



albrasci

associação luso-brasileira
para a segurança contra incêndio



6JORNINC

JORNADAS DE SEGURANÇA
AOS INCÊNDIOS URBANOS



1JORPROCIV

JORNADAS DE PROTEÇÃO CIVIL

João Paulo C. Rodrigues
António Moura Correia
Cristina Calmeiro dos Santos

ORGANIZAÇÃO

ALBRASCI . ASSOCIAÇÃO LUSO-BRASILEIRA
PARA A SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO
UNIVERSIDADE DE COIMBRA





UNIVERSIDADE D
COIMBRA



albrasci

associação luso-brasileira
para a segurança contra incêndio

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

1as Jornadas de Proteção Civil

**Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra**

29 e 30 de novembro de 2018

**Atas das Comunicações das 6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
e das 1as Jornadas de Proteção Civil**

**Editores: João Paulo Correia Rodrigues
António Moura Correia
Cristina Calmeiro dos Santos**

**Primeira edição
novembro, 2018**

Copyright © 2018 João Paulo C. Rodrigues

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita do editor.

ISBN: 978-989-96461-9-3

Edição:

ACIV – Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil

PREFÁCIO

A Segurança Contra Incêndio de Edifícios (SCIE) tem uma importância vital na vida das sociedades, pois está em jogo não só a vida das pessoas como também interesses diversos tais como, por exemplo, os bens patrimoniais, os valores históricos e arquitectónicos com forte simbolismo e, ainda, a continuidade de serviços estratégicos para a sociedade em geral. Contudo, apesar da sua importância, trata-se duma área que ainda não tem uma consolidação efetiva no nosso País, quer ao nível do ensino quer do projeto e da construção, apesar da profusão de regulamentação existente, dos vários projetos de investigação e dos cursos que têm sido realizados. Esta é, por outro lado, uma área em que existe ainda muito conhecimento empírico, adquirido ao longo de anos de contatos com incêndios reais, experiências e exercícios diversos, em que o progresso dos conhecimentos científicos tem sido lento, fruto da sua complexidade e interdisciplinaridade.

No entanto, Portugal tem conhecido, nos últimos anos uma evolução assinalável quer no domínio do ensino quer no domínio legislativo. A concretização de programas de mestrado e doutoramento nesta área, para além da publicação de nova legislação nacional e europeia, em paralelo com outras ações, deram à SCIE uma visibilidade que até agora não tinha. As partes dos Eurocódigos de dimensionamento ao fogo das estruturas em conjunto com a regulamentação nacional constitui hoje um diferencial positivo que permite a construção de edificações mais seguras em relação ao incêndio.

As Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos (JORNINC) começaram em 2006, aquando da realização do primeiro Mestrado em Segurança Contra Incêndios Urbanos na Universidade de Coimbra e estão atualmente na sua 6ª edição. Estas Jornadas têm constituído um fórum de discussão dos problemas da área, mas também das evoluções tanto ao nível da regulamentação como também das novas tecnologias.

Este ano realizam-se também em paralelo com as 6JORNINC, as 1^{as} Jornadas em Proteção Civil (1JORPROCIV) que pretendem também elas constituir um fórum de discussão dos problemas e dos novos desenvolvimentos da área. Estas Jornadas realizar-se-ão a cada dois anos em conjunto com as JORNINC pretendendo reunir investigadores, técnicos e demais pessoas interessadas na área.

Para finalizar queria desejar-lhe as boas vindas a estas Jornadas e à UC e espero que este evento seja do seu maior interesse para si, sedimentando o seu conhecimento técnico e científico, e que também permita estabelecer novos contatos com outras pessoas da área.

João Paulo Correia Rodrigues

(Professor de Enga. Civil e de Enga. de Segurança ao Incêndio da UC)

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

Comissões

Comissão Organizadora

Aline Lopes Camargo - (Universidade de Coimbra)
Amarildo Benzane - (Universidade de Coimbra)
António Moura Correia - (Instituto Superior de Engenharia de Coimbra)
Cristina Calmeiro dos Santos - (Instituto Politécnico de Castelo Branco) (Co-coordenadora)
Débora Ferreira - (Instituto Politécnico de Bragança)
Hugo Caetano - (Universidade de Coimbra)
João Paulo Correia Rodrigues - (Universidade de Coimbra) (Coordenador)
João Viegas - (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
José Pedro Lopes - (Autoridade Nacional de Proteção Civil)
Nuno Lopes - (Universidade de Aveiro)
Rúben Lopes - (Universidade de Coimbra)
Thiago Brazeiro - (Universidade de Coimbra)

Comissão Científica

Alexandre de Oliveira Tavares (Universidade de Coimbra)
Aldina M. da Cruz Santiago (Universidade de Coimbra)
António Leça Coelho (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
António Moura Correia (Instituto Politécnico de Coimbra)
Carlos Ferreira de Castro (Action Modulers)
Carlos Pina dos Santos (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Carlos Sousa Oliveira (Universidade de Lisboa)
Cristina Calmeiro dos Santos (Instituto Politécnico de Castelo Branco)
Débora Ferreira (Instituto Politécnico de Bragança)
Domingos Xavier (Universidade de Coimbra)
Elza Fonseca (Instituto Politécnico de Bragança)
Fernando Pedro S. da S. D. Simão (Universidade de Coimbra)
José Carlos M. Góis (Universidade de Coimbra)
João Carlos Viegas (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
João Paulo Correia Rodrigues (Universidade de Coimbra) (Coordenador)
João Ramôa Correia (Universidade de Lisboa)
José Luís Zêzere (Universidade de Lisboa)

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

Lino Forte Marques (Universidade de Coimbra)
Luciano Fernandes Lourenço (Universidade de Coimbra)
Luís Mesquita (Instituto Politécnico de Bragança)
Miguel Chichorro Gonçalves (Universidade do Porto)
Nuno Lopes (Universidade de Aveiro)
Paulo A. G. Piloto (Instituto Politécnico de Bragança)
Paulo Jorge M. F. Vila Real (Universidade de Aveiro)
Paulo Lourenço (Universidade do Minho)
Pedro Coelho (Universidade de Lisboa)
Rui Faria (Universidade do Porto)

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

Índice

Prefácio	iii
Comissões	v
Índice	vii

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

SESSÃO 1 – REGULAMENTAÇÃO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

PALESTRA I - Incêndios Florestais e de Interface

Domingos Xavier Viegas

.....	3
-------	---

O IMPACTO DO INCÊNDIO DE PEDRÓGÃO GRANDE NAS ESTRUTURAS

Luís Ribeiro, André Rodrigues, Davi Lucas, Domingos Xavier Viegas

.....	5
-------	---

HARMONIZAÇÃO DOS REQUISITOS REGULAMENTARES REFERENTES A MEIOS DE SEGUNDA INTERVENÇÃO PARA COMBATE A INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS

Ana Sousa, Tiago Ribeiro, Nuno Henriques, Nuno Serra

.....	13
-------	----

PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM UMA ANÁLISE DE RISCO DE INCÊNDIO BASEADO NO DESEMPENHO

António B. Leiras, João Paulo C. Rodrigues

.....	21
-------	----

A REGULAMENTAÇÃO DE SCIE PORTUGUESA E O REFERENCIAL FRANCÊS

Paulo Ramos, João Paulo C. Rodrigues

.....	29
-------	----

REVISÃO DA LEGISLAÇÃO NACIONAL E INTERNACIONAL NA ÁREA DA SEGURANÇA AO INCÊNDIO E ANÁLISE DA SUA ADEQUAÇÃO À REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS EM NÚCLEOS URBANOS ANTIGOS

Tiago Miguel Ferreira, A. Leça Coelho, José Domingues

.....	37
-------	----

A IMPORTÂNCIA DOS OBJETIVOS FUNCIONAIS NOS REGULAMENTOS DE SCIE

Paulo Ramos, João Paulo C. Rodrigues

.....	45
-------	----

SESSÃO 2 – MATERIAIS A ALTAS TEMPERATURAS

CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE PLACAS DE SILICATO DE CÁLCIO A TEMPERATURAS ELEVADAS: UMA ABORDAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Thiago Oliveira, Thiago Alves, Luís M. R. Mesquita

.....	51
-------	----

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

RESISTÊNCIA TERMOMECÂNICA EM REGIME ESTACIONÁRIO DE PROVETES DE TERRA COMPRIMIDA Diogo Lima, Edgar Soares, Débora Ferreira, Luís Mesquita, Tiago Miranda e Dinis Leitão	61
COMPORTAMENTO AO FOGO DE BLOCOS ECOLÓGICOS DE SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS Débora Ferreira, Eduarda Luso, Maria Lurdes Cruz, Eduarda Nepomuceno	67
CARACTERIZAÇÃO DE TERMOMECÂNICA DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS: O ESTADO DE ARTE Rafael Luiz Oliveira, João Paulo Rodrigues, João M. Pereira	77
AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E DA REAÇÃO AO FOGO DE PAINÉIS DE DERIVADOS DE MADEIRA Lucas Coimbra Ferle, Gerson H. Dos Santos, Luís Mesquita	85
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DE CERÂMICAS REFRAATÓRIAS: ESTADO DA ARTE Rafael Luiz Oliveira, João Paulo Rodrigues, João M. Pereira	93
SESSÃO 3 – ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	
PALESTRA II- LIGHT STEEL FRAMED WALLS MADE WITH COMPOSITE PANELS UNDER FIRE CONDITIONS Paulo Piloto	103
RESISTÊNCIA AO FOGO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE PERFIS ESBELTOS EM AÇO INOXIDÁVEL Nuno Lopes, Carlos Couto, Jorge Azevedo, Paulo Vila Real	125
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LIGAÇÕES MADEIRA-AÇO (W-S-W), METODOLOGIAS DE CÁLCULO ANALÍTICA E COMPUTACIONAL Fernando Miranda, Elza M M Fonseca, Jorge L N Góes	133
NOVA PROPOSTA DE CÁLCULO PARA VIGAS-COLUNA EM AÇO ENFORMADAS A FRIO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO Flávio Arrais, Nuno Lopes, Paulo Vila Real	143
PARTIALLY ENCASED COLUMNS: STRENGTH AND STIFFNESS EFFECT ON THE BUCKLING RESISTANCE UNDER FIRE Paulo A. G. Piloto, Bruno F. Alfredo, Diego R. Rossetto	151

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

REHABILITATION OF FIRE DAMAGED BUILDINGS

António Rubens R. A. Junior, João Paulo C. Rodrigues, Joaquim Carlos P. de Almeida

.....161

FIRE RESISTANCE OF COMPOSITE SLABS WITH PROFILED STEEL DECKING: TRAPEZOIDAL AND RE-ENTRANT NUMERICAL SIMULATION

Paulo A. G. Piloto, Lucas M.S. Prates, Carlos Balsa, Ronaldo Rigobello

.....169

SESSÃO 4 – SISTEMAS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

IMPACTE DAS DIFERENÇAS DE PRESSÃO GERADAS PELO CONTROLO DE FUMO EM TÚNEIS

João Viegas, Oliveira Costa, Bernardo Monteiro, Paulo Pereira

.....181

SISTEMAS DE CONTROLO DE FUMO PASSIVOS – UMA PROPOSTA PARA A REVISÃO DO REGULAMENTO TÉCNICO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS

Ana Sousa, Tiago Ribeiro, Nuno Henriques, Nuno Serra

.....193

ALTERAÇÕES NA MICROESTRUTURA DE BETÕES FIBROSOS DE ALTA RESISTÊNCIA SUJEITOS A TEMPERATURAS ELEVADAS

Hugo Caetano, João P.C. Rodrigues

.....203

INTEGRAÇÃO DAS REDES PREDIAIS DE COMBATE A INCÊNDIO NO NOVO REGULAMENTO GERAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Armando Silva Afonso, Carla Pimentel-Rodrigues

.....211

FERRAMENTA BIM PARA VERIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE NORMAS TÉCNICAS (CODE CHECKING) RELACIONADAS ÀS SAÍDAS DE EMERGÊNCIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Marcelo Porto, José Franco, Renata Baracho, Lucas Alves, Isis Kroeff, Karina Oliveira

.....219

1as Jornadas de Proteção Civil

SESSÃO 5 – PROTEÇÃO CIVIL

PALESTRA III - Desastres Naturais e seus Planos de Contingência

José Luís Zêzere

.....229

DETERMINAÇÃO DA SEVERIDADE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS COM RECURSO IMAGENS SENTINEL-2

José Gaspar, Jorge Pereira

.....239

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO WILDFIRE ANALYST NO PLANEAMENTO DO COMBATE AOS INCÊNDIOS FLORESTAIS

