Ribeiro Rui Calçada Raimundo Delgado	
<i>Cimbres auto-lançáveis para pontes: Análise do seu comportamento e reutilização</i>	II-199
Filipe Bastos José Delgado João R. Almeida	
<i>Elevado em estrutura mista de aço e concreto para percurso do trem de levitação magnética da COPPE/UFRRJ</i>	II-211
Eduardo M. Batista Augusto C. E. P. Silva Richard Stephan	
<i>Pontes mistas curvas em caixão – processo construtivo e realizações</i>	II-221
Ricardo Afecto Nuno Lopes António Reis	
<i>Projeto de um viaduto para uma mina no Brasil</i>	II-231
Fernando Stucchi António A. Fonseca Francisco M. Mato Marcelo Waimberg Pedro Moás Pablo Solera João A. Fonseca	
<i>Substituição dos tabuleiros das pontes OA498 em Insborn e OA499 em Lultzhausen - Luxemburgo</i>	II-243
José J. O. Pedro Arnaud Salmon	

<i>Tabuleiros mistos com suspensão axial, Pontes atirantadas e “bowstring arches” Parte 1: concepção e estabilidade aerodinâmica</i>	II-253
António Reis José J. O. Pedro Roberto Feijó	
<i>Tabuleiros mistos com suspensão axial, Pontes atirantadas e “bowstring arches” Parte 2: Estudos e realizações</i>	II-263
António Reis Nuno Lopes José J. O. Pedro	
<i>Viaduto ao PK29+005 na linha ferroviária Thénia – Tizi Ouzou, na Argélia</i>	II-273
Victor Barata Fernando Gonçalves Rui Tavares	
<i>Viaduto ao PK36+970 na linha ferroviária Thénia – Tizi Ouzou, na Argélia</i>	II-283
Victor Barata Fernando Gonçalves	
Segurança Estrutural e Desempenho de Novos Materiais e Produtos	
<i>Análise comparativa de métodos simplificados de cálculo do momento crítico</i>	II-295
João Canha Liliana Marques Luís S. Silva	
<i>Análise das possíveis abordagens para o dimensionamento de elementos não uniformes em aço</i>	II-305
Liliana Marques Luís S. Silva Carlos Rebelo Aldina Santiago Trayana Tankova	
<i>Análise de painéis com perfis de aço enformados a frio para utilização em construção modular</i>	II-315
Filipe Garcia José Henriques Helena Gervásio Luís S. Silva	
<i>Análise dinâmica de uma ponte ferroviária de pequeno vão para tráfego de alta velocidade</i>	II-327
Cristiana Bonifácio Diogo Ribeiro Rui Calçada Raimundo Delgado	
<i>Análise dinâmica não-linear de ligações viga-pilar aparafusadas com placa de extremidade</i>	II-337
João Ribeiro Aldina Santiago Constança Rigueiro	
<i>Análise do método do Eurocode para a determinação da temperatura em estruturas de aço externas a edificações em situação de incêndio</i>	II-347
Valdir P. Silva Macksuel S. Azevedo	
<i>Análise inelástica de pós-encurvadura de perfis metálicos de parede fina utilizando a teoria generalizada de vigas</i>	II-357
Miguel Abambres Dinar Camotim Nuno Silvestre	
<i>Análise não linear de pórticos “dual-steel” simples</i>	II-369
Andre Tenchini Carlos Rebelo Luciano Lima Luís S. Silva	
<i>Análise numérica da flambagem do montante de alma de vigas de aço celulares</i>	II-379
Hugo C. Vieira Ana L. R. C. Silva Ricardo H. Fakury Francisco C. Rodrigues Rodrigo B. Caldas Gustavo S. Verissimo José L. R. Paes José C. L. Ribeiro	
<i>Aplicação mobile: dimensionamento de ligações metálicas</i>	II-389
Ivo Lourenço Luís S. Silva Aldina Santiago Liliana Marques	
<i>Avaliação da capacidade de carga de colunas metálicas atirantadas e pré-esforçadas</i>	II-399
Miguel Serra Luís S. Silva Carlos Rebelo Liliana Marques	

