



<http://rpee.lnec.pt/>

revista portuguesa de engenharia de estruturas

portuguese journal of structural engineering

Diretor: José Manuel Catarino

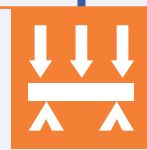
número temático:
2.ª geração de Eurocódigos Estruturais

Segurança estrutural,
utilização e
durabilidade



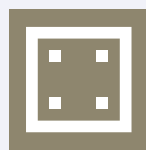
EN 1990

Ações em
estruturas



EN 1991

Projeto e
pormenorização



EN 1992



EN 1993



EN 1994



EN 1995



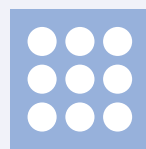
EN 1996



EN 1999



TS19100



TS19101

Projeto geotécnico
e sísmico



EN 1997



EN 1998



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



Associação Portuguesa
de Engenharia de Estruturas



Grupo
Português
de Betão
Estrutural



SOCIEDADE
PORTUGUESA DE
ENGENHARIA
SÍSMICA

índice

editorial	3	Editorial
	5	Nota introdutória
artigos científicos	7	Evolution of the Structural Eurocodes – An overview Steve Denton ∞ Mariapia Angelino
	13	2.ª geração de Eurocódigos Estruturais – Desenvolvimento e implementação em Portugal Ana Sofia Louro ∞ José Manuel Catarino
	23	2.ª geração do Eurocódigo – Bases para o projeto estrutural e geotécnico José Manuel Catarino ∞ Júlio Appleton ∞ João André ∞ Luís Oliveira Santos
	31	2.ª geração do Eurocódigo 1 – Ações em estruturas Luís Oliveira Santos ∞ Manuel Pipa
	39	2.ª geração do Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão João F. Almeida
	49	2.ª geração do Eurocódigo 3 – Dimensionamento de estruturas em aço Luís Simões da Silva
	59	2.ª geração dos Eurocódigos Estruturais – Projeto de estruturas mistas aço-betão José Miguel Castro ∞ Isabel Valente
	71	2.ª geração do Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira Alfredo Dias ∞ José Saporiti Machado ∞ João Negrão
	79	2.ª geração do Eurocódigo 6 – Projeto de estruturas de alvenaria Rui Marques ∞ Paulo B. Lourenço
	91	2.ª geração do Eurocódigo 7 – Projeto geotécnico Laura Caldeira ∞ Luís Lamas
	99	2.ª geração do Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos Rita Bento
	109	2.ª geração do Eurocódigo 9 – Projeto de estruturas de alumínio Luís Reis ∞ Rui F. Martins ∞ Joaquim Pinho-da-Cruz ∞ Francisco Toco Emilio ∞ João Carlos Viegas
	115	O novo Eurocódigo 10 – Projeto de estruturas de vidro Armando Pinto
	125	2.ª geração das Partes 1-2 (verificação da resistência ao fogo) dos Eurocódigos Estruturais Paulo Vila Real
	139	A Nova Especificação Técnica Europeia CEN/TS 19101:2022 – Projeto de estruturas de compósitos de polímero reforçado com fibras João R. Correia ∞ José Sena-Cruz ∞ Luigi Ascione ∞ Thomas Keller ∞ Toby Mottram ∞ Jan Knippers ∞ Carlo Paulotto
divulgação		Entidades apoiantes e parceiros

Diretor

José Manuel Catarino

Administração

José Manuel Catarino

(LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

João Almeida Fernandes

(APEE - Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas)

Ana Sofia Louro

(GPBE - Grupo Português de Betão Estrutural)

Luís Guerreiro

(SPES - Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica)

Coordenação Científica

Humberto Varum

(FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

Luís Oliveira Santos

(LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

Direção Executiva: Sandra Neves

Design Gráfico: Helder David

Capa

Eurocódigos e as suas inter-relações

(adaptado de *Eurocodes Visuals*,

© *European Union*, 2022)

Aviso legal

Os conteúdos incluídos na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Proprietário

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

Departamento de Estruturas

Av. Brasil 101 | 1700-066 LISBOA

tel: (+351) 21 844 32 60

rpee@lnec.pt | http://rpee.lnec.pt

Edição, redação e divulgação eletrónica

LNEC | Setor de Divulgação Científica e Técnica

Av. Brasil 101 | 1700-066 LISBOA

NIPC: 501 389 660

tel: (+351) 21 844 36 95

livraria@lnec.pt | www.lnec.pt

Comissão Científica (*)

Alexandre Costa

ISEP, Portugal

Alexandre Pinto

JETsj Geotecnia, Portugal

Alfred Strauss

Univ. Bodenkultur Viena, Áustria

Anastasio Sextos

Univ. of Bristol, Reino Unido

Antonello Gasperi

Consultor, Itália

Álvaro Cunha

FEUP, Portugal

Alvaro Viviescas Jaimés

UIS, Colômbia

André Barbosa

Oregon State Univ., EUA

Aníbal Costa

U. Aveiro, Portugal

António Abel Henriques

FEUP, Portugal

António Arêde

FEUP, Portugal

António Bettencourt Ribeiro

LNEC, Portugal

António Correia

LNEC, Portugal

António M. Baptista

LNEC, Portugal

António Pinho Ramos

UNL, Portugal

António Santos Silva

LNEC, Portugal

Artur Vieira Pinto

ELSA-JRC, Itália

Baldomiro Xavier

Teixeira Duarte, Portugal

Bruno Briseghella

Fuzhou Univ., China

Bruno Godart

UGE, França

Cármén Andrade

CIMNE, Espanha

Cristina Oliveira

IP Setúbal, Portugal

Daniel Oliveira

U. Minho, Portugal

Domenico Asprone

Univ. di Napoli Federico II, Itália

Eduardo Júlio

IST, Portugal

Elsa Caetano

FEUP, Portugal

Emil de Souza Sánchez Filho

UFF, Brasil

Fabio Biondini

Pol. di Milano, Itália

Fernando Branco

IST, Portugal

Graham Webb

WSP, Reino Unido

Guillermo Ramirez

VSL International, Suíça

Gustavo Ayala

UNAM, México

Halil Sezen

Ohio State Univ., EUA

Hugo Corres Peiretti

FHECOR, Espanha

Hugo Rodrigues

U. Aveiro, Portugal

Iunio Iervolino

Univ. di Napoli Federico II, Itália

Jan Vitek

Metrostav a.s., Rep. Checa

Joan Ramon Casas

UPC, Espanha

João Azevedo

IST, Portugal

João Estêvão

U. Algarve, Portugal

João Henrique Negrão

FCTUC, Portugal

João Miranda Guedes

FEUP, Portugal

João Pires da Fonseca

UBI, Portugal

João Ramôa Correia

IST, Portugal

Jorge Branco

U. Minho, Portugal

Jorge de Brito

IST, Portugal

Jorge Tiago Pinto

UTAD, Portugal

José Calavera

INTEMAC, Espanha

José Jara

UMSNH, México

José Luiz Rangel Paes

UFV, Brasil

José Melo

FEUP, Portugal

José Turmo

UPC, Espanha

José Vieira de Lemos

LNEC, Portugal

Júlio Flórez-López

ULA, Venezuela

Ka-Veng Yuen

U. Macau, China

Laura Caldeira

LNEC, Portugal

Lídia Shehata

UFF, Brasil

Linh Cao Hoang

DTU, Dinamarca

Luciano Jacinto

ISEL, Portugal

Luís Castro

IST, Portugal

Luís Guerreiro

IST, Portugal

Manuel Pipa

LNEC, Portugal

Marcial Blondet

PUCP, Peru

Marco Menegotto

Sapienza Univ. di Roma, Itália

Mario Ordaz

UNAM, México

Mário Pimentel

FEUP, Portugal

Marta Del Zoppo

Univ. di Napoli Federico II, Itália

Maurizio Piazza

Univ. di Trento, Itália

Miguel Fernandez Ruiz

UPM, Espanha

Nikola Tošić

UPC, Espanha

Nuno Filipe Borges Lopes

U. Aveiro, Portugal

Paolo Riva

Univ. di Bergamo, Itália

Paulo Candeias

LNEC, Portugal

Paulo Costeira

IP Viseu, Portugal

Paulo Fernandes

IP Leiria, Portugal

Paulo Lourenço

U. Minho, Portugal

Paulo Piloto

IP Bragança, Portugal

Paulo Vila Real

U. Aveiro, Portugal

Pedro Delgado

IP Viana do Castelo, Portugal

Pedro Pontífice de Sousa

LNEC, Portugal

Petr Stepanek

Univ. Brno, República Checa

Ricardo do Carmo

ISEC, Portugal

Rita Bento

IST, Portugal

Rui Caçada

FEUP, Portugal

Rui Faria

FEUP, Portugal

Rui Pinho

Univ. di Pavia, Itália

Serena Cattari

Univ. di Genova, Itália

Sérgio Hampshire Santos

UFFRJ, Brasil

Sérgio Lopes

FCTUC, Portugal

Thanasis Triantafyllou

Univ. de Patras, Grécia

Válter Lúcio

UNL, Portugal

Vanderley M. John

USP, Brasil

editorial

O número 25 da série III da Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (**rpee**) é um número temático inteiramente dedicado à divulgação da segunda geração de Eurocódigos Estruturais cuja publicação, pelo Comité Europeu de Normalização (CEN), está prevista para setembro de 2027.

A Nota Introdutória, da responsabilidade do Departamento de Normalização do Instituto Português da Qualidade (IPQ), enquanto entidade que coordena a atividade de normalização a nível nacional, enquadra os trabalhos desenvolvidos pelo LNEC, enquanto Organismo de Normalização Setorial que coordena a Comissão Técnica do IPQ, CT 115 – Eurocódigos Estruturais.

Este número inclui quinze artigos, o primeiro dos quais apresenta uma visão geral do desenvolvimento desta segunda geração de Eurocódigos Estruturais pelo Comité Técnico do CEN, TC 250 - *Structural Eurocodes*, sendo um dos autores o *Chairman* deste Comité, Steve Denton.

Em estreita articulação com o Grupo de Coordenação da CT 115 (Comissão Executiva, Presidentes de Subcomissões e Coordenadores de Grupos de Trabalho), os restantes artigos científicos abordam o processo de implementação a nível nacional desta nova geração de normas, as bases para o projeto estrutural e geotécnico, as ações a considerar no dimensionamento estrutural, o projeto de estruturas de betão, o projeto de estruturas de aço, o projeto de estruturas mistas, o projeto de estruturas de madeira, o projeto de estruturas de alvenaria, o projeto geotécnico, o projeto sísmico, o projeto de estruturas de alumínio, o projeto de estruturas de vidro, a verificação da resistência ao fogo das estruturas de diferentes materiais e ainda o projeto de estruturas em compósitos de fibra-polímero.

A qualidade científica deste número é assegurada pela Coordenação Científica da **rpee** em articulação com os Coordenadores deste número temático, José Manuel Catarino e Ana Sofia Louro.

A administração da **rpee** agradece a todos os autores o trabalho desenvolvido em prol da divulgação da segunda geração de Eurocódigos Estruturais e renova aqui o seu reconhecimento às empresas e instituições que apoiam a sua edição, e que constam no portal e na contracapa da revista.

A administração da **rpee**

José Manuel Catarino (LNEC)

João Almeida Fernandes (APEE)

Ana Sofia Louro (GPBE)

Luís Guerreiro (SPES)

nota introdutória

O Instituto Português da Qualidade, IP (IPQ) tem como missão a coordenação do Sistema Português da Qualidade (SPQ) e outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei, a promoção e a coordenação de atividades que visem contribuir para demonstrar a credibilidade da ação dos agentes económicos, bem como desenvolver as atividades necessárias à sua função de laboratório nacional de metrologia.

O IPQ é o Organismo Nacional de Normalização (ONN) e a Instituição Nacional de Metrologia e, enquanto ONN, coordena o Subsistema da Normalização, promovendo e apoiando o desenvolvimento da atividade normativa nacional de forma credível e sustentável.

No âmbito deste subsistema e sob a coordenação do Organismo de Normalização Setorial, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, IP (ONS/LNEC), foi criada em 1990 a Comissão Técnica Nacional "CT 115 - Eurocódigos Estruturais", dedicada ao acompanhamento e desenvolvimento dos Eurocódigos e à definição dos Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP).

O desenvolvimento dos Eurocódigos Estruturais pela Comissão Europeia teve início em 1975, numa tentativa de eliminar obstáculos técnicos ao comércio e de harmonizar as especificações técnicas, através de regras que, numa primeira fase, serviriam de alternativa às regras nacionais em vigor nos Estados-Membros com o propósito de as vir a substituir.

Em 1984, os primeiros Eurocódigos foram publicados pela Comissão Europeia com a ajuda de um Comité Orientador composto por representantes dos Estados-Membros, tendo sido emitido em 1989 o primeiro mandato da Comissão Europeia ao Comité Europeu de Normalização (CEN), um dos três organismos de normalização europeus, para o qual foi transferida a elaboração e publicação destes documentos, como pré-norma europeia, ou seja, como referência ENV.

Em Portugal, as versões portuguesas das pré-normas consideradas relevantes para aplicação nacional tiveram foram publicadas com a referência NP ENV, p. ex. NP ENV 1991-1:1999 "Eurocódigo 1: Bases de projecto e ações em estruturas - Parte 1: Bases de projecto".

Em 1998, a Comissão Europeia emitiu um novo mandato, o M/265 – "Conversão de Eurocódigos ENV para EN", que deu origem à primeira geração de Eurocódigos. Estes documentos são um conjunto de série de normas dividido em 10 partes, EN 1990 - EN 1999.

O M/515 – "Mandato para alterar os Eurocódigos existentes e alargar o objetivo e campo de aplicação dos Eurocódigos Estruturais", foi emitido pela Comissão Europeia no final de 2012, na sequência do qual, o CEN/TC 250 "Structural Eurocodes" iniciou os trabalhos de revisão da primeira geração de Eurocódigos Estruturais, para assim dar origem à segunda geração de Eurocódigos Estruturais, cuja publicação na sua totalidade está prevista até ao terceiro trimestre de 2027.