José Gaspar, Tiago Marinho, Verónica Catarino

.....249

ANÁLISE BASEADA NO DESEMPENHO À EFICÁCIA DAS ORGANIZAÇÕES DE RESPOSTA A EMERGÊNCIAS EM EDIFÍCIOS E RECINTOS

António B. Leiras, João Paulo C. Rodrigues

.....257

ANÁLISE DA PERCEÇÃO DE RISCO DA COMUNIDADE DO FRADE, PARA UMA EMERGÊNCIA NA CENTRAL NUCLEAR ALMIRANTE ÁLVARO ALBERTO

Alexandre Ribeiro

.....265

CONTRIBUIÇÃO PARA A RESILIÊNCIA DA COMUNIDADE ACADÉMICA EM CASO DE SISMO E INCÊNDIO

Ângela Santos, Margarida Queirós

.....275

A AVALIAÇÃO DO RISCO DE INCÊNDIO E OS PLANOS MUNICIPAIS DE EMERGÊNCIA – UM ESTUDO APLICADO A COIMBRA

Marta Ribeiro, João Paulo C: Rodrigues

.....279

SESSÃO 6 – GESTÃO DA EMERGÊNCIA

ANÁLISE CRÍTICA DE MÉTODOS E MODELOS DE ANÁLISE DE RISCO DE INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS. SUAS POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES

António Leça Coelho, Tiago Miguel Ferreira

.....293

INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS NA CIDADE DA BEIRA - MOÇAMBIQUE

Nádia Farinha, Cristina Calmeiro dos Santos

.....301

ANÁLISE DOS DANOS EM ESTABELECIMENTOS INDUSTRIAIS CAUSADOS POR INCÊNDIOS RURAIS: CASO DO INCÊNDIO DE OUTUBRO 2017 NA REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL

Hadassa Lima, José Góis, Miguel Almeida

.....315

ROBÔS PARA DETEÇÃO E COMBATE A INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS

Carolina Conceição, Lino Marques

.....325

SESSÃO 7 – RISCO DE INCÊNDIO E EVACUAÇÃO

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

PALESTRA IV- O Sistema Nacional de Proteção Civil

José Pedro Lopes

.....335

ANÁLISE DO RISCO DE INCÊNDIO DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE PAPEL – GRUPO PORTUCEL SOPORCEL

António Correia, Pedro Tavares, José Correia, João Pereira

.....355

INFLUÊNCIA DO EFETIVO NO TEMPO DE EVACUAÇÃO DUM BLOCO DE URGÊNCIAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Amarildo Benzane, Luís Laím, João Paulo Rodrigues

.....365

FENÓMENOS DE INSTABILIDADE E MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ENCOSTAS APÓS INCÊNDIOS FLORESTAIS. CASO PARTICULAR DOS INCÊNDIOS DE OUTUBRO DE 2017 NA SERRA DA ESTRELA

Luís Araújo Santos, António Correia, Paulo Coelho

.....375

O USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS NA MONITORIZAÇÃO EM TEMPO REAL DA FLORESTA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

António Correia, Luís Santos, Paulo Carvalho, José Martinho

.....385

SEGURANÇA CONTRA INCENDIO E EXPLOSÕES NO TRANSPORTE E ARMAZENAGEM DE GÁS NATURAL EM PORTUGAL

Collete Pereira, José Góis

.....395

O QUE CORREU MAL NOS MEGAINCÊNDIOS DE 2017 EM PORTUGAL: ANÁLISE DOS RELATÓRIOS DAS COMISSÕES TÉCNICAS INDEPENDENTES E DO CENTRO DE ESTUDOS DE INCÊNDIOS FLORESTAIS - UC

Susana Meneses, António Correia, Ana Ferreira, Alexandra Ribeiro

.....405

APLICAÇÃO DO REGULAMENTO JURÍDICO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS DE EDIFÍCIOS E DO REGULAMENTO TÉCNICO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS DE EDIFÍCIOS A EDIFÍCIOS EXISTENTES – MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

Ana Laranjeiro Matias

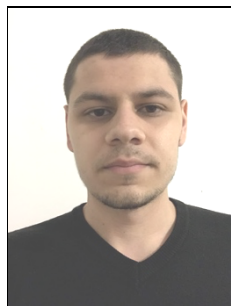
.....413

Índice de Autores.....419

**PARTIALLY ENCASED COLUMNS: STRENGTH AND STIFFNESS EFFECT ON THE
BUCKLING RESISTANCE UNDER FIRE**



Paulo A. G. Piloto¹
Professor
IPB-Bragança



Bruno F. Alfredo
Researcher
IPB-Bragança
UTFPR–Pato Branco



Diego R. Rossetto
Professor
UTFPR–Pato Branco

ABSTRACT

Partially encased columns are made of composite steel and concrete between flanges. The temperature field and time evolution in each material is required to determine the fire resistance. The annex G of the Eurocode 4 part 1-2, presents a simplified calculation method, using the balanced summation model for the calculation of the plastic resistance to axial compression and the effective flexural stiffness. Previous studies revealed unsafe results when using the annex G of the Eurocode 4. New proposals are being developed for the calculation of the strength and stiffness for the four components (flanges, web, concrete and reinforcing bars). New improvements are proposed for the balanced summation model, based on the nonlinear thermal numerical solution method, presenting safer values.

KEY-WORDS: Fire; Eurocode 4; Balanced summation model; Partially encased columns; Numerical simulation.

1. INTRODUCTION

Partially encased columns (PEC) are normally made of hot rolled steel profiles, reinforced with concrete between the flanges, see figure 1. The fire buckling resistance of PEC can be determined by a simple calculation method (annex G of Eurocode 4 part 1-2 [1]), using the balanced summation model. This model requires the calculation of the plastic resistance to axial compression and the effective flexural stiffness of four components (flanges, web, concrete and reinforcing bars), to determine the buckling resistance of PEC when exposed to standard fire, ISO834 [2].

¹ Corresponding author – Polytechnic Institute of Bragança, Dep. of Applied Mechanics, Campus Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal
email: ppiloto@ipb.pt <http://www.ipb.pt>

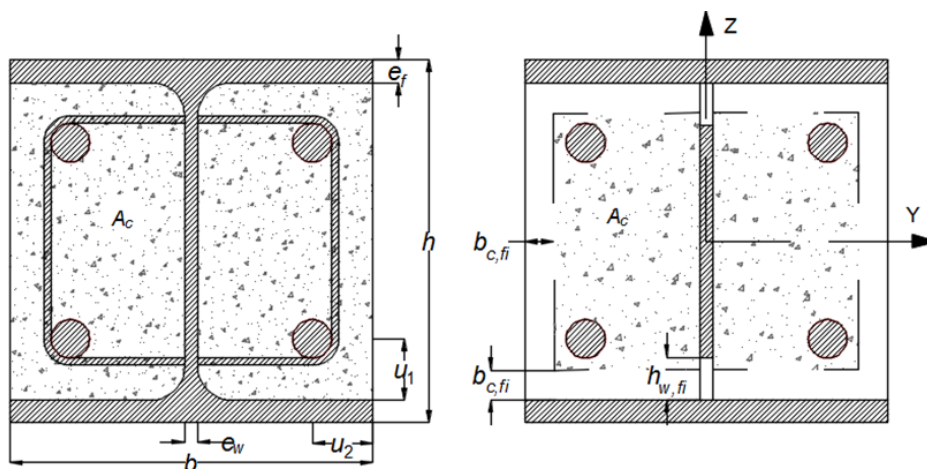


Figure 1: Partially encased column parameters and balanced summation model.