- Avaliação da carga crítica de torres de telecomunicações constituídas por troços rectos de secção circular oca com diâmetros diferentes* II-407
António M. Baptista
- Avaliação do comportamento estrutural do pilar misto parcialmente revestido submetido à flexo-compressão* II-417
Margot F. Pereira | Hidelbrando J. F. Diógenes | Ana L. H. C. El Debs
- Avaliação experimental da utilização de conectores indentados em elementos mistos em aço e betão leve* II-427
Isabel B. Valente | Veronique S. Ramos | Gustavo S. Veríssimo
- Avaliação numérica da capacidade de deformação de elementos de aço sujeitos a carregamentos monotónicos e cíclicos* II-437
Miguel Araújo | José Miguel Castro
- Avaliação sísmica de pórticos com contraventamento centrado* II-447
Andre Tenchini | Carlos Rebelo | Luciano Lima | Luís S. Silva
- Bending resistance of composite steel truss and concrete beam* II-457
Mickael da Silva | Paulo Piloto | Sérgio Roque | Paulo V. Real | Giovanni Plizzari
- Calibração de um modelo de elementos finitos de ligação metálica viga-pilar para validação dos modelos de cálculo do Eurocódigo 3* II-467
Hugo R. G. S. Augusto | José M. Castro | Carlos A. S. Rebelo | Luís S. Silva
- Caracterização do comportamento de ligações aço-betão* II-477
José Henriques | Luís S. Silva | Isabel B. Valente
- Comportamento estrutural de perfis tubulares com secção poligonal regular de parede fina* II-487
Rodrigo Gonçalves | Dinar Camotim
- Critério de interação entre o esforço normal e o momento flector em secções semi-elipsoidais ocas totalmente plastificadas* II-497
António M. Baptista
- Determinação da resistência de painéis curvos isolados em aço* II-507
João P. Martins | Luís S. Silva | António Reis
- Development of structural applications using web based technologies* II-517
Rui Barros | João Granado | João Rio | José M. Castro
- Dimensionamento de cantoneiras de aço formadas a frio conectadas pelas abas: estudo numérico e experimental* II-527
Enio Mesacasa Jr. | André T. Beck | Maximiliano Malite
- Dimensionamento de colunas cruciformes e cantoneiras através do método da resistência directa* II-537
Pedro B. Dinis | Dinar Camotim
- Dimensionamento sísmico de edifícios com estruturas metálica e dual metálica-betão armado* II-547
Tiago P. Ribeiro | Carlos S. Oliveira
- Dimensionamento sísmico de ligações aço-betão com recurso a ancoragens instaladas à posteriori* II-557
Nuno B. R. F. Carneiro | David J. J. M. Pinto

- Effect of axial restraint in a composite steel-concrete frame subject to localised fire* II-567
Cécile Haremza | Aldina Santiago | Luís S. Silva
- Encurvadura lateral de perfis em C enformados a frio em situação de incêndio* II-577
Flávio Arrais | Nuno Lopes | Paulo V. Real
- Esmagamento de alma de perfis de aço enformados a frio: uma nova abordagem de dimensionamento* II-587
António P. C. Duarte | Nuno Silvestre
- Estudo comparativo do uso de vigas coluna de aço carbono e inoxidável em subestações de energia* II-597
Robson P. Cardoso | Pedro C. G. S. Vellasco | Luciano R. O Lima | Luiz B. Neto
- Estudo experimental comparativo do comportamento ao fogo de colunas tubulares quadradas com circulares preenchidos com betão* II-607
Inês Garcia | João P. C. Rodrigues | Tiago A. Pires
- Estudo experimental e numérico sobre o comportamento não linear de madres com secção em "HAT"* II-617
António P. C. Duarte | Nuno Silvestre | João R. Correia | Dinar Camotim
- Estudo numérico do comportamento de perfis em U invertidos em ligações de colunas tubulares com vigas I* II-627
Luís B. Magalhães | Carlos S. Rebelo | Sandra S. Jordão
- Estudo numérico-experimental da estabilidade do montante de alma em vigas casteladas* II-637
Washington B. Vieira | Gustavo S. Veríssimo | Rodrigo B. Caldas | Francisco C. Rodrigues | Ricardo H. Fakury | José L. R. Paes | José C. L. Ribeiro | Ana L. R. C. Silva
- Estudo paramétrico do comportamento ao fogo de colunas tubulares de aço preenchidas com betão* II-645
Tiago A. C. Pires | João P. C. Rodrigues | José J. R. Silva | Inês Garcia
- Experimental behaviour of bridge falsework joints* II-655
João André | Robert Beale | António M. Baptista
- Feasibility tests on single shear lap friction connections for wind towers* II-665
Rui Matos | João Cruz | Carlos Rebelo | Milan Veljkovic
- Influência dos critérios do Eurocódigo 8 para selecção de grupos de acelerogramas na avaliação do desempenho sísmico de estruturas metálicas* II-675
Luís Macedo | José M. Castro
- Laboratory testing of single micropiles* II-685
Rui Matos | Paulo Pinto | Carlos Rebelo | Milan Veljkovic
- Metodologia probabilística para a avaliação da segurança de pontes de pequeno vão para tráfego de comboios de alta velocidade* II-695
João M. Rocha | António A. Henriques | Rui Calçada
- Modelação numérica da resistência de vigas metálicas sujeitas a encurvadura por esforço transversal à temperatura normal e ao fogo* II-705
André Reis | Nuno Lopes | Paulo V. Real
- Modelação numérica do fenómeno de esmagamento da alma em vigas de aço enformadas a frio* II-717
Pedro Natário | Nuno Silvestre | Dinar Camotim