Os trabalhos normativos, que foram e continuam a ser desenvolvidos pelo CEN/TC 250, são acompanhados pela CT 115, que participa ativamente, através do envolvimento dos membros das suas subcomissões e grupos de trabalhos, que contribuem com os seus conhecimentos para a elaboração destes documentos normativos. A contribuição desta comissão técnica e a qualidade e o rigor do trabalho desenvolvido, apresenta-se como um bom exemplo para os trabalhos de normalização nacional e europeu.

Cláudia Santos

Técnica superior

Departamento de Normalização do IPQ

Elemento de Ligação ONN/IPQ-ONS/LNEC

Evolution of the Structural Eurocodes – An overview

Evolução dos Eurocódigos Estruturais – Uma visão geral

Steve Denton
Mariapia Angelino

Abstract

Following the introduction of the first-generation of Structural Eurocodes across Europe, this paper summarizes the most relevant aspects concerning the development of the second-generation Eurocodes, focusing the Eurocodes evolution programme, the CEN/TC 250 responsibility and objectives, as well as the second-generation Eurocodes development process, sharing the activities promoted by CEN/TC 250 to support the transition to the new standards.

Resumo

Após a introdução da primeira geração de Eurocódigos Estruturais em toda a Europa, este artigo resume os aspetos mais relevantes relativos ao desenvolvimento da segunda geração de Eurocódigos, centrando-se no programa de evolução dos Eurocódigos, na responsabilidade e nos objetivos do CEN/TC 250, bem como no processo de desenvolvimento da segunda geração de Eurocódigos, partilhando as atividades promovidas pelo CEN/TC 250 para apoiar a transição para as novas normas.

Keywords: Structural Eurocodes / Second-generation / CEN/TC 250 / Mandate M/515

Palavras-chave: Eurocódigos Estruturais / Segunda geração / CEN/TC 250 / Mandato M/515

Steve Denton

Chairman CEN/TC 250 – Structural Eurocodes
MA PhD FEng FICE FStructE
Head of Civil Engineering, WSP UK
Visiting Professor, University of Bath
steve.denton@wsp.com

Mariapia Angelino

Technical Reviewer and Member of Management Group, CEN/TC 250
Meng (Hons) PGDip(Hons) EngD CEng MICE
Consultant, WSP Italy
mariapia.angelino@wsp.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

DENTON, S. [et al.] – Evolution of the Structural Eurocodes – An overview. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 7-12. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-001>

1 Introduction

The first generation of the EN Eurocodes were published between 2002 and 2007 and represented the culmination of over 30 years of collaborative international development.

Following the introduction of these new standards across Europe, many countries sought a period of stability for practicing engineers. For this reason, there have been very few major amendments to the first generation suite. There has, however, been a very substantial international programme to develop the second generation of the EN Eurocodes. This major, coordinated revision of all Eurocode parts will include significant updates and the addition of new parts.

The first of the second-generation standards has now been released to National Standardisation Bodies (NSBs). Work is well advanced to ensure that the complete second-generation suite will be released by early 2026. A backstop date of early 2028 has been set by which time all countries are obliged to withdraw their first-generation documents.

2 Responsibility for Eurocodes

Responsibility for the Eurocodes resides with CEN Technical Committee 250 (CEN/TC 250). CEN, the European Standardisation Body, has 34 full NSB members. All CEN members are bound by CEN rules and all CEN Standards are developed in accordance with CEN Internal Regulations [1].

CEN/TC 250 is highly active, with over 100 formal sub-committees, working groups and task groups. National representation on these committees and working groups is provided through NSBs, with NSBs generally having mirror committees to help establish national positions.

Each CEN Technical Committee has a secretariat provided by one of the NSBs. The secretariat of CEN/TC 250 is provided by BSI. This is a crucial role and the support provided to CEN/TC 250 and the Eurocodes programme by BSI is exemplary.

3 The Eurocodes evolution programme

3.1 Mandate M515 EN

A major stimulus for the Eurocodes evolution programme has been Mandate M/515 [2] issued by the European Commission (EC) at the end of 2012. Crucially, this mandate unlocked the potential for financial support for the evolution programme from EC and EFTA. It also affirmed the high level of importance that EC and EFTA place in the Eurocodes and set expectations for the work to be done.

The mandate recognised that long-term confidence in the Eurocodes relies upon their ability to evolve. As such, they must embrace new methods, new materials, new regulatory requirements and new societal needs, fostering more economic and sustainable design and construction.

The total funding provided by EC and EFTA to support the evolution of the Eurocodes was over EUR 11M, making it the largest standardisation programme ever of its type by funding level.

3.2 CEN/TC 250 work programme

In response to Mandate M/515 [3], CEN/TC 250 established a panel to prepare its technical response detailing the overall planned work programme. This programme was split into four overlapping phases to enable the interdependencies between standards and drafting work to be managed and coordinated effectively.

In addition, CEN/TC 250 undertook formal 'systematic reviews' of all existing Eurocode parts, through which all CEN members had the opportunity to comment on and recommend changes to the existing standards. This important and extensive feedback was integrated into the detailed CEN/TC 250 work programme and helped shape the scope of updates and new developments.

CEN/TC 250's response to mandate M/515 [3] contained clear descriptions of the standards to be reviewed in each phase, together with associated background, reasons for the change, key benefits and outputs. Key updates in the work programme included extension of current rules for the assessment of existing structures, strengthening of requirements for robustness, and considerations of relevant impacts of climate change on structural and geotechnical design. New developments included a new Eurocode on structural glass, new CEN Technical Specifications for design of fibre-polymer composite structures and tensile surface structures, and new Eurocode parts on atmospheric icing and actions from waves and currents on coastal structures.

To help deliver the work programme, over 70 funded project teams containing 5 or 6 experts were established, working to a defined brief under the direction of CEN/TC 250 and the relevant CEN/TC 250 sub-committee or working group. The leadership and membership of these project teams was decided through open international competitions. Three calls for experts were held: in 2015 for phase 1, in 2016 for phase 2, and in 2017 for phases 3 and 4. The Netherlands' National Standards Body, NEN organised the call for experts, administered the associated contracts and has led

the reporting required to EC and EFTA. Working in tandem with BSI, NEN has thus made a significant and important contribution to the evolution programme.

4 CEN/TC 250 objectives

At the outset, CEN/TC 250 unanimously agreed two overarching objectives to guide its decisions and priorities for the evolution work: firstly to enhance the ease of use of the Eurocodes and secondly to achieve exemplary level of international consensus.

4.1 Enhancing ease of use

Whilst respecting the achievements of the past, CEN/TC 250's vision for the second generation of Structural Eurocodes is, 'to create a more user-orientated suite of design standards that are recognised as the most trusted and preferred in the world'.

To support this vision, in 2013, the Chair of CEN/TC 250 established a Chair's Advisory Panel ('CAP on ease of use') to develop recommendations for the approach to be taken to enhance ease of use. The 15 members of this CAP provided a balance between Eurocodes stakeholders, with a strong representation from practitioners. The recommendations of this CAP were unanimously endorsed by CEN/TC 250 and have been instrumental to CEN/TC 250's efforts to meet users' needs.

The CAP recommended that a clearly defined primary target audience be agreed to guide all those authoring Eurocodes. This primary target audience was defined as 'Practitioners – Competent engineers: Civil, structural and geotechnical engineers, typically qualified professionals able to work independently in relevant field'. In addition, nine further categories of users were identified and for each category, a statement of intent to meet users' needs was agreed. These are presented in Table 1.

Table 1 Categories of Eurocodes' users and CEN/TC 250 statements of intent

Categories of Eurocodes users	CEN/TC 250 statements of intent to meet users' needs
Practitioners – Competent engineers [Primary target audience]	We will aim to produce Standards that are suitable and clear for all common design cases without demanding disproportionate levels of effort to apply them
Practitioners – Graduates	We will aim to produce Eurocodes that can be used by Graduates where necessary supplemented by suitable guidance documents and textbooks and under the supervision of an experienced practitioner when appropriate
Expert specialists	We will aim not to restrict innovation by providing freedom to experts to apply their specialist knowledge and expertise
Product Manufacturers	Working with other CEN/TCs we will aim to eliminate incompatibilities or ambiguities between the Eurocodes and Product Standards
Software developers	We will aim to provide unambiguous and complete design procedures. Accompanying formulae will be provided for charts and tables where possible
Educators	We will aim to use consistent underlying technical principles irrespective of the intended use of a structure (e.g. bridge, building, etc.) and that facilitate the linkage between physical behaviour and design rules
National regulator	We will endeavour to produce standards that can be referenced or quoted by National Regulations
Private sectors businesses	We will continue to promote technical harmonization across European markets in order to reduce barriers to trade
Clients	We will produce Eurocodes that enable the design of safe, serviceable, robust and durable structures, aiming to promoting cost effectiveness throughout their whole life cycle, including design, construction and maintenance
Other CEN/TCs	We will engage proactively to promote effective collaboration with those other CEN/TCs that have shared interests

EN development process (timeframe)

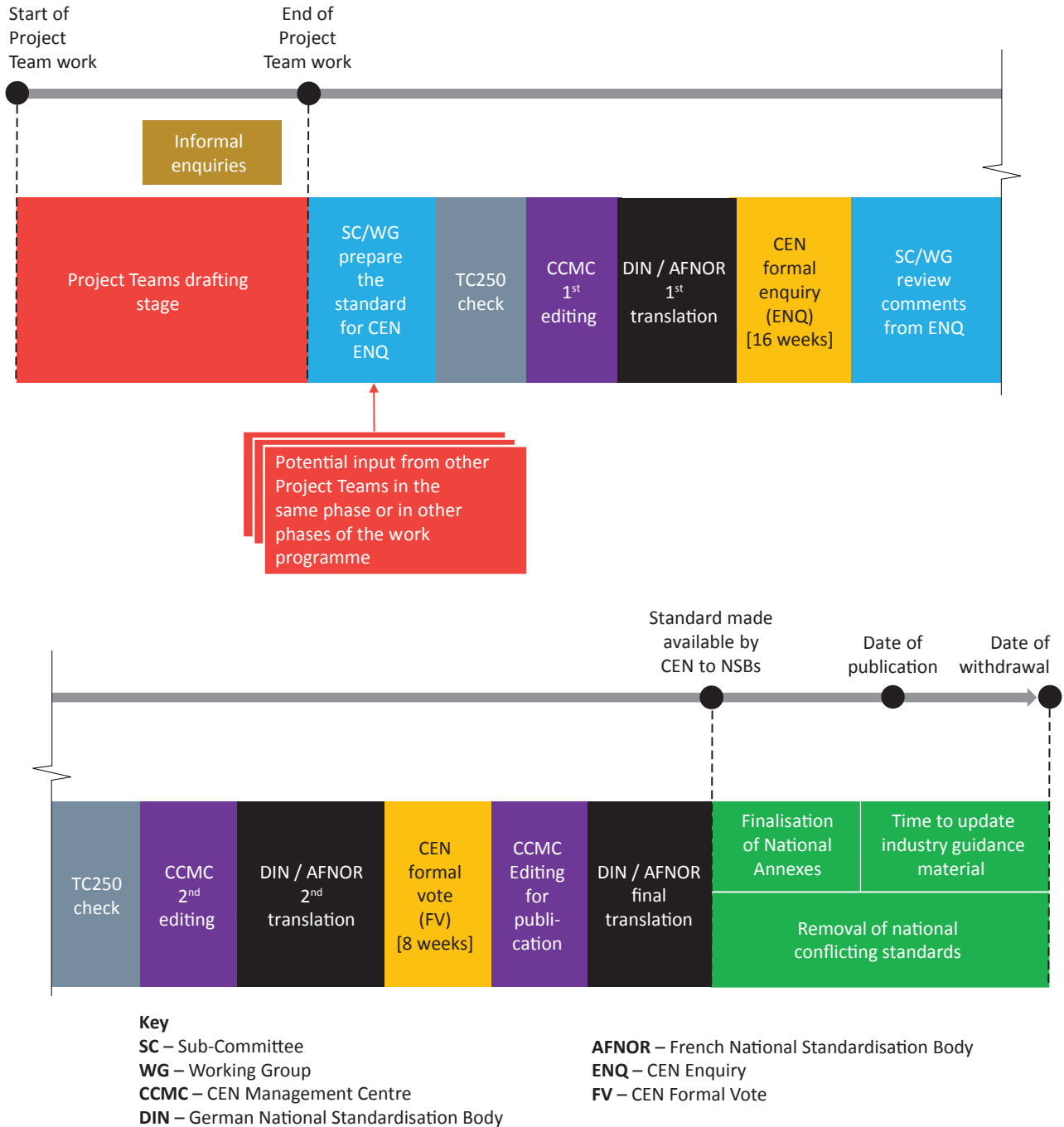


Figure 1 Eurocode development process

CEN/TC 250 adopted a series of governing principles and priorities to guide drafting. These included general aims like enhancing understandability, navigation, consistency between the Eurocodes, and avoiding fundamental changes to design approach or structure unless adequately justified. More specific aims included providing clear guidance for common design cases, providing adequate freedom for innovation, and improving consistency with product standards.

Additionally, CEN/TC 250 put in place a broad array of innovations and activities to promote enhancements in ease of use. These have included: establishing the role of M/515 Technical Reviewer to scrutinise evolving drafts and make recommendations to enhance clarity and consistency; developing comprehensive guidelines and examples to augment CEN's drafting rules; and holding multiple 'informal' enquires on drafts to collect feedback from users via NSBs through which thousands of constructive comments have been received.

4.2 Exemplary levels of international consensus

Achieving consensus is fundamental to CEN/TC 250's ambitions and a real challenge given the scale, complexity and international impact of the Eurocodes and the evolution programme. Many specific initiatives have been enacted to help build consensus, including CEN/TC 250 unanimously agreeing behavioural expectations and a five-step process to help resolve differences of view.