Abdelkadir Fellouh [3], concluded for some unsafe results when using the current version of the annex G, proposing a new solution formulae based on the numerical results. This solution formulae was improved and refined by Leonardo Calió [4], using new parameters and modifying the calculation model for the web strength and stiffness applied to IPE and HEB profile sections.

This study presents the thermal analysis of 30 different PEC, made by HEB, HD and UC cross sections, showed in table 1, comparing the numerical results with the current version of annex G [1] and improving the solution model for the fire rating classes R30, R60, R90 and R120. The PEC was designed according with the field of application, proposed for the balanced summation model, presented in the EN1994-1-2 annex G [1], in agreement with de minimum and maximum dimensions (h, b) for each class of fire resistance. The cross section HEB ranges from 240 to 900, while the cross section HD ranges from 260 to 400 and finally the cross section UC ranges from 254 to 356. The cross section dimensions were selected to present a wide range of variation for the value of the section factor, taking into to consideration each PEC exposed to fire form four sides.

The materials used to compose the composite column are a structural steel profile S355 partially encased with concrete C20/25, using reinforcing bars B500, all the mechanical and thermal proprieties affected by the temperature, according to reduction factors presents in EN1994-1-2 [1].

Table 1: Section properties.

Profiles	h [mm]	b [mm]	e_w [mm]	e_f [mm]	A_m/V [m ⁻¹]	Nº of bars	ϕ [mm]	u [mm]
HEB 240	240,0	240,0	10,0	17,0	16,67	4	20	50
HEB 260	260,0	260,0	10,0	17,5	15,38	4	25	50
HEB 280	280,0	280,0	10,5	18,0	14,29	4	25	50
HEB 300	300,0	300,0	11,0	19,0	13,33	4	25	50
HEB 340	340,0	300,0	12,0	21,5	12,55	4	32	50
HEB 450	450,0	300,0	14,0	26,0	11,11	4	32	50
HEB 500	500,0	300,0	14,5	28,0	10,67	4	32	50
HEB 600	600,0	300,0	15,5	30,0	10,00	4	32	50
HEB 700	700,0	300,0	17,0	32,0	9,52	4	32	50
HEB 900	900,0	300,0	18,5	35,0	8,89	4	40	50
HD 260x54,1	244,0	260,0	6,5	9,5	15,89	4	25	50
HD 260x142	278,0	265,0	15,5	26,5	14,74	4	25	50
HD 260x225	309,0	271,0	24,0	42,0	13,85	4	25	50
HD 320x127	320,0	300,0	11,5	20,5	12,92	4	25	50
HD 320x300	375,0	313,0	27,0	48,0	11,72	4	25	50
HD 400x237	380,0	395,0	18,9	30,2	10,33	4	32	50

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

HD 400x382	416,0	406,0	29,8	48,0	9,73	4	32	50
HD 400x551	455,0	418,0	42,0	67,6	9,18	4	32	50
HD 400x818	514,0	437,0	60,5	97,0	8,47	4	32	50
HD 400x1299	600,0	476,0	100,0	140,0	7,54	4	32	50
UC 254x254x73	254,1	254,6	8,6	14,2	15,73	4	25	50
UC 254x254x132	276,3	261,3	15,3	25,3	14,89	4	25	50
UC 305x305x97	307,9	305,3	9,9	15,4	13,05	4	25	50
UC 305x305x137	320,5	309,2	13,8	21,7	12,71	4	25	50
UC 305x305x198	339,9	314,5	19,1	31,4	12,24	4	25	50
UC 356x368x129	355,6	368,6	10,4	17,5	11,05	4	32	50
UC 356x368x177	368,2	372,6	14,4	23,8	10,80	4	32	50
UC 356x406x340	406,4	403,0	26,6	42,9	9,88	4	32	50
UC 356x406x744	498,0	432,0	55,6	88,9	8,65	4	32	50
UC 356x406x1086	569,0	454,0	78,0	125,0	7,92	4	32	50

2. BALANCED SUMMATION MODEL – EN1994-1-2 ANNEX G

The balanced summation model was originally developed by Jungbluth [5], to determine the loadbearing capacity of PEC under fire, dividing the cross section in four components. The current model presented in the annex G [1] uses the sum of the four components, using weighting factors for the effective flexural stiffness ($\varphi_{f,\theta}$, $\varphi_{w,\theta}$, $\varphi_{c,\theta}$ and $\varphi_{s,\theta}$) as shown in equation (1) and the sum of plastic resistance to axial compression, equation (2), to determine the fire buckling resistance of PEC. In the following formulae the four components of PEC are identified with, “f” for flanges, “w” for web, “c” for concrete and “s” for the reinforcing bars.

$$N_{fi,pl,Rd} = N_{fi,pl,Rd,f} + N_{fi,pl,Rd,w} + N_{fi,pl,Rd,c} + N_{fi,pl,Rd,s} \quad (1)$$

$$(EI)_{fi,eff,z} = \varphi_{f,\theta} (EI)_{fi,f,z} + \varphi_{w,\theta} (EI)_{fi,w,z} + \varphi_{c,\theta} (EI)_{fi,c,z} + \varphi_{s,\theta} (EI)_{fi,s,z} \quad (2)$$

In the current model, the average flanges temperature is obtained using equations with empirical factors and depending on the section factor. The yield stress and elastic modulus are affected by temperature reduction factors. The geometry of the web is reduced, based on empirical factors. The yield stress is reduced using an indirect parameter, leaving the elastic modulus not affected by temperature. The concrete has its temperature calculated using a table based on the section factor, for each class of fire resistance. Part of the concrete geometry is neglected using the same distance in the both directions and the mechanical properties are affected by temperature. The reinforcing bars have the mechanical properties affected by temperature, using reduction factors for each size of concrete cover layer “u”, obtained by the geometrical mean of “u₁” and “u₂”. The material safety factors $\gamma_{M,fi,a}$, $\gamma_{M,fi,c}$ and $\gamma_{M,fi,s}$ for the structural steel, concrete and reinforcing steel, are assumed equal to 1,0.