<i>Modelo de elementos finitos para análise não linear de piso misto de pequena altura</i>	II-727
Marcelo N. Kataoka Ana L. H. C. El Debs	
<i>Novas expressões para o cálculo da secção efectiva de secções transversais metálicas de classe 4 a altas temperaturas</i>	II-737
Carlos Couto Paulo V. Real Nuno Lopes Bin Zhao	
<i>O programa GBTUL 2.0 – uma ferramenta para a análise de estabilidade e de vibração de barras de parede fina</i>	II-747
Rui A. S. Bebiano Rodrigo M. Gonçalves Dinar R. Z. Camotim	
<i>Os efeitos de segunda ordem no projeto de pavilhões industriais em estrutura metálica</i>	II-755
Fábio Oliveira Bruno Pereira José M. Castro	
<i>Relevância da interacção local-distorcional em colunas de aço enformadas a frio com secção em c</i>	II-765
André D. Martins Pedro B. Dinis Dinar Camotim Paulo Providência	
<i>Resistência ao fogo de colunas tubulares em aço inoxidável</i>	II-777
Nuno Lopes Paulo V. Real	
<i>Sobre o comportamento de perfis de aço comprimidos em situação de incêndio: análises numérica e experimental</i>	II-787
Érica F. A. Kimura Jorge M. Neto Armando L. Moreno Jr.	
<i>Um modelo numérico para conectores de cisalhamento tipo crestbond</i>	II-797
Halley P. Silva Gustavo S. Verissimo José L. R. Paes José C. L. Ribeiro Isabel B. Valente	
<i>Um modelo para estimativa dos deslocamentos em vigas de aço com aberturas na alma</i>	II-807
Gustavo S. Verissimo José C. L. Ribeiro Ricardo H. Fakury José L. R. Paes	
<i>Vibração de pórticos metálicos: aplicação da teoria generalizada de vigas (GBT)</i>	II-817
Cilmar Basaglia Dinar Camotim Humberto Coda	
Seminário Sobre Vidro Estrutural	
<i>Avaliação experimental do efeito da temperatura na resistência ao arrancamento de elementos metálicos embebidos</i>	II-829
Paulo J. S. Cruz Paulo L. L. Carvalho Fred A. Veer	
<i>Estudo experimental de sistemas adesivos vidro-aço</i>	II-837
Raquel Pardal Paulo J. S. Cruz Isabel B. Valente	
<i>Modelação numérica de vigas de vidro laminado</i>	II-847
Sandra Jordão Marco Pinho João P. Martins Aldina Santiago	
<i>Simulação numérica do comportamento de vidro reforçado com elementos metálicos embebidos</i>	II-857
Isabel B. Valente Paulo J. S. Cruz Paulo L. L. Carvalho Lúcio Alves	
<i>Vidro estrutural: normalização, cooperação, investigação e aplicação</i>	II-867
Paulo J. S. Cruz Paulo L. L. Carvalho	

Vidro reforçado – Desenvolvimento de um sistema de ligação inovador II-875
Paulo L. L. Carvalho | Paulo J. S. Cruz | Fred A. Veer

Soluções Industrializadas para a Construção de Edifícios

Análise experimental e analítica de chapas metálicas enformadas a frio para coberturas e fachadas II-885

Ana A. Martins | Isabel B. Valente | Alexandra Feliz | José M. Silva

Estudo do comportamento estrutural de edifícios mistos submetidos à ação não determinística do vento II-895

Rafael R. Barboza | Genival S. Filho | José G. S. Silva | Sebastião A. L. Andrade

Simplified procedure to determine the flexural strength for distortional buckling of cold-formed steel members II-905

Luiz G. F. Grossi | Luiz C. M. Vieira Jr. | Maximiliano Malite

Optimização dos processos de análise qualitativa para o fabrico de perfis ocós acabados e enformados a frio (EN 10219-1) II-915