Ultimately, the formal votes taken by NSBs on the final drafts of the Eurocode (see later) will confirm whether not exemplary levels of consensus achieved are exemplary. Current indications are encouraging however. During hundreds of formal decisions taken by CEN/TC 250 through NSB voting associated with the execution of the work programme to date, of the many, many thousands of votes cast only single digits of direct negative votes have been cast.

5 Eurocode development process

The development process for each Eurocode part is based on CEN rules and consists of a series of stages, as outlined in Figure 1. After the finalisation of the work by the project teams, the relevant sub-committee or working group starts the preparation of the standard for CEN formal enquiry (ENQ), when NSBs officially comment on the draft prEN standard. Prior to ENQ, the prEN draft is checked by CEN/TC 250 Chair and Secretary, reviewed by the CEN editorial team and translated into French and German.

In addition, as noted previously, to support ease of use and consensus-building objectives, during the project team drafting stage, CEN/TC 250 undertook multiple additional informal enquiries for all Eurocode parts to collect and respond to comments on interim draft prepared by project teams.

After ENQ, comments made by NSBs are addressed by the relevant sub-committee or working group, who prepare the final EN draft. After further checks, editing and translation, the CEN Formal Vote (FV) is launched. This is when NSBs submit their final vote on whether they agree the draft standard.

6 Where we are now?

CEN/TC 250 has developed a comprehensive publication schedule and planner to track progress at all stages of the Eurocode development. The 78 Project Teams appointed for the four phases of the work programme have all completed their work. CEN Enquiries and Formal Votes are happening twice a year: March and September for ENQ; April and October for FV.

The second-generation Eurocode suite will contain 11 EN standards in around 65 parts, 12 CEN Technical Specifications (TS) and 7 CEN Technical Reports (TR).

To date, 46 CEN Enquiries have been undertaken and all the remaining Enquiries for documents developed under Mandate M/515 [2] were launched in March 2024. 21 EN and TS Formal Votes have been completed, all of which have been positive, meaning that, at a European level, work has now been completed on around one quarter of the second-generation Eurocode suite. In 2024, Formal Votes are scheduled for a further 16 documents, with the remainder scheduled for 2025.

In parallel with this intensive period of finalisation and formal acceptance of the second-generation Eurocodes, CEN/TC 250 is initiating communication activities to help with the transition to the new standards. For example, general presentations have been prepared outlining the key changes to each of the Eurocodes. These are available from the JRC Eurocode website (<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/>).

In addition, a series of non-technical 'Eurocodes Evolution Explained' videos has been produced and is available via the JRC Eurocode website or on the YouTube channel '@Eurocodes' (<https://www.youtube.com/@Eurocodes>).

References

- [1] CEN-CENELEC Internal Regulations Part 1 to 4. Part 1: Organization and Structure, 2024 (English, French, German) Part 2: Common Rules for Standards Work, 2023 (English, French, German) Part 3: Principles and rules for the structure and drafting of CEN and CENELEC documents, 2022 (English, German, French) Part 4: Certification, 2018 (English, French, German version not available yet). <https://boss.cen.eu/reference-material/refdocs/pages/>
- [2] M/515, 2012 – Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of Structural Eurocodes. Ref. Ares (2012)1516834 - 18/12/2012. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General.
- [3] CEN/TC250, 2013 – CEN/TC250/N993 - Response to Mandate M/515 "Towards a second generation of EN Eurocodes".

2.^a geração de Eurocódigos Estruturais – Desenvolvimento e implementação em Portugal

2nd generation of Structural Eurocodes – Development and implementation in Portugal

Ana Sofia Louro
José Manuel Catarino

Resumo

Este artigo aborda o desenvolvimento e implementação da 2.^a geração de Eurocódigos Estruturais, revisitando a publicação e implementação em Portugal da 1.^a série de 10 normas publicadas pelo CEN em 2007, detalhando o desenvolvimento do processo de atualização técnico-científica destes documentos desencadeado no âmbito do Mandato M/515 e explicitando as responsabilidades de cada Estado Membro ao nível da definição do Plano de Implementação e da preparação dos Anexos Nacionais das diferentes normas que constituem os Eurocódigos Estruturais.


Abstract

This article addresses the development and implementation of the 2nd generation of Structural Eurocodes, revisiting the publication and implementation in Portugal of the 1st series of 10 standards published by CEN in 2007, detailing the development of the technical-scientific updating process of these documents triggered within the scope of Mandate M/515 and explaining the responsibilities of each Member State in terms of the definition of the Implementation Plan and preparation of the National Annexes of the different standards that constitute the Structural Eurocodes.

Palavras-chave: Eurocódigos Estruturais / Primeira geração / Segunda geração / Implementação / Anexos Nacionais

Keywords: Structural Eurocodes / First generation / Second generation / Implementation / National Annexes

Ana Sofia Louro

Secretária da CT 115
Investigadora Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0002-3094-5967
analouro@lnec.pt

José Manuel Catarino

Presidente da CT 115
Investigador-Coordenador Aposentado
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
jmcatarino@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

LOURO, A. [et al.] – 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais – desenvolvimento e implementação em Portugal. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III, n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 13-22.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-002>

1. Introdução

Os Eurocódigos Estruturais formaram o primeiro conjunto de normas desenvolvido a nível europeu, tecnicamente avançado, para o projeto estrutural de edifícios e de outras obras de engenharia civil, incluindo os aspetos geotécnicos, a verificação da resistência ao fogo, o projeto para resistência aos sismos, a execução e as estruturas provisórias.

De um modo geral, as normas europeias visam apoiar as políticas europeias. Neste sentido, a primeira geração de Eurocódigos Estruturais veio:

- ajudar a harmonizar o mercado de serviços no setor da construção;
- incentivar e facilitar a comercialização e utilização de materiais, componentes estruturais e kits;
- melhorar e constituir uma base comum para a investigação e desenvolvimento em engenharia civil;
- facilitar a comunicação entre os diversos *stakeholders* (donos de obra, projetistas, autoridades, utilizadores, etc.), em face da maior transparência nas regras;
- potenciar o desenvolvimento de materiais de apoio, nomeadamente manuais, tabelas, guias, *software*, etc.;
- contribuir para aumentar a competitividade das empresas europeias de engenharia civil, empreiteiros, projetistas e fabricantes de produtos nas suas atividades a nível internacional;
- contribuir para um nível mais uniforme de segurança nas construções em diferentes regiões europeias.

2. Desenvolvimento e atualização técnico-científica da 1.ª geração de Eurocódigos Estruturais

A primeira geração de Eurocódigos Estruturais é uma série de 10 normas europeias (EN 1990 a EN 1999), publicadas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) entre 2002 e 2007, que se dividem em 58 partes, e que permitem uma abordagem comum em termos de requisitos de segurança, de utilização e de durabilidade das estruturas (Figura 1).

Estas normas incluem as bases para o projeto de estruturas (EN 1990); as ações em estruturas (EN 1991); o projeto de estruturas de betão (EN 1992), de aço (EN 1993), mistas aço-betão (EN 1994), de madeira (EN 1995), de alvenaria (EN 1996) e de alumínio (EN 1999); juntamente com o projeto geotécnico (EN 1997) e ainda com o projeto de estruturas para resistência aos sismos (EN 1998), incluindo a avaliação e reabilitação de edifícios, conforme mostra a Figura 2a.

Considerando que importava garantir a atualização técnico-científica destes documentos para preservar a confiança dos cidadãos e cumprir os objetivos globais de segurança e de regulação do mercado interno, em 2010 a Comissão Europeia emitiu ao CEN um mandato (M/466, 2010) [1] que visava assegurar a evolução da primeira geração de Eurocódigos Estruturais. Com base na resposta recebida, a Comissão decidiu solicitar ao CEN a definição de um

programa de normalização tendo em vista a revisão e o alargamento do âmbito dessas normas, através do Mandato M/515 [2].

Em 2013, na resposta preparada pelo Comité Técnico do CEN, responsável por estas normas (CEN/TC 250 – *Structural Eurocodes*) e divulgada pelo documento *Towards a second generation of EN Eurocodes* [3], foi apresentada a abordagem prevista para dar resposta às exigências do Mandato [2].

Em 2016 divulgou-se junto do meio técnico nacional, num artigo publicado na rpee [5], as tarefas desenvolvidas nas Fases 1 a 4, o processo de evolução entre a 1.ª e a 2.ª geração de Eurocódigos

Estruturais, bem como as principais questões às quais esta 2.ª geração de normas pretende responder, que são resumidamente as seguintes:

- rever a 1.ª geração de normas, tendo as seguintes prioridades:
 - melhorar a facilidade de utilização dos Eurocódigos nos cálculos mais frequentes (*ease of use*);
 - aumentar a harmonização, através da redução dos Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP) ou da convergência dos valores usados;

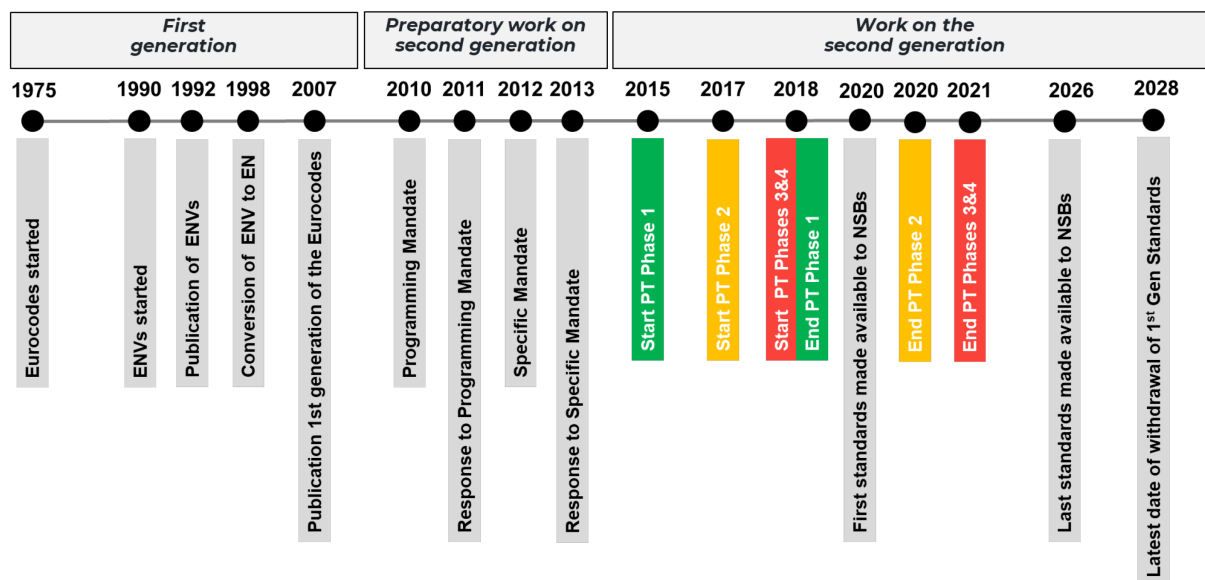
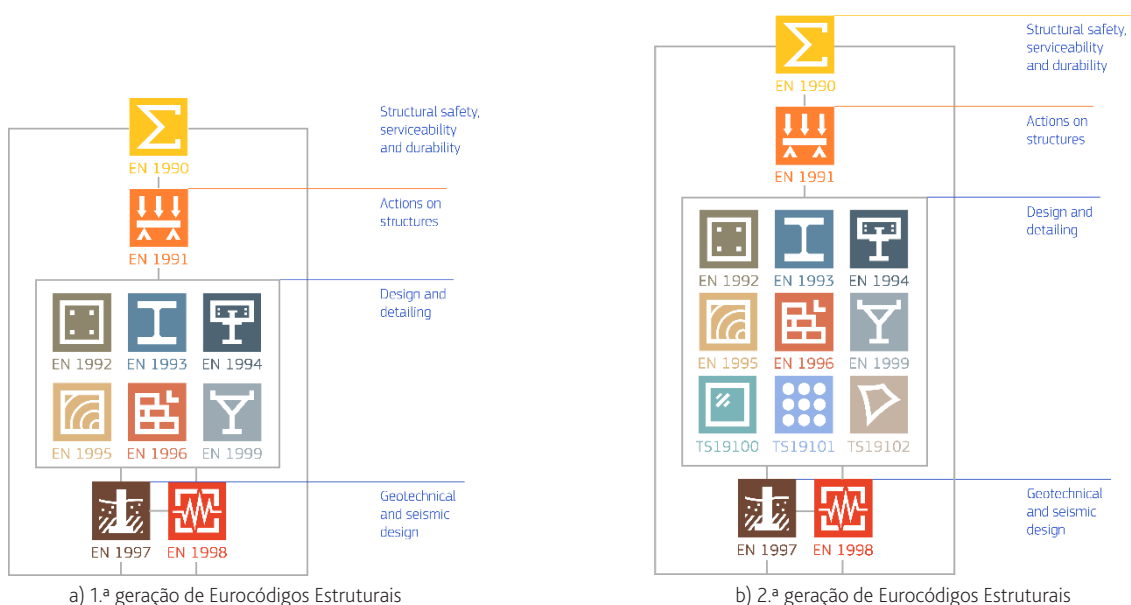


Figura 1 Visão geral da evolução dos Eurocódigos Estruturais [4]



- introduzir requisitos para a avaliação, reutilização e reforço de estruturas existentes;
- reforçar os requisitos relativos à robustez;
- desenvolver um novo Eurocódigo relativo ao projeto de estruturas de vidro;
- fazer avançar os trabalhos pré-normativos relativos a estruturas de compósitos de polímero reforçado com fibras (FRP) e a estruturas de membranas tensionadas.

Assim, à data da preparação do presente artigo, as 10 normas (EN 1990 a EN 1999) que constituem 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais totalizam 62 partes, que se resumem no Quadro 1, às quais acrescem diversos relatórios e especificações técnicas (TS), destacando-se as relativas a novos materiais: as três partes da TS 19100, sobre o projeto de estruturas de vidro, que darão origem ao futuro Eurocódigo 10; a TS 19101, relativa ao projeto de estruturas de compósitos de polímero reforçado com fibras; e a TS 19102, no âmbito do projeto de estruturas de membranas tensionadas (Figura 2b).