3. ADVANCED CALCULATION METHOD

The advanced calculation method was developed by the software ANSYS to evaluate the temperature field in the cross section of each PEC, after being exposed to standard fire ISO834 [2]. The software uses the finite element method to solve the equation (3) into the domain (Ω) and the equation (4) in the boundary ($\partial\Omega$).

$$\nabla(\lambda_{(T)} \cdot \nabla T) = \rho_{(T)} \cdot C_{p(T)} \cdot \partial T / \partial t \rightarrow (\Omega) \quad (3)$$

$$\lambda_{(T)} \cdot \nabla T \cdot \vec{n} = \alpha_c (T_a - T) + \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_a^4 - T^4) \rightarrow (\partial\Omega) \quad (4)$$

In these equations: $\lambda_{(T)}$ represents the thermal conductivity, $\rho_{(T)}$ defines the specific mass, $C_{p(T)}$ defines the specific heat, T represents the temperature of each material, T_g defines the gas temperature of the fire compartment, α_c defines the convective coefficient, ϕ defines the view factor, ε_f and ε_m defines the emissivity of fire and material

respectively and σ specifies the Stephan-Boltzmann constant. The standard fire curve ISO834 [2] is assumed to be applied around the four sides of PEC, the material properties were considered temperature dependent according to EN1994-1-2 [1] and the parameters for the fire effect, were defined according to EN1991-1-2 [6].

The nonlinear transient thermal analysis was used with the finite element "PLANE55". This element uses four nodes with one degree of freedom in each node (temperature) with linear interpolation functions. Perfect contact was assumed between materials and components. All the finite element models have the maximum size elements, approximately, equal to 1,67 mm. The results obtained with the advanced calculation method, figure 2, use the arithmetic average nodal temperature for the calculation of the average temperature components and the neglected the concrete layer, according to the 500 °C isothermal criterion [7].

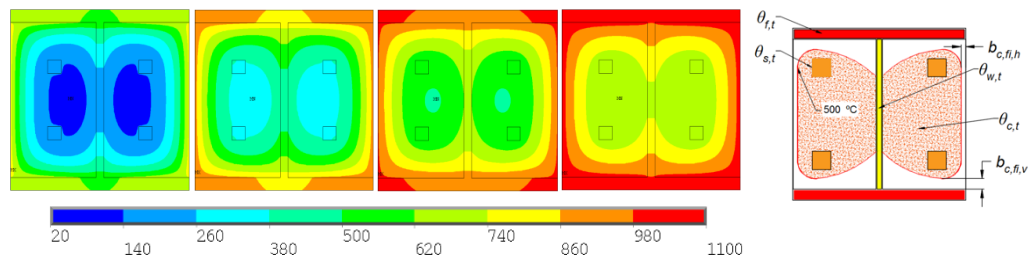


Figure 2: Temperature distribution in four times of resistance and results obtained.

4. IMPROVED MODEL

Taking into consideration the previous investigation related with this subject [3-4], this study presents an improvement to all the four components. This new improvement neglects the web reduction area and proposes the average temperature of all the web region. The temperature effect on the material properties (yield stress and elastic modulus) is used to estimate the new axial resistance and the effective flexural stiffness in this component. The 500 °C isothermal criterion was used for the concrete, [7], proposing a different reduction in each principal direction of the cross section. New formulae are proposed for the calculation of the average temperature, based on some geometrical factors. Table 2 presents the improved equations for the average flange and web temperature, with its respective parameters for each series of profile.

Table 2: New formulae and parameters for average flanges and web temperature.

$\theta_{f,t} = \theta_{0,t} + k_{f,f}(\epsilon_f) + k_{t,f} (A_m/V)$									
	HEB			HD			UC		
Standard Fire Resistance	$\theta_{0,f}$ [°C]	$k_{f,f}$ [mm ⁻¹ °C]	$k_{t,f}$ [m°°C]	$\theta_{0,f}$ [°C]	$k_{f,f}$ [mm ⁻¹ °C]	$k_{t,f}$ [m°°C]	$\theta_{0,f}$ [°C]	$k_{f,f}$ [mm ⁻¹ °C]	$k_{t,f}$ [m°°C]
R30	687	-4,50	3,43	463	-2,00	16,91	659	-2,89	4,07
R60	909	-3,76	2,06	785	-1,90	8,73	887	-2,42	2,10
R90	971	-1,38	1,42	965	-1,80	3,29	995	-2,06	1,25
R120	1018	-0,89	1,37	1063	-1,55	0,53	1058	-1,51	0,06
$\theta_{w,t} = \theta_{0,w} + k_{w,w} (1/\epsilon_w) + k_{t,w} (A_m/V)$									
Standard Fire Resistance	$\theta_{0,w}$ [°C]	$k_{w,w}$ [mm°°C]	$k_{t,w}$ [m°°C]	$\theta_{0,w}$ [°C]	$k_{w,w}$ [mm°°C]	$k_{t,w}$ [m°°C]	$\theta_{0,w}$ [°C]	$k_{w,w}$ [mm°°C]	$k_{t,w}$ [m°°C]
R30	-159	2500	14	-83	-480	30	-60	-170	26
R60	-233	4170	23	15	-810	40	47	-850	37
R90	-221	4900	29	126	-1120	44	127	-1160	44
R120	-186	5500	31	233	-1100	45	239	-1300	45

The reduction of the mechanical properties is made by the average flange and web temperature, using the reduction factors presented in EN1994-1-2 [1]. The equation (5) presents the calculation of the plastic resistance to axial

*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
 1as Jornadas de Proteção Civil
 Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

compression and effective flexural stiffness for the flanges and equation (6) the same for the web, without any geometry reduction.

$$N_{fi,pl,Rd,f} = 2(b e_f f_{ay,f,t}) / \gamma_{M,fi,a} \text{ and } (EI)_{fi,f,z} = E_{a,f,t} (e_f b^3) / 6 \quad (5)$$

$$N_{fi,pl,Rd,w} = [e_w (h - 2e_f) f_{ay,w,t}] / \gamma_{M,fi,a} \text{ and } (EI)_{fi,w,z} = [E_{a,w,t} (h - 2e_f) e_w^3] / 12 \quad (6)$$

Figure 3 depicts the average flange (left) and web (right) temperature, depending on the section factor for each PEC and for each class of fire resistance.