Bruno Marques | Manuel Peixoto

Índice de Autores II-923



IX CONGRESSO DE
Construção Metálica
e Mista

I CONGRESSO
LUSO-BRASILEIRO DE
Construção Metálica Sustentável

BENDING RESISTANCE OF COMPOSITE STEEL TRUSS AND CONCRETE BEAM

Mickael Da Silva^a, Paulo Piloto^b, Sérgio Roque^c, Paulo Vila Real^d, and Giovanni Plizzari^e

^{a,b,c} *Polytechnic Institute of Bragança, Portugal*

^d *University of Aveiro, Portugal*

^e *University of Brescia, Italy*

Abstract: This study presents the numerical simulation of the bending resistance of CSTCB in stage I (element made only by the self-supported steel truss and base plate). Two different base plates were considered (Steel and Concrete) and two different types of steel trusses (Type I and II). The numerical results are also compared with analytical results, assuming the full interaction between steel truss and concrete, neglecting the tensile strength of concrete, considering the effective area of concrete stressed up to the compressive resistance. The design followed the general rules for steel and concrete structures [1-9].

1. Introduction

The prefabricated Composite Steel Truss and Concrete Beams CSTCB are increasingly used in construction. This type of structural solution allows high speed of construction by reducing the construction time on site and economic costs. Since its creation in 1967 by the engineer Salvatore Leone until today, there are a multitude of CSTCB constructive solutions, which differ in several structural aspects, such as cross-sectional, the geometry of the longitudinal section, and the material of the base plate. They are used primarily in Italy, for certain industrial and civil structures, and in particular in building structures.

These beams have the peculiarity of being self-supporting, beams that are capable of safely supporting its own weight and additional loads (other beams or slabs) in its initial stage, without any need for temporary shoring or supports. The aim is to avoid or minimize any type of formwork during construction, eliminating the temporary supports, improving the mobility of workers. The prefabricated composite steel truss and concrete beams CSTCB are made at an early stage in the factory, made with a base plate of steel or concrete according to type and a steel lattice, accompanied by reinforcement (steel rebars). Being the whole encased by concrete to give its end appearance and functionality, see Fig. 1.



Fig. 1: Example of prefabricated CSTCB beam

The CSTCB are characterized by having in the execution process and operation, three different stages which can be identified as: Initial stage S0 corresponding to the construction phase of the prefabricated beam in the factory and transportation to local of implementation; Stage S1 depicted in Fig. 2, is a transition stage in the beam life, without indirect supports for bearing capacity (auxiliary beams, slabs), providing sufficient strength for subsequent concreting loads; Stage S2 depicted in Fig. 3, considers the concrete encasement, providing the final resistance of the beam, without additional longitudinal or transverse reinforcement, except for the case to recover the continuity of CSTCB beams.

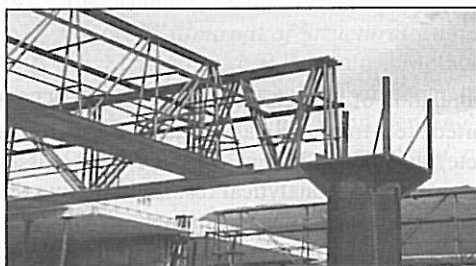


Fig. 2: CSTCB in stage S1

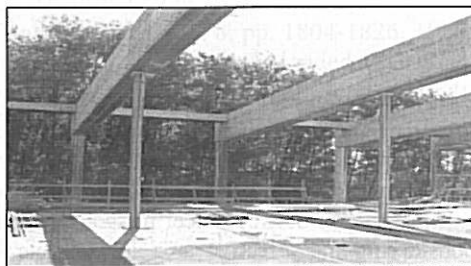


Fig. 3: CSTCB in stage S2

The European standards [1,2,3] do not incorporate any specific section for the design of these special composite beams. There is a recommendation document with some design guide lines [4]. Therefore, there is a needed to develop formulas and recommendations to provide technical assistance to design CSTCB. To this end, in recent years, there have been a large number of experimental investigations and numerical simulations to determine in more detail the mechanisms of resistance and behaviour of CSTCB [5-8].

2. Objectives

The main objective of this study is to present the numerical simulation of the flexural behaviour of twelve CSTCB in stage S1, provided by the ANSYS simulation software [9]. For such work two different plates were considered (steel plate (S) and a concrete plate (C)) with two different types of steel trusses (type I and II). The numerical results are compared with analytical assessment, using the mechanisms of resistance for steel, concrete, and composite, based on formulas of Eurocodes [1,2,3].