Quadro 1 Partes que constituem cada uma das normas da 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais

Norma	Partes	Título Simplificado	Norma	Partes	Título Simplificado
EN 1990	EN 1990-1 EN 1990-2	Bases para o projeto - Estruturas novas Bases para o projeto - Avaliação de estruturas existentes	EN 1993	EN 1993-1-1 EN 1993-1-2 EN 1993-1-3 EN 1993-1-4 EN 1993-1-5 EN 1993-1-6 EN 1993-1-7	Aço - Regras gerais Aço - Fogo Aço - Elementos e chapas enformados a frio Aço - Aço inoxidável Aço - Elementos em placa Aço - Resistência e estabilidade de cascas Aço - Elementos estruturais constituídos por placas carregadas transversalmente
EN 1991	EN 1991-1-1 EN 1991-1-2 EN 1991-1-3 EN 1991-1-4 EN 1991-1-5 EN 1991-1-6 EN 1991-1-7 EN 1991-1-8 EN 1991-1-9 EN 1991-2 EN 1991-3 EN 1991-4	Ações - Pesos próprios e sobrecargas Ações - Fogo Ações - Neve Ações - Vento Ações - Temperatura Ações - Ações durante a construção Ações - Ações de acidente Ações - Ações das ondas e das correntes Ações - Ações do gelo atmosférico Ações - Ações de tráfego em pontes e outras obras Ações - Ações induzidas por gruas e máquinas Ações - Ações em silos e tanques	EN 1993-1-8 EN 1993-1-9 EN 1993-1-10 EN 1993-1-11 EN 1993-1-12 EN 1993-1-13 EN 1993-1-14 EN 1993-2 EN 1993-3 EN 1993-4-1 EN 1993-4-2 EN 1993-5 EN 1993-6 EN 1993-7	Aço - Ligações Aço - Fadiga Aço - Tenacidade Aço - Componentes tensionados Aço - Regras para aços superiores a S700 e até S960 Aço - Vigas com grandes aberturas na alma Aço - Projeto assistido por métodos numéricos Aço - Pontes Aço - Torres, mastros e chaminés Aço - Silos Aço - Tanques Aço - Estacas e estacas-prancha Aço - Estruturas de suporte de gruas Aço - Painéis sanduíche	
EN 1992	EN 1992-1-1 EN 1992-1-2	Betão - Regras gerais Betão - Fogo	EN 1995	EN 1995-1-1 EN 1995-1-2 EN 1995-1-3 EN 1995-2 EN 1995-3	Madeira - Regras Gerais Madeira - Fogo Madeira - Estruturas mistas madeira-betão Madeira - Pontes Madeira - Execução
EN 1994	EN 1994-1-1 EN 1994-1-2 EN 1994-2	Mistas - Regras gerais Mistas - Fogo Mistas - Pontes	EN 1997	EN 1997-1 EN 1997-2 EN 1997-3	Projeto geotécnico - Regras gerais Projeto geotécnico - Propriedades do terreno Projeto geotécnico - Estruturas geotécnicas
EN 1996	EN 1996-1-1 EN 1996-1-2 EN 1996-2 EN 1996-3	Alvenaria - Regras gerais Alvenaria - Fogo Alvenaria - Seleção de materiais e execução Alvenaria - Métodos simplificados para alvenaria não armada	EN 1999	EN 1999-1-1 EN 1999-1-2 EN 1999-1-3 EN 1999-1-4 EN 1999-1-5	Alumínio - Regras gerais Alumínio - Fogo Alumínio - Fadiga Alumínio - Chapas enformadas a frio Alumínio - Cascas
EN 1998	EN 1998-1-1 EN 1998-1-2 EN 1998-2 EN 1998-3 EN 1998-4 EN 1998-5	Sismos - Regras gerais e ação sísmica Sismos - Edifícios Sismos - Pontes Sismos - Avaliação e reabilitação de edifícios e pontes Sismos - Silos, tanques, tubagens, torres, mastros e chaminés Sismos - Fundações			

3. Implementação dos Eurocódigos Estruturais em Portugal

3.1 Considerações gerais

De forma a cumprir as regras do CEN [6], para dar o estatuto de norma nacional a qualquer norma europeia e, portanto, também aos Eurocódigos Estruturais, os países membros do CEN devem adotar as seguintes etapas:

- publicar um texto idêntico ou adotar a norma no prazo de seis meses após a data de disponibilização (*date of availability* - DAV);
- retirar quaisquer normas nacionais em conflito com a norma em questão no prazo de 6 meses após a DAV.

Em 2003 a Comissão Europeia publicou uma recomendação (2003/887/CE, de 11 de dezembro [7]) que incentivava o uso dos Eurocódigos nos diversos Estados Membros e alertava para a responsabilidade dos diversos intervenientes na preparação de um plano de implementação dos Eurocódigos no seu país.

As entidades envolvidas na implementação dos Eurocódigos Estruturais em Portugal são o Instituto Português da Qualidade (IPQ) que assegura a publicação dos Eurocódigos como Normas Portuguesas enquanto Organismo de Normalização Nacional (ONN, o membro do CEN) e a Comissão Técnica CT 115 – “Eurocódigos Estruturais” que representa Portugal no CEN/TC 250 e promove a preparação dos Eurocódigos para publicação em Portugal, cuja coordenação é assegurada pelo LNEC, enquanto Organismo de Normalização Setorial (ONS). Na CT 115 estão representadas todas as partes interessadas no domínio da Engenharia de Estruturas, designadamente universidades, projetistas e consultores, o setor da construção e de produção de materiais de construção e os donos de obra.

Os Eurocódigos Estruturais permitem uma abordagem comum em termos de requisitos de segurança, de utilização e de durabilidade das estruturas. É da competência dos membros do CEN, de acordo com o *Guidance Paper L - Application and use of Eurocodes*, [8] a determinação dos níveis de segurança dos edifícios e de outras obras de engenharia civil, bem como de partes destas, incluindo os aspetos de durabilidade e economia. Foi assim necessário prever nos Eurocódigos valores, classes ou métodos alternativos para ter em conta diferenças nas condições climáticas ou geográficas (por exemplo, vento, neve, sismo, etc.) ou nas metodologias de avaliação de risco utilizadas a nível nacional, regional ou local.

Desta forma, a implementação de uma parte de um determinado Eurocódigo pode, de acordo com o documento *The implementation of the Eurocodes in the National Regulatory Framework* [9], ter três fases, nomeadamente o Período de Tradução, o Período de Calibração Nacional e o Período de Coexistência. Os referidos períodos dependem da data em que o CEN entrega a parte do Eurocódigo em causa ao ONN.

Assim, para assegurar o cumprimento da recomendação da Comissão [7], as entidades envolvidas, sempre que é disponibilizada uma parte relativa a uma determinada norma (Eurocódigo) devem desenvolver um plano de implementação que inclua:

- a tradução da parte relativa ao Eurocódigo para as línguas

nacionais autorizadas, tendo em conta que todas as partes são publicadas nas três línguas oficiais do CEN: Inglês, Francês e Alemão;

- a fixação dos NDP a aplicar no seu território;
- a publicação da norma nacional que transpõe o Eurocódigo e o respetivo Anexo Nacional, contendo a escolha nacional sobre os NDP e a referência a informações complementares não contraditórias (NCCI), e notificar a Comissão Europeia;
- a adaptação, na medida do necessário, das suas disposições nacionais para que a parte do Eurocódigo possa ser utilizada no seu território: *i*) como meio de assegurar a conformidade das obras de construção com os requisitos de resistência mecânica e estabilidade e resistência ao fogo e *ii*) como base para:
 - a elaboração de especificações técnicas harmonizadas para os produtos de construção;
 - a elaboração de cadernos de encargos para a execução de obras de construção e prestação de serviços de engenharia;
- a promoção e a formação sobre os Eurocódigos Estruturais.

Acresce ainda que importa assegurar um período de coexistência, em que podem ser utilizada tanto a norma nacional que transpõe o Eurocódigo como qualquer norma nacional previamente existente. No final do período de coexistência da última parte de um determinado Eurocódigo, os Organismos de Normalização Nacionais devem retirar todas as normas nacionais contraditórias [9].

A norma nacional que transpõe uma parte de um Eurocódigo, quando publicada por um Organismo de Normalização Nacional, é composta pelo texto do Eurocódigo (precedido de uma página de título nacional e de um preâmbulo nacional), geralmente seguido do Anexo Nacional, que contém todas as opções nacionais a utilizar no projeto de edifícios e outras obras de engenharia civil a construir no país em causa.

3.2 Anexos Nacionais

Os Anexos Nacionais permitem a cada país salvaguardar o seu direito de determinar valores relacionados com questões de segurança regulamentar a nível nacional, sempre que estes continuem a variar de Estado para Estado, uma vez que é reconhecida a soberania das autoridades de cada Estado Membro a este nível.

Os Estados Membros deverão estabelecer os NDP no seu território, devendo utilizar os valores recomendados fornecidos quando os NDP tiverem sido definidos nos Eurocódigos. Só deverão divergir desses valores recomendados se as condições geográficas, geológicas ou climáticas, ou níveis específicos de proteção, o exigirem.

Portanto, os Eurocódigos preveem, desde a 1.ª geração, como opções nacionais, conjuntos completos de valores, classes, parâmetros e métodos alternativos recomendados a utilizar como NDP.

Os países que aplicam os Eurocódigos devem estabelecer os seus NDP e devem:

- escolher entre as classes incluídas no Eurocódigo, ou
- utilizar o valor recomendado, ou escolher um valor dentro do intervalo de valores recomendados, para um parâmetro em que o Eurocódigo faça uma recomendação, ou

- quando forem previstos métodos alternativos, utilizar de preferência o método recomendado, sempre que o Eurocódigo faça uma recomendação; e
- ter em conta a necessidade de coerência dos NDP estabelecidos para os diferentes Eurocódigos e as suas partes.

O Anexo Nacional contém as informações sobre os NDP, a utilizar para o projeto de edifícios e outras obras de engenharia civil a construir no país em causa, ou seja:

- valores e/ou classes em que são indicadas alternativas no Eurocódigo;
- valores a utilizar quando apenas é indicado um parâmetro no Eurocódigo;
- dados específicos por país (geográficos, climáticos, etc.), por exemplo, mapa de neve;
- procedimento a utilizar quando são indicados procedimentos alternativos no Eurocódigo.

O Anexo Nacional pode também conter:

- decisões sobre a aplicação de anexos informativos;
- referências a informações complementares não contraditórias para ajudar o utilizador a aplicar o Eurocódigo.

Desde cedo que os Estados Membros foram incentivados a minimizar o número de casos em que não são adotadas as recomendações relativas a um valor ou método para os seus NDP, uma vez que ao escolherem os mesmos valores e métodos, os Estados Membros reforçam os benefícios da utilização dos Eurocódigos.

No entanto, foi reconhecido pelo TC 250 que "A inclusão dos NDP nos Eurocódigos publicados foi mais ampla do que inicialmente previsto" [10] pelo que, aquando do desenvolvimento da 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais, este foi um aspeto que se tentou desde logo simplificar, para assegurar o cumprimento de um dos principais objetivos do Mandato M/515.

O *Position paper on reducing the number of NDPs in the Structural Eurocodes* [10] definiu uma abordagem em 3 etapas para reduzir o número de NDP aplicável não só à revisão das normas da 1.ª geração, mas também ao desenvolvimento de novas partes e de novas secções de Eurocódigos, tendo feito um levantamento dos NDP por Eurocódigo (Quadro 2) e definido os NDP que se consideram essenciais, nomeadamente:

- os coeficientes parciais para materiais e ações;
- a probabilidade de a ação sísmica de projeto ser excedida no tempo de vida útil de projeto de uma estrutura;
- o tempo de exposição ao fogo;
- o projeto para ações acidentais;
- a classificação de estruturas em Classes de Consequências correspondentes a diferentes níveis de fiabilidade, tendo em conta os requisitos de gestão da qualidade.

Tendo em vista a desejável harmonização, não só ao nível dos NDP, mas também ao nível do conteúdo dos próprios Anexos Nacionais, o TC 250 preparou o *Guidance on drafting National Annexes to EN Eurocodes for NSBs* [11]. Este documento vem essencialmente clarificar aspetos relativos a quadros que contém NDP e alertar os

Organismos de Normalização Nacionais relativamente às opções que podem tomar ao nível dos Anexos Informativos, uma vez que os países podem:

- permitir a sua utilização, podendo o Anexo Nacional dar carácter normativo a um Anexo Informativo;
- proibir, total ou parcialmente, a sua utilização, sendo que, neste caso, o Anexo Nacional pode substituir o Anexo Informativo na íntegra (introduzindo um anexo diferente) ou em parte (com disposições alteradas/alternativas), diretamente ou por referência. Nesse caso, o anexo de substituição ou as disposições alteradas/alternativas não devem contradizer o texto normativo contido na parte pertinente do Eurocódigo;
- optar por não se pronunciar; neste caso, o Anexo Informativo pode ser usado se o Anexo Nacional não contiver informações sobre a aplicação do Anexo Informativo.