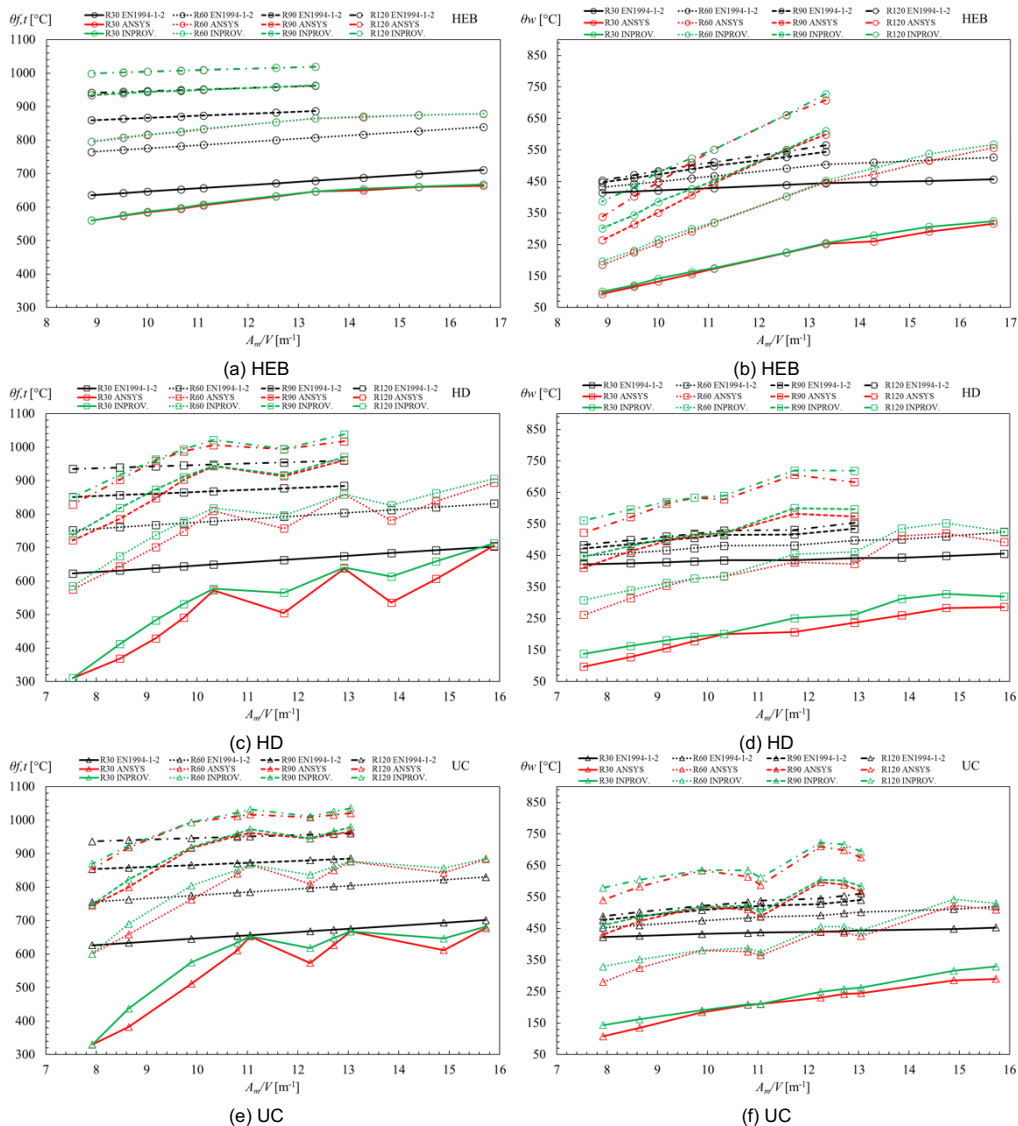


Figure 3: Comparison between EN1994-1-2, ANSYS and Improvement for average flanges temperature (a,c,e) and average web temperature (b,d,f).

The images show the results of the simplified calculation method (EN1994-1-2), the results for advanced calculation method (ANSYS) and the results for the Improvement model (IMPROV.). The EN1994-1-2 [1] presents conservative temperatures for the class of fire resistance R30 and unsafe temperatures for certain cross sections for other fire ratings.

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
Las Jornadas de Proteção Civil
Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

The average temperature of concrete and reinforcing bars requires a new formulae and new parameters according to table 3. The 500 °C isothermal criterion was used to determine de maximum temperature and the region of concrete to be neglected. The thermal behaviour of the reinforcing bars depends on its geometric position “*u*”. The vertical “*b_{c,fi,v}*” and horizontal “*b_{c,fi,h}*” reduction of the concrete is present in table 4.

Table 3: New formulae and parameters for average concrete and reinforcing bars temperature.

$$\theta_{c,t} = \theta_{0,c} + k_{w,c}(1/e_w) + k_{t,c}(A_m/V)$$

$$\theta_{s,t} = \theta_{0,s} + k_{t,s}(A_m/V), \text{ for } u = 50 \text{ mm}$$

Standard Fire Resistance	HEB			HD			UC			HEB/HD/UC <i>u = 50 mm</i>	
	$\theta_{0,c}$ [°C]	$k_{w,c}$ [mm°C]	$k_{t,c}$ [m°C]	$\theta_{0,c}$ [°C]	$k_{w,c}$ [mm°C]	$k_{t,c}$ [m°C]	$\theta_{0,c}$ [°C]	$k_{w,c}$ [mm°C]	$k_{t,c}$ [m°C]	$\theta_{0,s}$ [°C]	$k_{t,s}$ [m°C]
R30	29	-230	14,8	4	-255	16,8	9	-154	15,9	67	5,19
R60	-6	-950	30,5	20	-600	27,3	16	-660	27,5	151	14,23
R90	-3	1355	22,2	60	-700	32,5	54	-822	32,8	250	18,53
R120	35	2140	19,4	129	-1077	33,8	134	-867	31,9	336	20,82

Table 4: New formulae and parameters for vertical and horizontal reduction of concrete.

$$b_{c,fi,v} = b_{0,cv} + k_{f,cv}(e_f) + k_{t,cv}(A_m/V)^2$$

Standard Fire Resistance	HEB			HD			UC		
	$b_{0,cv}$ [mm]	$k_{f,cv}$	$k_{t,cv}$ [m ² mm]	$b_{0,cv}$ [mm]	$k_{f,cv}$	$k_{t,cv}$ [m ² mm]	$b_{0,cv}$ [mm]	$k_{f,cv}$	$k_{t,cv}$ [m ² mm]
R30	-0,96	0,08	0,025	-1,45	0,01	0,045	3,40	-0,03	0,022
R60	12,46	0,06	0,062	14,11	-0,10	0,068	17,50	-0,13	0,061
R90	-75,80	2,39	0,435	19,00	-0,10	0,200	13,00	-0,10	0,250
R120	-208,00	5,40	1,120	-11,00	0,04	0,650	25,00	-0,09	0,380

$$b_{c,fi,h} = b_{0,ch} + k_{w,ch}(1/e_w) + k_{t,ch}(A_m/V)$$

Standard Fire Resistance	$b_{0,ch}$ [mm]	$k_{w,ch}$	$k_{t,ch}$ [m ² mm]	$b_{0,ch}$ [mm]	$k_{w,ch}$	$k_{t,ch}$ [m ² mm]	$b_{0,ch}$ [mm]	$k_{w,ch}$	$k_{t,ch}$ [m ² mm]
	R30	11,68	0	0,000	11,68	0	0,000	11,68	0
R60	25,40	-102	0,050	22,00	-10	0,026	21,90	-13	0,026
R90	43,10	-636	0,300	26,60	-85	0,135	26,60	-60	0,120
R120	39,60	-1000	0,690	26,60	-189	0,300	29,80	-114	0,240