This analysis assumes a complete interaction between concrete and steel, neglecting the tensile strength of the concrete, and taking into account the effective area of compressed concrete. The design follows the general rules for steel and concrete structures.

3. Material, geometry and loading

3.1 Material

Two different types of material were considered (steel and concrete). The concrete base plate comprises a normal concrete C30/37. The mechanical properties of the concrete used are presented in Table 1. The C25/30 is normally used to encase the truss in Stage S2.

Table 1: Mechanical properties of concrete [2]

Material	E_{cm} [GPa]	f_{ck} [MPa]	f_{ctm} [MPa]	ϑ
C25/30	31	25	2.6	0.2
C30/37	33	30	2.9	0.2

The steel used for the base plate is hot rolled S235, while the reinforcing steel used in truss consists in a cold formed S400A. The mechanical properties of the steels used are presented below in Table 2.

Table 2: Mechanical properties of steel [2,3].

Material	E_s [GPa]	G [GPa]	f_{yk} [MPa]	F_{uk} [MPa]	ϑ
S235	210	81	235	360	0.3
S400A	210	81	400	420	0.3

3.2 Geometry

To investigate the influence of geometry and elements in CSTCB about the bending resistance mechanisms, two types of sections are proposed, Type I and Type II, composed with a single and double truss respectively. For each of these beams, two different types of plates were also tested: steel plate (S) and concrete plate (C), see Figs.4, 5 and 6.

All beams present common characteristics see Fig.6, such as: the distance for supports, $\psi = 50$ mm; the longitudinal distance between the nodes of the truss, $2\delta = 328$ mm; the angle formed by the diagonal with respect to the base of the beam, $\alpha = 45^\circ$; the angle of the steel truss measured in the transversal plane, $\beta = 90^\circ$ and $\beta = 77^\circ$, for one or two trusses respectively. The total beam height in Stage S2 is represented by h_t .

Having defined the main parameters for transverse and longitudinal sections, the generic cross sections are represented in Figs. 4, 5 and 6.

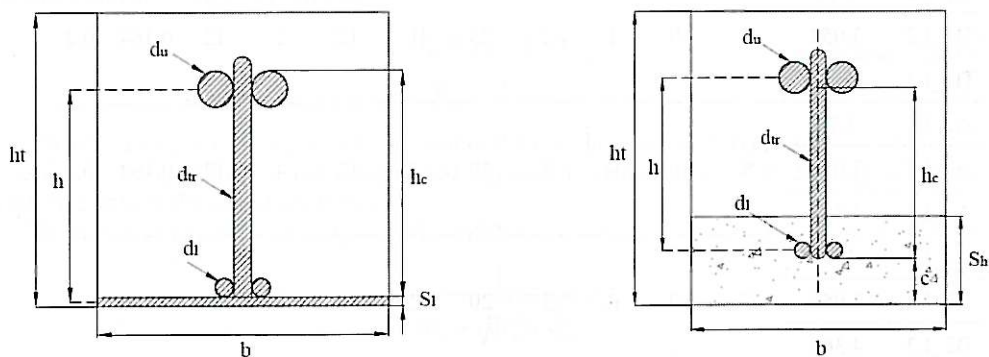


Fig. 4: Geometrical parameters for the cross section with one truss.