Quadro 2 Número de NDP nas normas da 1.ª geração de Eurocódigos Estruturais [10]

Eurocódigo	N.º de Partes	N.º de Páginas	N.º de NDP
EN 1990	1 + Anexo A2	90+30	54
EN 1991	10	770	292
EN 1992	4	450	176
EN 1993	20	1250	236
EN 1994	3	330	42
EN 1995	3	225	21
EN 1996	4	300	31
EN 1997	2	340	42
EN 1998	6	600	103
EN 1999	5	500	58

3.3 Implementação da 1.ª geração de Eurocódigos Estruturais em Portugal

Aquando do desenvolvimento da 1.ª geração de Eurocódigos Estruturais, e tendo em vista a sua implementação em Portugal, as entidades envolvidas definiram um plano para traduzir e publicar as versões portuguesas das partes mais relevantes das 58 normas publicadas pelo CEN, e preparar os Anexos Nacionais. O plano compreendia 4 conjuntos de normas (Quadro 3 a Quadro 6), tendo sofrido alguns ajustes: a NP EN 1998-3 acabou por ser publicada com o primeiro conjunto de normas, enquanto que a NP EN 1996-2 e a NP EN 1997-2 foram retiradas do plano de normalização da CT 115. Foram traduzidas as emendas e corrigendas entretanto publicadas pelo CEN de todas as normas com versões portuguesas publicadas, sempre que não foi possível publicar versões portuguesas consolidadas (normas europeias com o conteúdo de respetivas emendas e/ou corrigendas).

O referido plano envolveu a preparação de diversos Seminários de divulgação e formação preparados pela CT 115, com o apoio do LNEC, do IPQ e da Ordem dos Engenheiros.

Quadro 3 Normas que permitem o projeto de estruturas de edifícios de betão e de aço

NP EN	Título Simplificado
1990	Bases para o projeto
1991-1-1	Ações - Pesos próprios e sobrecargas
1991-1-2	Ações - Fogo
1991-1-3	Ações - Neve
1991-1-4	Ações - Vento
1991-1-5	Ações - Temperatura
1992-1-1	Betão - Regras gerais
1992-1-2	Betão - Fogo
1993-1-1	Aço - Regras gerais
1993-1-2	Aço - Fogo
1993-1-8	Aço - Ligações
1993-1-9	Aço - Fadiga
1993-1-10	Aço - Tenacidade
1997-1	Projeto geotécnico - Regras gerais
1998-1	Sismos - Regras gerais
1998-5	Sismos - Fundações

Quadro 4 Normas que permitem o projeto das estruturas de pontes

NP EN	Título Simplificado
1990/A1	Bases para o projeto. Anexo A2: Pontes
1991-2	Ações - Pontes
1992-2	Betão - Pontes
1993-2	Aço - Pontes
1994-2	Mistas - Pontes
1995-2	Madeira - Pontes
1998-2	Sismos - Pontes

Quadro 5 Normas que permitem o projeto de estruturas de edifícios: mistas aço-betão, de madeira, de alvenaria e de alumínio

NP EN	Título Simplificado
1994-1-1	Mistas - Regras gerais
1994-1-2	Mistas - Fogo
1995-1-1	Madeira - Regras gerais
1995-1-2	Madeira - Fogo
1996-1-1	Alvenaria - Regras gerais
1996-1-2	Alvenaria - Fogo
1999-1-1	Alumínio - Regras gerais
1999-1-2	Alumínio - Fogo
1999-1-3	Alumínio - Fadiga

Quadro 6 Normas diversas

NP EN	Título Simplificado
1991-1-6	Ações - Ações durante a construção
1991-1-7	Ações - Ações de acidente
1992-3	Betão - Silos e reservatórios
1993-1-5	Aço - Elementos em placa
1996-2	Alvenaria - Seleção e execução
1997-2	Projeto geotécnico - Caracterização e ensaios do terreno
1998-3	Sismos - Avaliação e reabilitação de edifícios

3.4 Implementação da 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais em Portugal

O programa de normalização preparado pelo CEN/TC250 para responder ao Mandato M/515 [2] aproxima-se da reta final e teve no 1.º semestre de 2024 o seu pico, conforme se pode verificar pelo número de normas e especificações técnicas que estiveram em inquérito (ENQ) e voto final (FV) (Figura 3).

A implementação em Portugal da 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais seguirá as datas propostas (Figura 4) pelo TC 250 [13], aprovadas pelo *Technical Board* do CEN e que, de acordo com as regras do CEN [6], estipula o seguinte:

- *DoP (date of publication) até 30 de setembro de 2027*, ou seja, data de adoção como norma portuguesa, isto é, a data em que uma norma europeia tem de ser implementada a nível nacional através da publicação de uma norma nacional idêntica ou por adoção;
- *DoW (date of withdrawal) até 30 de março de 2028*, ou seja, data de anulação, isto é, a data até à qual as normas nacionais que entrem em conflito com uma norma europeia têm de ser anuladas.

Em linha com a proposta do TC 250, a Comissão Executiva da CT 115 tem vindo a delinear a estratégia nacional de publicação e implementação desta nova geração de normas, tendo já promovido uma reflexão sobre as partes dos diferentes Eurocódigos relativamente às quais é prioritário preparar os respetivos Anexos Nacionais.

A Comissão Executiva da CT 115 está igualmente a promover a atualização de um Glossário que apoiará o trabalho normativo necessário nos próximos anos. As Subcomissões e os Grupos de Trabalho da CT 115 têm vindo a acompanhar o desenvolvimento dos documentos normativos mais relevantes para o meio técnico nacional e a identificar necessidades de investigação pré-normativa, para fazer face ao desenvolvimento dos Anexos Nacionais.

A preparação do Anexo Nacional de cada uma das normas da 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais passará naturalmente por recolher toda a informação relevante disponível relativamente às normas da 1.ª geração (Anexos Nacionais, *Background Documents*, etc.), se for o caso, e efetuar, para cada norma, um levantamento dos NDP a manter, para que se possa iniciar o desenvolvimento de um novo Anexo Nacional e preparar um relatório justificativo das opções tomadas.

O *Guidance on drafting National Annexes to EN Eurocodes for NSBs* [11], as Regras e Procedimentos da Normalização Portuguesa e a experiência adquirida com a implementação da 1.ª geração de Eurocódigos serão as ferramentas base para o trabalho a desenvolver a nível nacional.

4. Considerações finais e próximos desafios

No presente artigo faz-se um resumo do processo de publicação e implementação da 1.ª geração de Eurocódigos Estruturais, bem como da atualização técnico-científica destes documentos desencadeada no âmbito do Mandato M/515 [2] e que deu origem à 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais que Portugal terá de implementar até 2027.

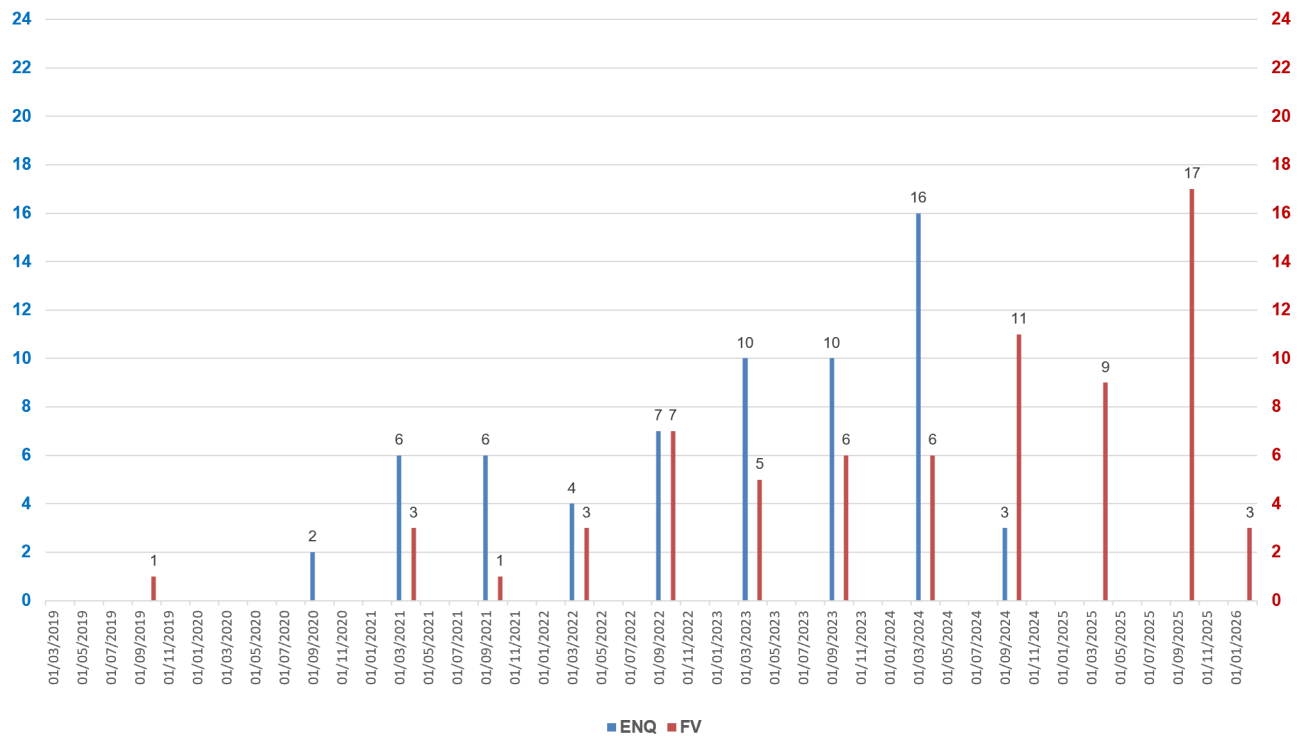


Figura 3 Número de documentos em inquérito (ENQ) e voto final (FV) (Fonte: CEN-TC 250_N3736_Eurocode draft publication schedule - with planner November 2023 [12])

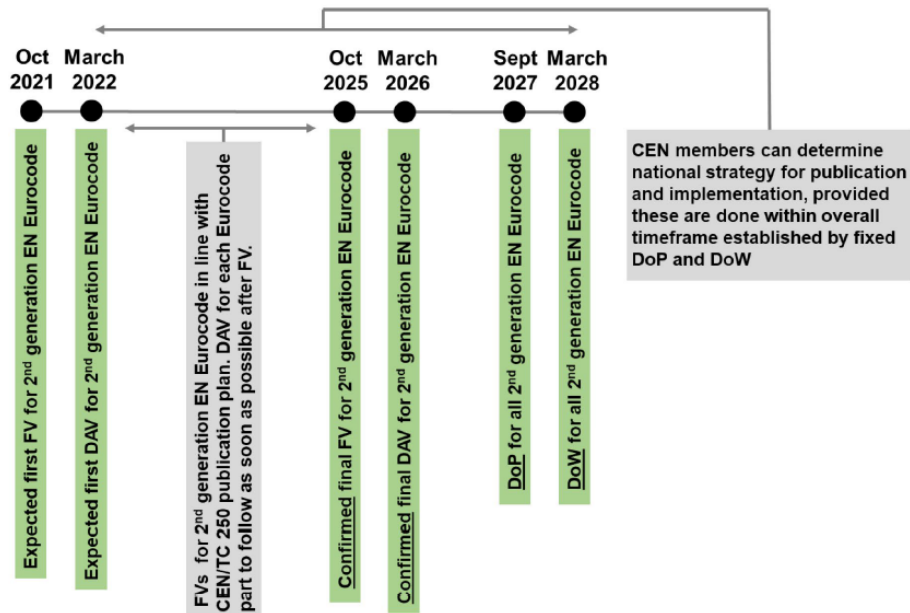


Figura 4 Visão geral da proposta do TC 250 em termos de datas para a implementação da 2.ª geração de Eurocódigos Estruturais [13]

A crescente cooperação entre os diversos intervenientes no processo normativo a nível nacional e o incremento da participação de peritos portugueses na atualização técnico-científica das normas, no seio dos grupos de trabalho do TC 250, sentidos nos últimos anos, demonstram a importância desta atividade e terão certamente consequências positivas na implementação em Portugal da nova geração de Eurocódigos Estruturais.

O TC 250 pretendeu dar resposta às prioridades do Mandato, nomeadamente no que se refere à redução dos NDP e a facilitar a utilização dos Eurocódigos no quotidiano (*ease of use*) [14]. No entanto, o meio técnico nacional considera que a extensão e crescente complexidade do conteúdo de algumas normas dificultam a aplicação dos Eurocódigos.

Importa agora mobilizar o meio técnico nacional para o desenvolvimento dos Anexos Nacionais, partilhando diferentes experiências e perspetivas, para que a aplicação dos Eurocódigos em Portugal seja eficiente e eficaz, constituindo um estímulo para o setor da construção.

O conhecimento adquirido com a implementação da 1.ª geração de normas e todo o trabalho desenvolvido pelo meio técnico nacional nos últimos 30 anos são uma enorme mais-valia. Assim, caberá às entidades diretamente envolvidas na implementação dos Eurocódigos Estruturais em Portugal trabalhar de forma articulada, para enfrentar este desafio como uma oportunidade, aproveitando as inúmeras ferramentas tecnológicas que estão hoje amplamente acessíveis, para disponibilizar ao meio técnico nacional ferramentas (*websites*, mapas interativos, etc.) que promovam e facilitem a utilização dos Eurocódigos Estruturais

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os membros das Subcomissões e Grupos de Trabalho da CT 115 que participam ativamente no desenvolvimento do trabalho normativo, a nível nacional e internacional.