The equations (7) and (8) present the formulae for the calculation of the plastic resistance to axial compression and the calculation of the effective flexural stiffness, for the concrete and the reinforcing bars respectively. Figure 4 depicts the average temperature of concrete (left) and the average temperature of reinforcing bars (right), allowing to identify unsafe and conservative results of EN1994-1-2 [1].

$$N_{fi,pl,Rd,c} = 0,86 \{((h - 2e_f - 2b_{c,fi,v})(b - e_w - 2b_{c,fi,h}) - A_s) f_{c,\theta} / \gamma_{M,fi,c} \text{ and } (EI)_{fi,c,z} = E_{c,sec,\theta} [((h - 2e_f - 2b_{c,fi,v})(b - 2b_{c,fi,h})^3 - e_w^3) / 12] - I_{s,z} \} \quad (7)$$

$$N_{fi,pl,Rd,s} = A_s k_{sy,\theta} f_{sy} / \gamma_{M,fi,s} \text{ and } (EI)_{fi,s,z} = k_{sE,\theta} E_s I_{s,z} \quad (8)$$

6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
1as Jornadas de Proteção Civil
 Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018

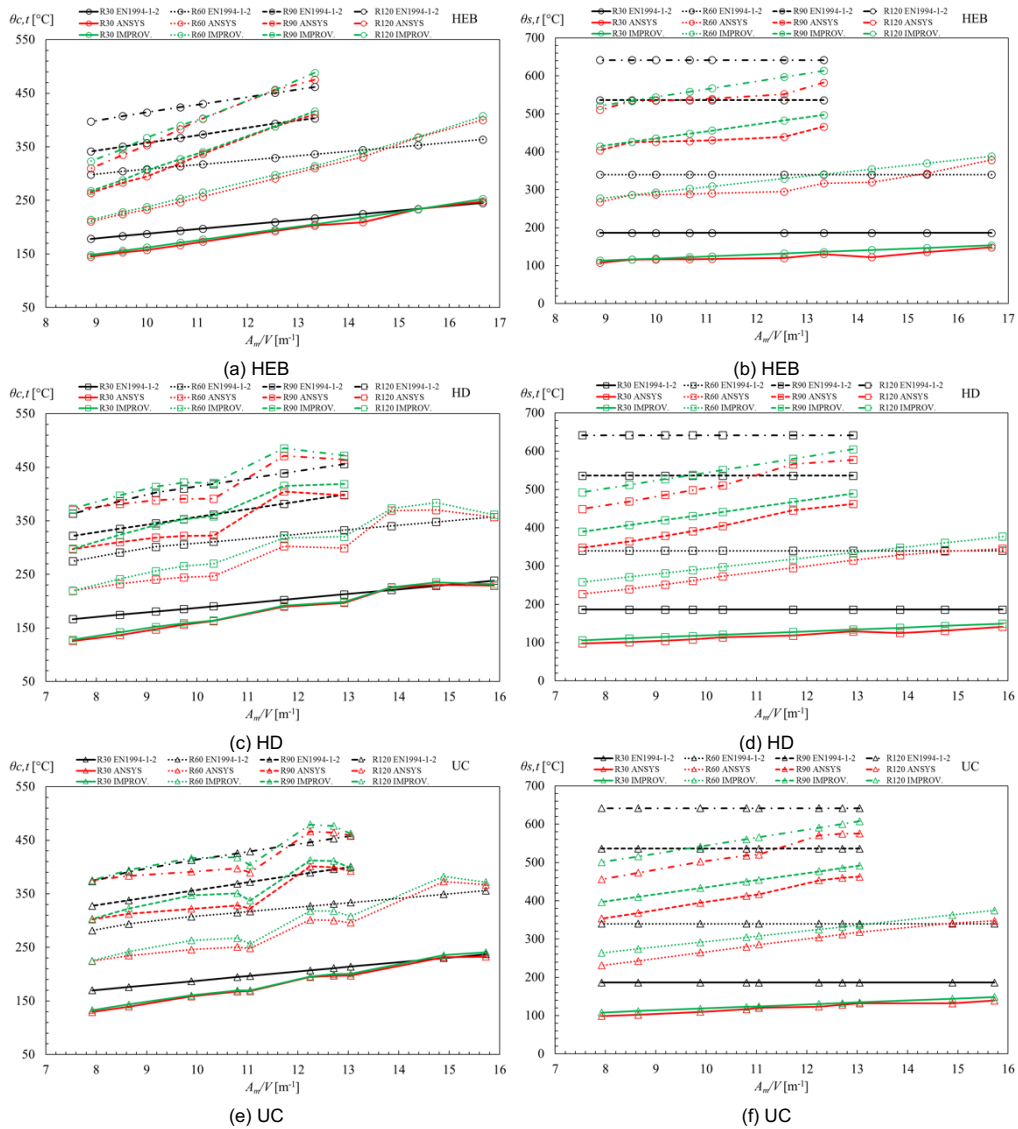
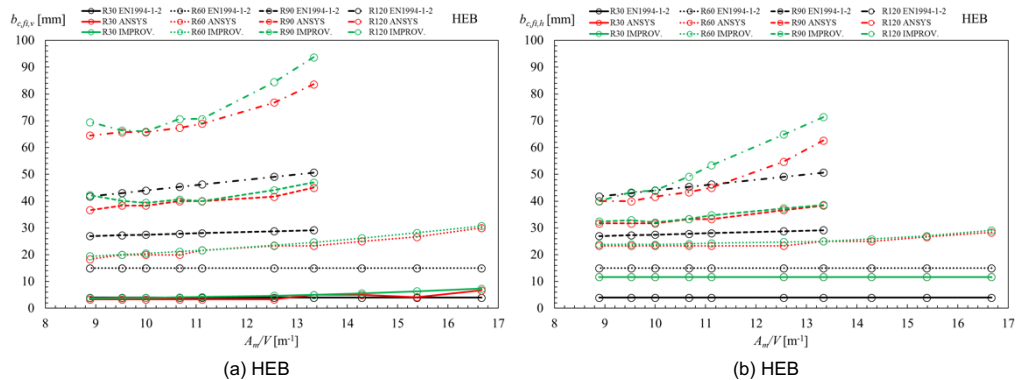


Figure 4: Comparison between EN1994-1-2, ANSYS and Improvement for average temperature of concrete (a,c,e) and average temperature of reinforcing bars (b,d,f).