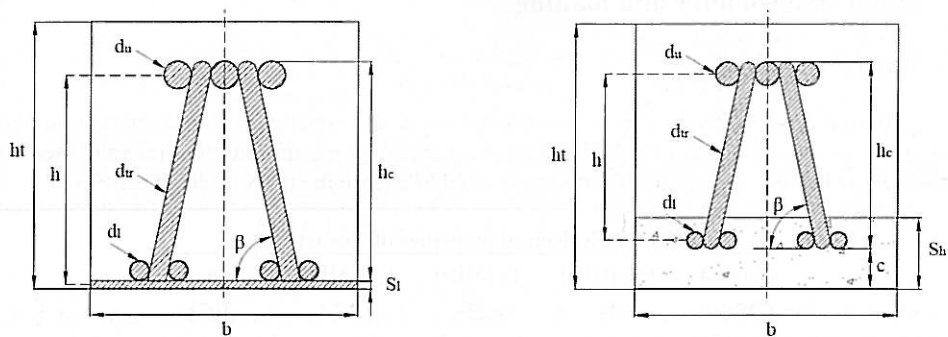


Fig. 5: Geometrical parameters for the cross section with two trusses

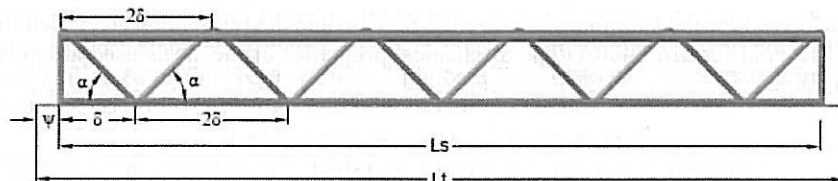


Fig 6: Geometrical parameters for longitudinal section

All tested beams are defined in Table 3, considering the total length of the beam (L_t), the material of the base plate (S,C), the thickness of each plate (S1,Sh), the type of steel truss (I, II), the number of the upper chord of rebars (n_u), the diameter of upper rebar (d_u), the number of trusses (n_{tr}), the diameter of the truss (d_{tr}), the number of the bottom chord of rebars (n_l), the diameter of bottom rebar (d_l), the distance between the top surface of base plate and the top chord of rebars (h_c) and width of plate (b).

Table 3: Geometrical characteristics of each CSTCB

CSTCB	L_t [m]	Base [S,C]	S1,Sh [mm]	Type	n_u	d_u [mm]	n_{tr}	d_{tr} [mm]	n_l	d_l [mm]	h_c [m]	b [m]
A1_L1	1.74											
A1_L2	3.052	S	6	I	2	25	1	12	2	12	0.164	0.2
A1_L3	4.364											
B1_L1	1.74											
B1_L2	3.052	C	69	I	2	25	1	12	2	12	0.164	0.2
B1_L3	4.364											
A2_L1	1.74											
A2_L2	3.052	S	6	II	3	20	2	12	4	12	0.164	0.2
A2_L3	4.364											
B2_L1	1.74											
B2_L2	3.052	C	69	II	3	20	2	12	4	12	0.164	0.2
B2_L3	4.364											

3.3 Loading conditions

The load is distributed along the cross-section at mid span of the beam as represented in Fig. 6. Lateral and vertical displacements were restrained at supports, while the axial displacement was restrained at mid span.

The elastic stability of each CSTCB was verified using a unit load (elastic stability analysis), while an incremental iterative solution was considered to determine the bending resistance (nonlinear geometry and material analysis). The first modes of instability were considered to define the initial imperfection of each beam.

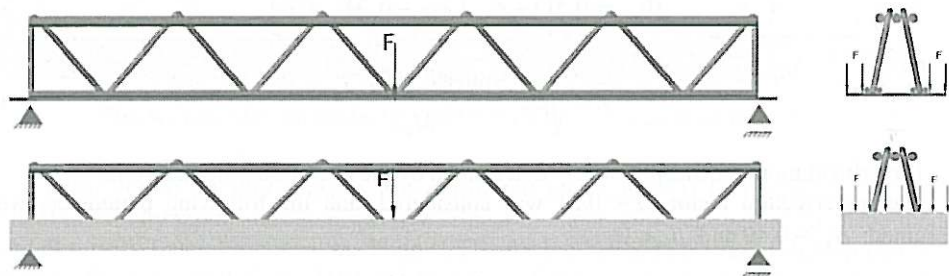


Fig. 7: Loading conditions in CSTCB

4. Bending resistance on stage S1 – analytical method

The ultimate limit state must be verified for each of the bars in prefabricated CSTCB during stage S1. Local and global stabilities may occur and plastic deformations may also be developed during bending.

4.1 Buckling resistance of members

The buckling resistance should be verified, according to Eurocode EN1993-1-1 [1], using the formula proposed by G. Quaranta [5].

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \cdot \min\{W_u, W_t\} \quad (1)$$

Where χ_{LT} represents the reduction coefficient for buckling, W_y represents the minimum plastic moment of Eqs. (2) and (3):

$$W_u = \chi_u \cdot A_u \cdot h \quad (2)$$

$$W_t = A_t \cdot h \quad (3)$$

where: $A_u = n_u \cdot \pi \cdot d_u^2 / 4$, represents the area of the top chord rebar, χ_u represents the reduction coefficient for buckling of the compressed top chord rebars and $A_t = b \cdot S_t$ represents the effective area of the steel base plate.

The next formula is the usually consider in EN1993-1-1.

$$\chi_u = \frac{1}{\Phi_u + \sqrt{\Phi_u^2 - \lambda_u^2}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\Phi_u = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_u - 0,2) \bar{\lambda}_u^2 \right] \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_u = \frac{\lambda_u}{\lambda_t}; \lambda_u = \frac{2\delta}{(d_u/4)}; \lambda_t = \pi \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \quad (6)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (7)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (8)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\beta_w \cdot \frac{\min\{W_u, W_t\} \cdot f_y}{M_{Cr}}} \quad (9)$$

The critical moment was previously determined by the elastic stability analysis.