Referências

- [1] M/466, 2010 – *Programming Mandate addressed to CEN in the field of the Structural Eurocode*, European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General.
- [2] M/515, 2012 - *Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of Structural Eurocodes*. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General.
- [3] CEN/TC250, 2013 – CEN/TC250/N993 - Response to Mandate M/515 "Towards a second generation of EN Eurocodes".
- [4] Denton, Steve, *DIBt Eurocode Conference 2023 – Overview*, <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/2nd-generation/second-generation-eurocodes-what-new#what-is-new-in-the-2g-eurocodes-conference-berlin-24-may-2023>.
- [5] LOURO, Ana Sofia [et al.] – A nova geração de Eurocódigos Estruturais. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 3. ISSN 2183-8488. (março 2017) 135-146.
- [6] CEN-CENELEC Internal Regulations - Part 2: 2023,
- [7] Official Journal of the European Union, 2003 – *Commission*

- Recommendation of 11 December 2003 on the implementation and use of Eurocodes for construction works and structural construction products*, L332/62 EN 19.12.2003, <http://data.europa.eu/eli/reco/2003/887/oj>.
- [8] Guidance Paper L (concerning the Construction Products Directive - 89/106/EEC) '*Application and use of Eurocodes*' (Version 27 November 2003).
- [9] A. Athanasopoulou, P. Formichi, P. Spehl, I. Dabizheva, V. Gacesa-Moric, J. Markova, J. A. Calgaro, N. Malakatas, M. Lurvink, P. Croce, R. Apostolska, D. Sumarac, M. L. Sousa, S. Dimova, *The implementation of the Eurocodes in the National Regulatory Framework*, EUR 29601 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-98657-4, doi:10.2760/033434, JRC115175.
- [10] CEN/TC250, 2016 – CEN/TC250/N1493 - *Position paper on reducing the number of NPDs*.
- [11] CEN/TC250, 2022 – CEN/TC250/N3126 - *CEN TC 250 Structural Eurocodes - Guidance on drafting National Annexes to EN Eurocodes for NSBs (approved by BT decision 5-2022)*.
- [12] CEN/TC250, 2023 – CEN/TC250/N3736 - *Eurocode draft publication schedule - with planner_November 2023*.
- [13] CEN/TC250, 2023 – CEN/TC250/N2705 - *CEN/TC 250 request to BT Common DoP and DoW for 2nd generation*.
- [14] CEN/TC250, 2015 – CEN/TC250/N1239 - *Position paper on enhancing ease of use of the Structural Eurocodes*.



2.^a geração do Eurocódigo – Bases para o projeto estrutural e geotécnico

2nd generation of Eurocode - Basis of structural and geotechnical design

José Manuel Catarino
Júlio Appleton
João André
Luís Oliveira Santos

Resumo

O artigo aborda a evolução da norma "EN 1990 – Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas" desde sua publicação original em 2002 pelo CEN até à versão de 2024 da segunda geração dos Eurocódigos Estruturais na sequência do mandato M/515 da Comissão Europeia. Apresentam-se as novas considerações e anexos, com destaque para as alterações em relação à versão de 2002.

Abstract

The article discusses the evolution of the standard "EN 1990 - Eurocode - Bases for the design of structures" from its original publication in 2002 by CEN to the 2024 version of the second generation of the Structural Eurocodes following mandate M/515 from the European Commission. The new considerations and annexes are presented, with emphasis on the changes compared to the 2002 version.

Palavras-chave: Projeto de estruturas / EN 1990 / 2.^a geração de Eurocódigos

Keywords: Design of structures / EN 1990 / 2nd generation of Eurocodes

José Manuel Catarino

Presidente da SC 10 da CT 115
Investigador-Coordenador Aposentado
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
jmcatarino@lnec.pt


Júlio Appleton

Coordenador do GT 02 da CT 115
A2P Consult - Estudos e Projectos, Lda
Lisboa, Portugal
julio.appleton@a2p.pt

João André

Investigador Auxiliar
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
jandre@lnec.pt

Luís Oliveira Santos

Presidente da SC 01 da CT 115
Investigador-Coordenador
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0003-2591-2842
luisosantos@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CATARINO, J. [et al.] – 2.ª geração do Eurocódigo – Bases para o projeto estrutural e geotécnico. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 23-30.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-003>

1 Introdução

A “EN 1990 – Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas” foi publicada em 2002 [1] pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) com os seus Anexos A1, B, C e D. Em 2005 o CEN publicou a primeira emenda da EN 1990 [2] que contém o Anexo A2 relativo ao projeto de pontes e, em 2008, publicou uma corrigenda da EN 1990 [3].

A versão portuguesa da EN 1990 foi publicada em 2009 [4] pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), e inclui a versão da EN 1990 publicada pelo CEN em 2002 e a corrigenda de 2008. Em 2019 [5] foi publicada pelo IPQ a emenda EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 [6] que inclui o Anexo A2 e o respetivo anexo nacional.

No âmbito do mandato M/515 [7] da Comissão Europeia, o CEN iniciou em 2015 os trabalhos para a elaboração da 2.ª geração dos Eurocódigos Estruturais que, no caso da EN 1990, se traduziram numa atividade intensa em reuniões e em diversos grupos do SC 10 do TC 250 do CEN, que conduziram a um inquérito, em junho de 2024, sobre a nova versão desta norma de março de 2024, enquadrada neste grande projeto europeu. O CEN já tinha efetuado, em 2022 e 2023, o inquérito e a votação de uma versão anterior da EN 1990 que ainda não contemplava a avaliação de estruturas existentes nem o conteúdo dos Anexos A3 a A6, que foi publicada pelo CEN em 2023 [8]. Apesar de publicada também pelo IPQ, esta norma não integra o acervo normativo nacional, não devendo ser utilizada por estar incompleta nem estarem disponíveis os restantes Eurocódigos Estruturais da 2.ª geração.

Este artigo sintetiza as principais modificações da EN 1990 de 2024 [8], [9], [10] relativamente à versão de 2002 da norma do CEN da 1.ª geração dos Eurocódigos Estruturais, com as respetivas emenda e corrigenda.

2 Organização da EN 1990 de 2024

As diferenças entre a versão de 2024 da EN 1990 e a versão de 2002 começam, desde logo, no título, que passou a ser “Eurocódigo – Bases para o projeto estrutural e geotécnico”. Esta alteração resulta da adaptação de alguns aspetos específicos das bases para o projeto geotécnico, que na 1.ª geração se encontravam na EN 1997, o que permitiu a sua integração na EN 1990. No que se refere à organização destas duas versões, a principal diferença consiste no facto da versão da EN 1990 de 2024 incluir 2 partes [8], [9], [10], sendo a primeira parte aplicável a estruturas novas e a segunda parte à avaliação de estruturas existentes.

O Quadro 1 sistematiza a comparação dos conteúdos da EN 1990 de 2002 [1], [2], [3], [6] e da EN 1990 de 2024 [8], [9], [10]. A análise deste quadro mostra as principais evoluções da EN 1990, que são as seguintes:

- consideração de novos tipos de estruturas, como é o caso de torres, mastros, chaminés, silos, tanques, estruturas de suporte de gruas e estruturas na costa marítima;
- inclusão de disposições adicionais sobre a gestão técnica de projetos e execução de estruturas;

Quadro 1 Comparação das versões da EN 1990 de 2002 [1], [2], [3], [6] e de 2024 [8], [9], [10]

EN 1990 de 2002 [1], [2], [3], [6]	EN 1990 de 2024 – Parte 1: estruturas novas [8], [9]
<p>1. Generalidades</p> <p>2. Requisitos</p> <p>3. Princípios para o dimensionamento em relação aos estados limites</p> <p>4. Variáveis básicas</p> <p>5. Análise estrutural e projeto com apoio experimental</p> <p>6. Verificação dos estados limites pelo método dos coeficientes parciais</p> <p>Anexo A1 - Aplicação a edifícios</p> <p>Anexo A2 - Aplicação a pontes</p> <p>Anexo B - Gestão da fiabilidade estrutural das construções</p> <p>Anexo C - Bases para o método dos coeficientes parciais e para a análise da fiabilidade</p> <p>Anexo D - Projeto com apoio experimental</p>	<p>0. Introdução</p> <p>1. Âmbito</p> <p>2. Referências normativas</p> <p>3. Termos, definições e símbolos</p> <p>4. Regras gerais</p> <p>5. Princípios para o dimensionamento em relação aos estados limites</p> <p>6. Variáveis básicas</p> <p>7. Análise estrutural e projeto com apoio experimental</p> <p>8. Verificação dos estados limites pelo método dos coeficientes parciais</p> <p>Anexo A1 - Aplicações gerais e para edifícios</p> <p>Anexo A2 - Aplicação a pontes</p> <p>Anexo A3 - Aplicação a torres, mastros e chaminés</p> <p>Anexo A4 - Aplicação a silos e tanques</p> <p>Anexo A5 - Aplicação a estruturas de suporte de guias</p> <p>Anexo A6 - Aplicação a estruturas na costa marítima</p> <p>Anexo B - Disposições para a gestão técnica de projetos e execução de estruturas</p> <p>Anexo C - Fiabilidade estrutural</p> <p>Anexo D - Projeto com apoio experimental</p> <p>Anexo E - Robustez de edifícios e pontes</p> <p>Anexo F - Métodos da gota de água e do reservatório para situações de fadiga</p> <p>Anexo G - Aparelhos de apoio</p> <p>Anexo H - Vibrações em passadiços por tráfego pedonal</p>
	<p>EN 1990 de 2024 – Parte 2: avaliação de estruturas existentes [10]</p> <p>1. Introdução</p> <p>2. Âmbito</p> <p>3. Referências normativas</p> <p>4. Requisitos</p> <p>5. Regras gerais</p> <p>6. Âmbito da avaliação e objetivos</p> <p>7. Estratégia da avaliação</p> <p>8. Variáveis básicas e atualização</p> <p>9. Modelação, atualização e análise estrutural</p> <p>10. Verificação baseada em métodos quantitativos de avaliação</p> <p>11. Verificação baseada em métodos qualitativos de avaliação</p> <p>12. Intervenções</p> <p>Anexo A – Disposições adicionais para a avaliação de estruturas existentes</p>

- inclusão de disposições sobre robustez de edifícios e pontes, situações de fadiga, aparelhos de apoio e vibrações em passadiços;
- consideração da avaliação de estruturas existentes.

Para além destas evoluções, visíveis da nova organização da norma, existem ainda outras alterações significativas referidas neste artigo, designadamente sobre:

- classes de consequência, agora incluídas no texto da norma;
- sustentabilidade.

Na EN 1990 de 2024 [8], [9], [10], o texto da norma (partes 1 e 2) e os Anexos A e G da parte 1 são normativos. Todos os restantes anexos são informativos. Os Anexos G e H da parte 1 são específicos de pontes.

2.1 Classes de consequência

A EN 1990 de 2024 inclui um ponto sobre a consideração de classes de consequência do colapso de uma estrutura ou de uma parte da mesma. A EN 1990 de 2002 já introduzia estas classes no Anexo B, recomendando a sua associação a classes de fiabilidade. A nova versão da EN 1990 considera as classes de consequência no texto da norma e introduz duas novas classes (CC0 e CC4) relativamente à versão de 2002.

A nova versão da norma inclui uma tabela, na cláusula 4.3, sobre a atribuição desta classificação, tendo em conta as consequências da perda de vidas e feridos e as consequências económicas, sociais ou ambientais, sendo a atribuição da classe condicionada pela situação mais severa dos casos referidos (Quadro 2).

Quadro 2 Qualificação das classes de consequência

Classe de consequência	Qualificação indicativa das consequências	
	Perda de vidas humanas ou danos pessoais	Consequências económicas, sociais ou ambientais
CC4 – consequências muito elevadas	Extremo	Enorme
CC3 – consequências elevadas	Alto	Muito grande
CC2 – consequências normais	Médio	Considerável
CC1 – consequências baixas	Baixa	Pequeno
CC0 – consequências muito baixas	Muito baixo	Insignificante

Considera-se que a EN 1990 de 2024 tem as disposições necessárias para o projeto de estruturas classificadas nas classes CC1 a CC3. Para estruturas da classe CC4 deverão ser consideradas outras disposições não incluídas na norma. Para estruturas da classe CC0 são aceites regras alternativas às dos Eurocódigos Estruturais.

A EN 1990 de 2024 inclui exemplos da escolha da classe de consequência para diversos tipos de estruturas. Essa escolha tem implicações na avaliação da fiabilidade estrutural e na gestão da qualidade do projeto e execução da estrutura.

2.2 Robustez estrutural

A robustez estrutural é muito valorizada na versão de 2024 da EN 1990, o que logo se manifesta na sua introdução da norma na lista de requisitos a satisfazer pelas estruturas. As principais novidades da EN 1990 de 2024 relativamente à robustez estrutural são:

- a introdução de uma cláusula normativa (4.4) específica sobre o requisito básico robustez estrutural, o qual indica que uma estrutura deverá ser concebida para ter um nível adequado de robustez, de modo que, durante a vida útil de projeto, não seja danificada por eventos adversos imprevistos numa extensão desproporcional à causa original;
- a introdução de um anexo informativo (Anexo E), com orientações adicionais para reforçar a robustez dos edifícios e pontes.

O Anexo E estabelece estratégias que poderão ser adotadas para incrementar a robustez. Essas estratégias podem passar por dimensionar as estruturas para ações acidentais, associadas a cenários específicos, como explosão, incêndio ou impacto, pela adoção de medidas mitigadoras dessas ações, através de medidas protetoras ou pela adoção de estratégias baseadas na limitação da extensão dos danos. Para este efeito, apresentam-se como possíveis estratégias a adoção de caminhos alternativos de carga, a seleção de elementos críticos que terão de ser dimensionados para resistir às ações de acidente, e a segmentação, através da separação da estrutura em partes distintas.

Estas estratégias podem ser aplicadas a cenários específicos ou a cenários não-específicos, ou seja, cuja causa seja indeterminada. Podem ainda ser concretizadas por métodos de projeto indiretos (por exemplo regras prescritivas) ou diretos (por exemplo análises não-lineares), dependendo da classe de consequência da estrutura em causa.

O Anexo E contém princípios gerais, que poderão ser concretizados para diferentes materiais e estruturas em todos os Eurocódigos Estruturas, remetendo para o anexo nacional a possibilidade de fornecer mais orientações.

Estas alterações resultaram do trabalho desenvolvido por um Grupo Ad Hoc, que contou com representação nacional, constituído no seio do WG6 do CEN/TC250, o qual preparou um relatório científico do Joint Research Centre (JRC) da Comissão Europeia (a publicar em 2024) que deverá conter:

- o estado da arte científico e técnico relativo a diferentes aspetos associados ao projeto para a robustez, incluindo conceitos e terminologia, cenários de perigosidade e de consequências, bem como modelos de avaliação das consequências de uma rotura e métodos de quantificação da robustez através de indicadores de desempenho;
- os pontos fortes e fracos das atuais disposições normativas na Europa, bem como fora da Europa, servindo este trabalho como

base para futuras alterações de forma a alcançar uma visão europeia harmonizada sobre a consideração da robustez na conceção, execução e avaliação de estruturas;

- a apresentação de propostas alternativas sobre estratégias, abordagens e considerações relevantes para o projeto para a robustez, nomeadamente quanto ao dimensionamento de caminhos alternativos de carga.