Figure 5 shows graphically the reduction of concrete geometry in the vertical direction (left) and in the horizontal direction (right), for each type of profile and class of fire resistance.



*6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
 las Jornadas de Proteção Civil
 Universidade de Coimbra- Portugal – 29 e 30 de novembro de 2018*

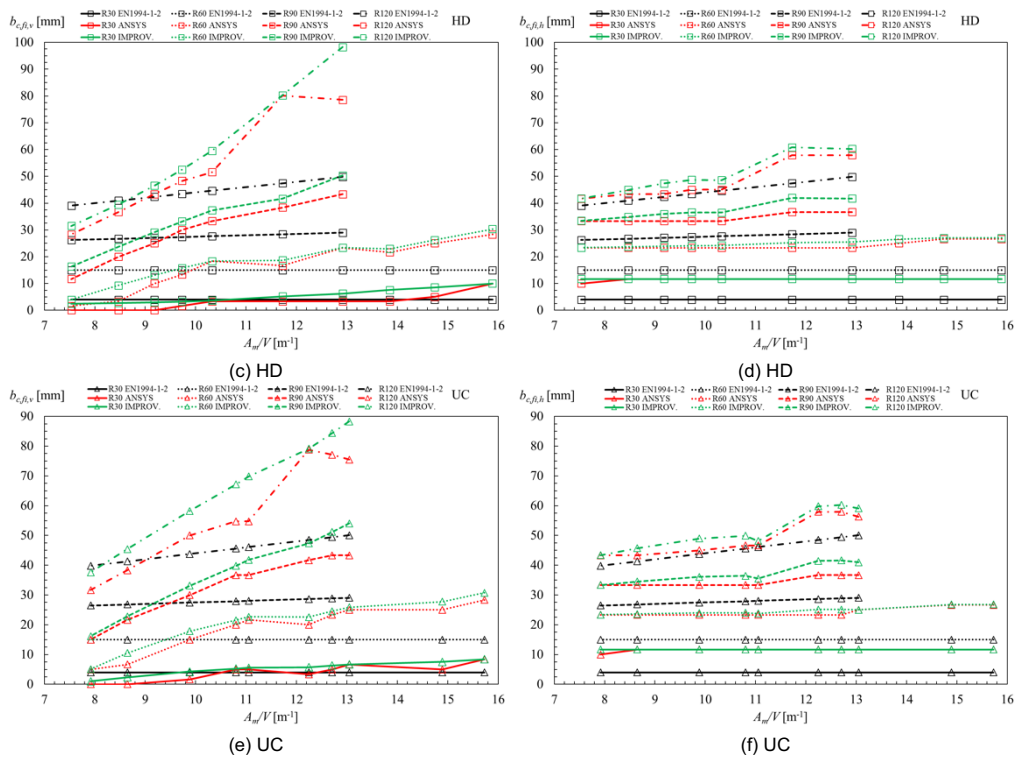


Figure 5: Comparison between EN1994-1-2, ANSYS and Improvement for reduction of concrete in vertical direction (a,c,d) and horizontal direction (b,d,f).

5. COMPARISON OF RESULTS

The comparison of the results is presented in figure 6 for the plastic resistance to axial compression and for the effective flexural stiffness. The current model in Annex G presents unsafe results for certain PEC in the fire resistance class R60, R90 and R120. The improved model fixes this problem and presents safer results.

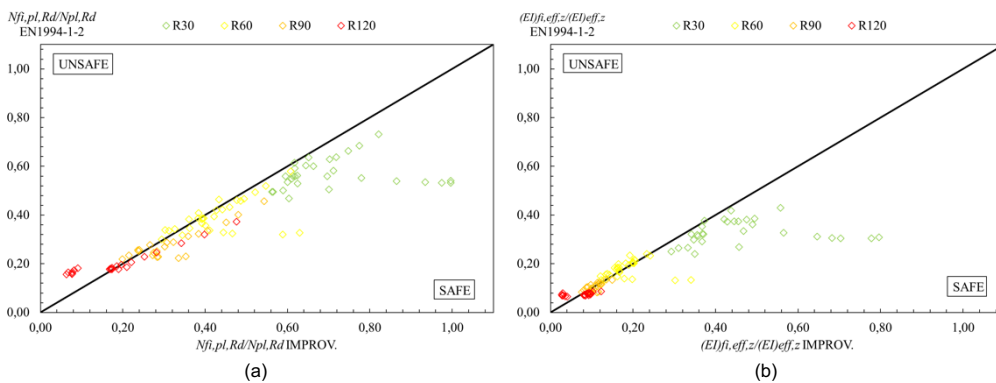


Figure 6: Comparison results between EN1994-1-2 and improved model for the plastic resistance to axial compression (a) and effective flexural stiffness around the weak axis (b).

6. CONCLUSIONS

The simplified calculation method proposed in annex G of EN1994-1-2 presents unsafe results for specific fire ratings. The new formulae demonstrate that the new improvements increase the safety level of the simplified method, presenting accurate results for the temperature effect on each component, resulting in safer values for the plastic resistance to axial compression and safer values for the effective flexural stiffness of PEC.

REFERENCES

- [1] CEN - EN 1994-1-2, 'Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design Eurocode'. European Standard, Brussels, p. 109, 2005.
- [2] ISO834-1, 'Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements'. Switzerland, p. 25, 1999.
- [3] A. Fellouh et al., 'Load carrying capacity of partially encased columns for different fire ratings', Fire Research, vol. 1:23, pp. 13–19, 2016.
- [4] L. Calió, P. Piloto, and R. Rigobello, 'Balanced Summation model for the calculation of the buckling resistance of partially encased columns under fire: New improvements', proceedings of Research and advanced technology in fire safety, ISBN 978-84-8102-832-4, pp. 271–287, 20 October 2017, University of Santander - GIDAI, Santander, Spain.
- [5] O. Jungbluth, 'Optimierte Verbandbauteile'. Stahlbau Handbuch 1, Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln, 1982.
- [6] CEN - EN 1991-1-2, 'Eurocode 1: Actions on structures -Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire'. European Standard, Brussels, p. 59, 2002.
- [7] CEN - EN 1992-1-2, 'Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design Eurocode'. European Standard, Brussels, p. 97, 2004.