The imperfection factor $\alpha = 0,21$ was considered, and the following parameters were assumed: $\alpha_{LT} = 0,49$ and $\beta_w = 1$.

4.2 Resistance of the cross section of members

The resistance of the cross section should also be checked to the plastic limit of material, during tension or compression, assuming the hypothetical behaviour of simple truss elements. Eq. 10 is also proposed in EN1993-1-1 [1].

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y \quad (10)$$

Where A represents the cross section of rebars (top chord) or the cross section of the truss members.

4.3 Local buckling resistance of members

Local instability phenomenon may occur in the steel truss. The design may be checked according to EN1993-1-1 [1], considering class 1 cross section for this elements, an imperfection factor $\alpha=0.49$ and a buckling length of 0.75 [1].

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y \quad (11)$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \quad (12)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) \bar{\lambda}^2 \right] \quad (13)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Cr}}} \quad (14)$$

$$N_{Cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{Cr}^2} \quad (15)$$

5. Bending resistance on stage S1 – numerical method

The numerical model was created from three-dimensional concrete finite element SOLID65 and SOLID185 for modelling 3-D steel rebars, steel truss and steel base plate. Hexahedra and tetrahedral finite elements were defined, using three degrees of freedom at each node (translations in each direction). The top and bottom chords of rebars were modelled by an equivalent squared cross section, see Fig. 8.



Fig. 8: Finite element model for CSTCB with concrete base plate (B2_S1_L1)

A linear elastic stability analysis was performed for each CSTCB, looking for the most critical instability mode and the respective critical moment. Different deformed shape modes were observed: Lateral torsional buckling (LTB) for the beam, buckling of the top chords of rebars in the horizontal plane (HB) and buckling of the top chords of rebars in the vertical plane (VB). The main results are presented in table 4. The deformed shape modes for the first instability mode of each CSTCB, is represented in Fig. 9.

The nonlinear, incremental and iterative solution was simulated with two different solvers: Newton Raphson and arc-length method. Newton Raphson used a criterion based in displacement, with a tolerance values equal to 0.08, while the arc-length method used a criterion based in force, with a tolerance value equal to 0.001. The main results are presented in table 5.

Table 4: Critical load and deformed shape modes for elastic stability analysis

CSTCB	Deformed shape mode	Critical load [N]	Mc _r [N.m]
A1_S1_L1	LTB	651744	267215
A1_S1_L2	LTB	210582	155410
A1_S1_L3	LTB	146322	155979
A2_S1_L1	VUB	872670	357795
A2_S1_L2	VUB	444260	327864
A2_S1_L3	LTB	276350	294589
B1_S1_L1	HUB	653940	268115
B1_S1_L2	HUB	289036	213309
B1_S1_L3	HUB	191325	203952
B2_S1_L1	VUB	846960	347254
B2_S1_L2	VUB	497120	366875
B2_S1_L3	VUB	319904	341018