Não obstante o volume significativo de trabalho realizado desde 2015 sobre este tema, o desafio de encontrar uma visão harmonizada sobre robustez estrutural é um objetivo difícil do ponto de vista da normalização. De facto, atendendo à complexidade e à diversidade do tema, por exemplo as estratégias e disposições de robustez diferem dependendo dos materiais e das tipologias e formas estruturais utilizadas, bem como da utilização prevista. Os objetivos previstos inicialmente para a segunda geração não foram totalmente conseguidos, embora se tenha começado um caminho que permitirá a evolução futura dos Eurocódigos em relação à robustez.

2.3 Sustentabilidade

A EN 1990 de 2024 inclui uma cláusula (4.7) sobre a consideração da sustentabilidade no projeto de estruturas, limitando o impacto das construções nos recursos naturais não renováveis e os impactos sociais e económicos em todo o ciclo de vida das construções, tendo em conta as disposições legais existentes e os compromissos contratuais entre as partes de um processo construtivo.

A norma remete para os anexos nacionais a consideração de requisitos adicionais de sustentabilidade, o que será certamente um dos maiores desafios na elaboração destes anexos.

2.4 Gestão da qualidade

A EN 1990 de 2024 inclui uma cláusula (4.8) e um Anexo (B) sobre a gestão da qualidade de projetos e da execução de estruturas. A cláusula 4.8 refere a necessidade de definição de procedimentos de organização e de controlo da qualidade nas diferentes fases de projeto, na execução e na manutenção estrutural.

No Anexo B são dadas orientações para esse quadro de procedimentos, remetendo para os anexos nacionais a possibilidade de maior detalhe desta informação, tendo em conta o normativo nacional aplicável. São definidos níveis de qualificação e experiência de projeto (DQL), níveis de revisão de projeto (DCL), níveis de classes de execução (EXC) e níveis de inspeção (IL).

Os níveis de qualificação e experiência de projeto são os seguintes:

- DQL3 – com a qualificação e experiência necessária para projetos complexos;
- DQL2 – com a qualificação e experiência necessária para projetos avançados;
- DQL1 – com a qualificação e experiência necessária para projetos correntes.

Os níveis de revisão de projeto são os seguintes:

- DCL3 – verificação detalhada independente;

- DCL2 – verificação normal independente;
- DCL1 – sem verificação.

As classes de execução dependem dos materiais estruturais utilizados, ficando a sua definição remetida para outras normas europeias específicas.

Os níveis de inspeção são os seguintes:

- IL3 – inspeção detalhada independente;
- IL2 – inspeção normal independente;
- IL1 – inspeção interna.

O Anexo B inclui um quadro de exigências mínimas destas classes e níveis para cada classe de consequência. Por exemplo, para a classe de consequência CC3 são exigidos os níveis DQL3, DCL3 e IL3.

2.5 Anexo A1 - Edifícios

O Anexo A1 da EN 1990 de 2024 inclui regras aplicáveis ao projeto de estruturas de edifícios, designadamente:

- exemplos de tipos de edifícios para cada classe de consequência;
- vida útil adotada no projeto para diferentes categorias de edifícios;
- ações e combinações de ações a considerar na verificação de estados limites últimos e de serviço;
- fatores parciais de segurança a considerar nessas verificações;
- valores máximos de deslocamentos verticais e horizontais recomendados em função da utilização dos edifícios;
- limitação de vibrações;
- limitação de movimentos da fundação dos edifícios.

Para a limitação de movimentos da fundação, são consideradas 5 classes de sensibilidade estrutural a movimentos da fundação:

- SSC5 – sensibilidade muito elevada;
- SSC4 – sensibilidade elevada;
- SSC3 – sensibilidade normal;
- SSC2 – sensibilidade baixa;
- SSC1 – sensibilidade muito baixa;

Assim, para cada classe de sensibilidade, são sugeridos os valores máximos de assentamentos diferenciais, de distorções angulares e inclinações. São ainda apresentados exemplos de tipos de edifícios para cada classe de sensibilidade estrutural.

2.6 Anexos A2 a A6

Os Anexos A2 a A6 da EN 1990 de 2024 incluem regras da mesma natureza das aplicáveis ao projeto de estruturas de edifícios, para estruturas de outros tipos como pontes, torres, mastros, chaminés, silos, tanques, estruturas de suporte de gruas e estruturas na costa marítima.

Com a exceção das estruturas na costa marítima, o conteúdo destes anexos é em geral baseado nas regras existentes em outros Eurocódigos da 1.ª geração. A integração do conteúdo existente

na EN 1990 requereu um exercício complexo para garantir a harmonização e a consistência da informação incluída nos diferentes anexos, considerando as partes correspondentes da EN 1991. Em certos casos, este processo envolveu a cooperação do CEN TC 250 com outros comités técnicos, por exemplo gruas, apoios elétricos e estruturas provisórias.

Salienta-se que quando um sistema engloba estruturas que implicam a aplicação de diferentes anexos (A1 a A6), estes devem ser aplicados em conjunto.

2.7 Anexo C - Fiabilidade estrutural

No que concerne a requisitos específicos relativos à gestão da fiabilidade, a EN 1990 de 2024 mantém no essencial as disposições existentes na norma de 2002, mantendo ênfase na utilização do formato de segurança dos coeficientes parciais.

No âmbito da elaboração da segunda geração da EN 1990, foi dada particular relevância à disponibilização de informação sobre as hipóteses e modelos de base a partir dos quais os valores recomendados dos coeficientes parciais foram determinados. Para tal, foi formado um Grupo Ad Hoc no âmbito da SC10 do CEN/TC250 para preparar um relatório científico do JRC com os seguintes objetivos principais:

- apresentação de pressupostos dos valores recomendados na EN 1990 dos coeficientes parciais a aplicar aos valores característicos das ações;
- apresentação dos modelos estocásticos recomendados para as variáveis básicas mais relevantes, considerando diferentes estados limites, materiais e ações;
- apresentação da metodologia de calibração que serviu de base à definição dos valores recomendados destes coeficientes, exemplificando a sua aplicação através de casos de estudo, de forma que os organismos nacionais de normalização, caso assim desejem, possam alterar os pressupostos nos respetivos anexos nacionais, e desta forma calibrar novos valores recomendados dos coeficientes parciais.

Este grupo teve representação nacional e iniciou as suas atividades no verão de 2019, que foram concluídas no final de 2023. O relatório, a aguardar publicação pelo JRC, conterà as principais conclusões dos estudos desenvolvidos, das quais se destacam:

- a importância de, em todos os Eurocódigos, os pressupostos das escolhas relativas à gestão da fiabilidade, incluindo o tratamento das incertezas, ser feito de forma transparente e uniformizada; caso contrário, existiria um risco acrescido de insegurança ou de opções não económicas no projeto ou na avaliação de estruturas;
- os cálculos efetuados deram indicações de que os valores recomendados dos coeficientes parciais conduzem, em média, a um índice de fiabilidade igual a 3,8 para um período de referência de 50 anos, que corresponde ao nível alvo de fiabilidade para o estado limite último de estruturas incluídas na classe de consequência 2; salienta-se que estes resultados, foram obtidos utilizando a definição de valores característicos indicada na

EN 1990, sendo que qualquer alteração a esta definição deve implicar um novo exercício de calibração.

Subsistem, contudo, diversos tópicos que necessitam de investigação futura, entre os quais a definição de:

- níveis alvo de fiabilidade para estruturas novas e existentes, para modelos numéricos não-lineares e para sistemas estruturais;
- modelos probabilísticos de variáveis básicas com base em novos dados;
- métodos e critérios de calibração dos coeficientes parciais;
- formatos explícitos de verificação dos níveis alvo de fiabilidade;
- metodologias seguras para a obtenção dos valores de projeto de variáveis básicas ou valores dos coeficientes parciais considerando informação nova e mais precisa sobre variáveis básicas.

3 EN 1990 de 2024 – parte 2 - avaliação de estruturas existentes

Para intervir numa estrutura existente há que conhecer o enquadramento histórico da época em que foi realizada, as técnicas de construção então adotadas e as normas de projeto então existentes. Para além dos processos associados à evolução do estado de conservação, as estruturas existentes podem vir a tornar-se desadequadas para as necessidades, podem vir a revelar-se com níveis de segurança insuficientes face à evolução das exigências de desempenho ou podem ser objeto de alteração ou adaptação a novas utilizações, daí resultando a necessidade de intervenção. É neste contexto que as recomendações, normas e regulamentos aplicáveis a estruturas existentes têm vindo a merecer uma especial atenção nos últimos anos, até porque a tendência será cada vez mais manter e adaptar as construções existentes evitando a sua demolição e substituição.

Há assim que analisar o património construído em betão, aço, alvenaria e madeira e procurar desenvolver documentação técnica de apoio às intervenções em construções existentes.

A parte 2 da EN 1990 de 2024 não inclui a avaliação da segurança sísmica, matéria que é tratada na EN 1998. O termo reabilitação inclui a reparação e o reforço estrutural (cláusula 3.1.13).

Destacam-se os seguintes conteúdos da parte 2 da EN 1990 de 2024:

- os níveis de fiabilidade estrutural para a avaliação das estruturas existentes podem ser estabelecidos no anexo nacional (cláusulas 4(2) e 10.2.1 Nota 1);
- os coeficientes parciais para as ações podem ser ajustados no anexo nacional (cláusula 10.2(1) Nota 2);
- o âmbito e objetivos da avaliação e a avaliação adotada devem ser claramente definidos (cláusulas 6(1) e 7.1(1));
- a avaliação de uma estrutura existente deve incluir a atualização da geometria existente, das ações atuantes, das características dos materiais, de eventuais alterações e do estado de conservação (cláusulas 5.7, 7.2 e 8(1));

- as estruturas que foram projetadas de acordo com normas antigas poderão ter materiais, pormenorização de armaduras e tolerâncias de execução que requerem modelos apropriados de avaliação da resistência, diferentes dos aplicáveis a novas estruturas (cláusula 7.3(2));
- a deterioração das estruturas existentes tem de ser considerada nos modelos de avaliação da segurança (cláusulas 7.3(4) e 8(4));
- a amostragem e metodologia adotadas para obter informações de uma estrutura existente deve ter a necessária representatividade (cláusula (8.7)); nesta norma não são indicados critérios objetivos nesta matéria;
- o ensaio e a monitorização estrutural podem ser utilizados para verificar e melhorar as hipóteses consideradas na avaliação e calibrar os modelos de cálculo (cláusula 9.4);
- a avaliação das estruturas existentes deverá ser preferencialmente feita com base no método dos coeficientes parciais de segurança (cláusula 10.1(1));
- nas estruturas históricas devem ser evitadas intervenções que resultem na perda ou em grandes modificações do valor histórico, cultural ou societal, recomendando-se a utilização de materiais compatíveis com os materiais originais (cláusula 5(8) e Anexo A6);
- após conceber uma intervenção o modelo de verificação da segurança tem de incorporar eventuais reforços, substituição ou a adição de novos elementos; o dimensionamento e pormenorização dos reforços estruturais deve ser realizado de acordo com as partes dos Eurocódigos relativos às construções existentes incluídos nos Eurocódigos específicos para os vários materiais (cláusulas 1.1.(5) e 10.2.1(4)); o dimensionamento e pormenorização de novos elementos introduzidos na construção existente deve ser realizado de acordo as partes dos Eurocódigos para as estruturas novas (cláusula 1.1.(4));
- o Anexo A inclui informação mais detalhada sobre a metodologia de avaliação das estruturas existentes.

4 Considerações finais e próximos desafios

O principal desafio para a aplicação nacional da norma será o da elaboração a breve prazo do seu anexo nacional. Ao longo do texto já foram feitas considerações sobre essa aplicação, designadamente para os conteúdos classificados como informativos (por exemplo, requisitos de sustentabilidade e de gestão da qualidade).

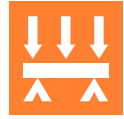
O ponto 4 da introdução da EN 1990 de 2024 refere o conjunto de parâmetros definidos a nível nacional (NDPs) que devem ser contemplados no anexo nacional da norma. Este será um importante desafio a desenvolver nos próximos dois anos, que consiste na melhor escolha nacional para cada NDP e sua fundamentação, com a disponibilização da informação recolhida ao meio técnico nacional.

Embora ainda não esteja incluído na versão da EN 1990 de 2024 em inquérito, antevê-se que futuramente possa ser discutida e aprovada uma emenda que inclua um anexo sobre o projeto assistido por modelos numéricos. A incorporação desse anexo advém de uma percentagem significativa de projetos que recorrem a modelos

numéricos não lineares para a obtenção dos efeitos das ações. Esta evolução espectável do aumento do uso de modelos numéricos pode ser vista como uma oportunidade para a normalização acompanhar esta tendência, limitar o uso de práticas de projeto não regulamentadas e garantir uma concorrência leal. Para tal, está a ser desenvolvido no seio do subcomité 10 (SC10) do CEN/TC250, com representação nacional, um novo anexo informativo a incluir na segunda geração da EN 1990.

Referências

- [1] EN 1990:2002 – Eurocode – Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2002.
- [2] EN 1990:2002/A1:2005 – Eurocode – Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2005.
- [3] EN 1990:2002/A1:2005/AC:2008 – Eurocode – Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2008.
- [4] NP EN NP EN 1990:2009 – Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas, Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [5] NP EN 1990:2009/A1:2019 – Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas, Instituto Português da Qualidade, 2019.
- [6] EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 – Eurocode – Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2010.
- [7] M/515, 2012 – Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of Structural Eurocodes. Ref. Ares (2012)1516834 – 18/12/2012. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General.
- [8] EN 1990:2023 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [9] EN 1990:2023/prA1 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design - Part 1: New structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [10] prEN 1990-2 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design – Part 2: Assessment of existing structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.