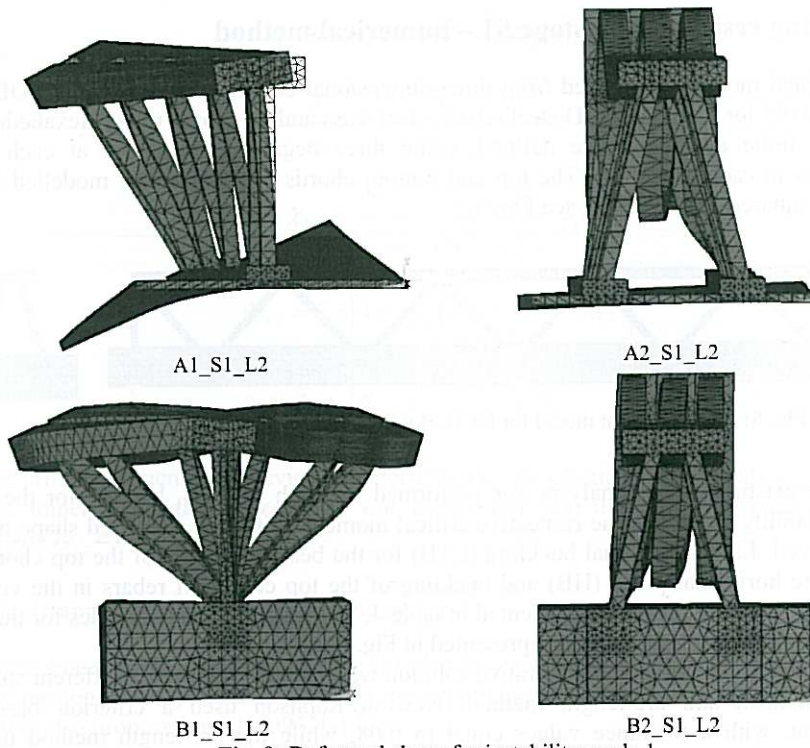


Fig. 9: Deformed shape for instability mode 1

6. Results

6.1 Comparison of numerical and analytical bending resistance

The following table 5 presents the results of the all tested beams, allowing authors to verify the dimensioning formulas, as well as the characteristics of the geometry suitable for CSTB beams.

Table 5: Bending resistance for Stage S1 (Eqs. 1 and 2)

CSTCB	Ls [m]	Mrd Numerical [KN.m]	Mrd Analytical [KN.m]
A1_L1	1.64	29.10	44.44
A1_L2	2.952	45.64	40.60
A1_L3	4.264	53.83	40.63
A2_L1	1.64	51.78	39.78
A2_L2	2.952	59.65	39.43
A2_L3	4.264	59.15	38.99
B1_L1	1.64	35.30	43.71
B1_L2	2.952	46.85	42.30
B1_L3	4.264	56.98	42.00
B2_L1	1.64	57.48	38.98
B2_L2	2.952	65.48	39.19
B2_L3	4.264	63.52	38.91

6.2 Comparison with simple truss member analysis

Table 6 presents the results of simple truss analysis check, regarding the local buckling resistance for the most critical truss members (top chord). The bending resistance was calculated on the basis of the maximum buckling load supported by the most critical compressive element.

Table 6: bending resistance moment

CSTCB	Top chord $N_{b,Rd}$ [kN]	Mrd Analytical [KN.m]
A1_L1		
A1_L2	265,06	43,47
A1_L3		
A2_L1		
A2_L2	250,65	41,11
A2_L3		
B1_L1		
B1_L2	265,06	43,47
B1_L3		
B2_L1		
B2_L2	250,65	41,11
B2_L3		

7. Conclusions

Twelve composite steel truss and concrete beam were analysed during stage S1. For each type and base plate material, three different beam lengths were tested. Two distinct numerical simulations were performed to calculate the elastic critical moment and the bending resistance. For the last simulation case, two different numerical solvers were compared: Newton Raphson and the Arc-length method.

The bending resistance determined by numerical analysis is normally higher when compared with the analytical results, using the general formulas of Eurocodes [1-3], except in some cases. This means that this kind of structural elements may require specific formulae to determine load bearing resistance.

The geometry of the CSTCB should be well verified to prevent the premature local or global failure of the beam. Higher number of steel trusses decreases the possibility of failure by yielding of diagonals.

Failure of CSTCB depends on the length of each beam. Plastic local failures of diagonals were determined for shorter beams and smaller number of trusses. Global failure modes were determined for higher lengths the larger number of trusses.

References

- [1] CEN, EN 1993-1-1, "Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", May 2005.

- [2] CEN, EN 1992-1-1, "Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", December 2004.
- [3] 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.
- [4] ASSOPREM, "Progettare con le travi prefabricate reticulari miste, PREM"- Guida tecnico-operativa per il professionista tecniche nuove, ISBN 978-88-481-2636-6, 2001.
- [5] G. Quaranta, F. Petrone, G.C. Marano, F. Trentadue and G. Monti; "Structural design of composite concrete-steel beams with spatial truss reinforcement elements", Asian journal of civil engineering (building and housing) vol. 12, no 2, pp. 155-178, 2011.
- [6] Trentadue F, Quaranta G, Marano GC, and Monti G.; "Simplified Lateral-Torsional Buckling Analysis in Special Truss-Reinforced Composite Steel-Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000390.
- [7] Leopoldo Tesser, "Composite steel truss and concrete beams and beam-column joints for seismic resistant frames modelling, numerical analysis and experimental verifications"; Phd thesis, Department of Construction and Transport, University of Padova, Italy, February 2009.
- [8] Leopoldo Tesser, Roberto Scotta, "Flexural and shear capacity of composite steel truss and concrete beams with inferior precast concrete base", Engineering Structures, Volume 49, April 2013, Pages 135-145, ISSN 0141-0296, 10.1016/j.engstruct.2012.11.004.
- [9] Ansys INC; ANSYS Academic version, Release 14.1, Help System, 2013.