2.^a geração do Eurocódigo 1 – Ações em estruturas

2nd generation of Eurocode 1 – Actions on structures

Luís Oliveira Santos
Manuel Pipa

Resumo

Este artigo pretende transmitir uma visão geral da evolução do Eurocódigo 1, norma europeia EN 1991, associada à preparação da sua 2.^a geração, cuja entrada em vigor está prevista para 2027. Para além da apresentação da organização desta 2.^a geração da norma, serão referidas as alterações mais relevantes de cada uma das suas 10 partes, bem como o conteúdo mais relevante das novas partes.


Abstract

This article aims to provide a general overview of the evolution of Eurocode 1, the European standard EN 1991, associated with the preparation of its 2nd generation, which is scheduled to come into force in 2027. In addition to presenting the organisation of this 2nd generation of the standard, the most relevant changes to each of its 10 parts will be mentioned, as well as the most relevant content of the new parts.

Palavras-chave: Ações em estruturas / Ações ambientais / Sobrecargas

Keywords: Actions on structures / Environmental actions / Loads

Luís Oliveira Santos

Presidente da SC 01 da CT 115
Investigador-Coordenador
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0003-2591-2842
luisosantos@lnec.pt

Manuel Pipa

Presidente da SC 01 da CT 115 (2016 - 2023)
Investigador Principal Aposentado
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
mpipa@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SANTOS, O. [et al.] – 2.ª geração do Eurocódigo 1 – Ações em estruturas. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 31-38. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-004>

1 Introdução

A segunda geração dos Eurocódigos Estruturais resulta do Mandato M/515 [1], enviado pela Comissão Europeia ao Comité Europeu de Normalização (CEN) visando a atualização técnico-científica dos Eurocódigos Estruturais, a redução dos parâmetros de determinação nacional e melhorar a facilidade de utilização, garantindo a convergência e harmonização entre os diversos Eurocódigos.

O desenvolvimento da 2.ª geração do Eurocódigo 1 – Ações em estruturas (EN 1991) enquadra-se neste esforço, tendo sido liderado pela subcomissão 1 do Comité Técnico 250 do CEN (CEN/TC250/SC1). Do ponto de vista global, destacam-se como principais alterações decorrentes deste processo a introdução de duas novas partes baseadas em normas ISO: a EN 1991-1-8: *Actions from waves and currents on coastal structures* [1], baseada na norma ISO 21650:2007 [3], e a EN 1991-1-9: *Atmospheric icing* [4], baseada na norma ISO 12494:2017 [5].

No sentido de facilitar a sua utilização, os textos da norma foram reestruturados de modo a tratar no seu corpo principal os casos mais comuns da norma, remetendo os casos específicos para anexo. Houve também uma preocupação de sistematizar a abordagem do conteúdo de cada uma das partes da EN 1991, estabelecendo sucessivamente as situações de projeto, a classificação das ações e, por fim, a representação das ações. Ao longo do documento procurou-se garantir a consistência com a nova geração da EN 1990 [6], [7], destacando-se, neste campo, o facto de ser aplicável a estruturas existentes, tanto na avaliação estrutural, como no projeto de reparação ou reforço.

No presente artigo serão referidas as principais alterações introduzidas nas diferentes partes do Eurocódigo 1, excluindo-se os aspetos referentes à EN 1991-1-2 [10], relativa a ações em estruturas expostas ao fogo, que são abordados num artigo específico, também publicado neste número da rpee [8].

2 Organização da 2.ª geração da EN 1991

A EN 1991 está organizada em 12 partes, que se listam na Tabela 1. Nesta tabela inclui-se também a relação das diversas partes que constituem a versão em vigor desta norma. Relativamente à 1.ª geração, optou-se por designar como normas portuguesas as partes que foram transpostas para o normativo nacional. Na listagem da 2.ª geração é também possível identificar a fase em que se encontra cada uma das partes desta norma: as partes designadas como “prEN” (*draft European standard*) são documentos para a fase de inquérito como projeto de norma europeia; as partes designadas como “FprEN” (*final draft European Standard*) correspondem a documentos revistos, prontos para serem submetidos a Votação Formal.

Da comparação entre as duas gerações sobressaem as duas novas partes anteriormente referidas. Releva-se também a alteração do título da parte 2, que alarga o seu âmbito das pontes a outras obras de engenharia civil. Nas restantes partes da norma assinala-se apenas o ajustamento do título das partes 1-1 e 2.

Tabela 1 Organização da 1.ª e da 2.ª geração do Eurocódigo 1 (EN 1991)

1.ª geração	2.ª geração
NP EN 1991-1-1:2009 Parte 1-1: Ações gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios e sobrecargas em edifícios	FprEN 1991-1-1:2024 <i>Part 1-1: Specific weight of materials, self-weight of construction works and imposed loads for buildings</i> [9]
NP EN 1991-1-2:2010 Parte 1-2: Ações gerais – Ações em estruturas expostas ao fogo	FprEN 1991-1-2:2023 <i>Part 1-2: Actions on structures exposed to fire</i> [10]
NP EN 1991-1-3:2009 Parte 1-3: Ações gerais – Ações da neve	prEN 1991-1-3:2023 <i>Part 1-3: Snow Loads</i> [11]
NP EN 1991-1-4:2010 Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento	prEN 1991-1-4:2024 <i>Part 1-4: Wind Actions</i> [12]
NP EN 1991-1-5:2009 Parte 1-5: Ações gerais – Ações térmicas	FprEN 1991-1-5:2023 <i>Part 1-5: Thermal Actions</i> [13]
NP EN 1991-1-6: 2021 Parte 1-6: Ações gerais – Ações durante a construção	prEN 1991-1-6:2024 <i>Part 1-6: Actions during execution</i> [14]
NP EN 1991-1-7:2021 Parte 1-7: Ações gerais – Ações de acidente	prEN 1991-1-7:2023 <i>Part 1-7: Accidental actions</i> [15]
	prEN 1991-1-8:2024 <i>Part 1-8: Actions from waves and currents on coastal structures</i> [2]
	FprEN 1991-1-9:2023 <i>Part 1-9: Atmospheric icing</i> [4]
NP EN 1991-2:2006 Parte 2: Ações de tráfego em pontes	FprEN 1991-2: 2023 <i>Part 2: Traffic loads on bridges and other civil engineering works</i> [16]
EN 1991-3:2006 Part 3: <i>Actions induced by cranes and machinery</i>	prEN 1991-3:2024 <i>Part 3: Actions induced by cranes and machines</i> [17]
EN 1991-4:2006 Part 4: <i>Silos and tanks</i>	prEN 1991-4:2024 <i>Part 4: Silos and tanks</i> [18]

3 Principais alterações à EN 1991-1-1: Peso específico dos materiais, pesos próprios das construções, sobrecargas em edifícios

Esta parte da norma [9] foi reorganizada de forma a facilitar a sua consulta. Relewa-se a reunião numa única tabela das cargas impostas aos edifícios para todas as categorias de utilização e, numa outra tabela, das cargas horizontais em paredes divisórias e guarda-corpos, mantendo-se, contudo, a generalidade dos valores prescritos. As principais alterações foram a criação de uma subcategoria adicional G2 de garagens para veículos com peso bruto superior a 160 kN e a divisão das sobrecargas em escadas e patamares em 3 subcategorias (S1, S2, S3).

No que diz respeito às sobrecargas em edifícios residenciais, sociais, comerciais e administrativos, foi atualizada a forma como as divisórias podem ser tratadas como cargas distribuídas. É também relevante a alteração da forma de determinação dos fatores de redução a aplicar aos valores das sobrecargas indicados para os pavimentos e coberturas acessíveis (fator α_λ) e aos valores das sobrecargas totais provocadas por vários pisos em pilares e paredes (fator α_n). Em ambos os casos, o Anexo Nacional poderá indicar regras diferentes.

Em relação às sobrecargas em terraços devidas a helicópteros, foi também criada uma classe adicional de helicóptero (HC3),

correspondente a uma carga de descolagem do helicóptero compreendida entre 60 kN e 120 kN.

Mantém-se o anexo A, informativo, que indica os valores nominais dos pesos volúmicos dos materiais de construção e dos valores nominais dos pesos volúmicos e dos ângulos de talude natural de materiais armazenados, tendo sido removido o anexo B, relativo a barreiras de segurança e guarda-corpos em parques de estacionamento de veículos.

4 Principais alterações à EN 1991-1-3: Ações da neve

As ações da neve têm uma aplicação restrita no território nacional. Contudo, afigura-se conveniente também sintetizar as alterações mais significativas que esta nova geração da norma [11] introduziu na sua quantificação, destacando-se:

- A aplicação de novos modelos baseados em dados experimentais de última geração disponíveis para os climas europeus, por exemplo, um modelo atualizado para a carga de neve nas coberturas;
- A consideração da carga de neve para outros tipos de coberturas;
- A implementação de modelos atualizados e específicos para os efeitos locais da neve;

- O coeficiente de exposição, C_e , foi atualizado a fim de considerar o aumento da carga de neve em zonas localmente abrigadas da cobertura;
- Os coeficientes de neve foram revistos e foi introduzido um novo modelo de neve para coberturas inclinadas (de duas águas);
- Para as coberturas planas, a influência das dimensões da cobertura é agora tida em conta, bem como a presença de filas de painéis inclinados, designadamente painéis fotovoltaicos;
- Para as cúpulas, é introduzido um novo modelo de carga de neve, baseado na simplificação dos modelos relevantes da norma ISO 4355:2013 [16] e da norma ASCE/SEI 7-16 [17];
- Foi atualizada a forma da carga de neve para considerar o deslocamento da neve junto a saliências e obstáculos, passando o coeficiente de forma da carga de neve e a extensão do deslocamento a depender do coeficiente de exposição;
- Foram introduzidos novos coeficientes de forma da carga de neve para coberturas inclinadas que se intersectam;
- Para coberturas contíguas e próximas de obras de construção mais altas, foi introduzido um novo modelo para a carga de neve "desequilibrada" na cobertura inferior, a fim de corrigir inconsistências detetadas na norma atual.

5 Principais alterações à EN 1991-1-4: Ações do vento

A evolução da EN 1991-1-4 [12] permitiu alargar o seu campo de aplicação para edifícios com alturas compreendidas entre 200 m e 300 m, bem como para silos e tanques. Foi também desenvolvida uma nova formulação para a determinação da velocidade média e da intensidade da turbulência até 300 m.

Os dois procedimentos definidos na norma atual para a determinação do fator estrutural, c_{sd} , objeto dos atuais anexos B e C, foram unificados no anexo informativo F. O mesmo sucedeu com as duas abordagens para a determinação das amplitudes do vento lateral excitado por vórtices, que foram unificadas no anexo informativo H.

Apesar da organização do corpo da EN 1991-1-4 ter sido ajustada, tendo em vista uma maior facilidade de consulta, as maiores diferenças são nos seus anexos, uma vez que dos atuais 6 anexos (A a F), a prEN 1991-1-4:2024 [12] passou a dispor de 13 anexos (A a M). Para este efeito contribuiu a inclusão de muitos valores de coeficientes aerodinâmicos para tipos de estruturas não considerados na norma atual, de modo a abranger a maioria dos projetos, e que foram distribuídos por três novos anexos normativos C (para pressões em superfícies), D (para pressões em paredes e coberturas) e E (para forças em estruturas e elementos estruturais).

Os restantes anexos são informativos, destacando-se o tratamento das ações de vento lateral e de torção em edifícios sensíveis, incluído no anexo G, e a introdução de um novo anexo J, sobre a resposta de torres treliçadas de aço e dos mastros espiados.

Por fim, os novos anexos K, L e M fornecem orientações, respetivamente, sobre a determinação de parâmetros de projeto a partir de testes em túneis de vento e simulações numéricas, sobre

a determinação das velocidades do vento a partir de medições em estações meteorológicas e sobre modelos probabilísticos para ações do vento.

6 Principais alterações à EN 1991-1-5: Ações térmicas

A quantificação das ações térmicas teve diversas alterações [13], destacando-se as medidas que afetam os edifícios e as pontes.

Para os edifícios, foi incluída numa única tabela, resultante da fusão das tabelas de temperaturas interiores e exteriores, a indicação dos valores máximos e mínimos da temperatura uniforme a considerar no dimensionamento de um edifício, em função do nível do edifício a considerar (em elevação ou subterrâneo).

Nas pontes, e tendo em consideração que o valor mínimo ($T_{N,min}$) e valor máximo ($T_{N,max}$) da temperatura uniforme de uma ponte devem ser obtidos a partir da temperatura mínima do ar à sombra (T_{min}) e da temperatura máxima do ar à sombra (T_{max}), foi inserida uma tabela que relaciona estes valores em função do tipo de tabuleiro (Tabela 2).

Tabela 2 Temperatura máxima e mínima uniforme de uma ponte

Tipo de tabuleiro	$T_{N,max}$ (°C)	$T_{N,min}$ (°C)
Tipo 1: tabuleiro de aço	$T_{max} + 16$	$T_{max} - 3$
Tipo 2: tabuleiro misto aço-betão	$T_{max} + 4$	$T_{max} + 4$
Tipo 3: tabuleiro em betão	$T_{max} + 2$	$T_{max} + 8$

Foi também introduzida uma nova abordagem para a consideração de incertezas relacionadas com a temperatura inicial da ponte (T_0), considerada como a temperatura na fase relevante da restrição dos seus movimentos durante a construção. Nesta abordagem, que se ilustra na Figura 1, considera-se que o valor de T_0 estará contido no intervalo delimitado por $T_{0,inf}$ e $T_{0,sup}$, pelo que o valor característico da amplitude de contração máxima da componente uniforme da temperatura da ponte ($\Delta T_{N,con}$) deve ser determinado através da expressão (1) e o valor característico da amplitude de dilatação máxima da componente uniforme da temperatura da ponte ($\Delta T_{N,exp}$) obtido através da expressão (2). Estes valores característicos são particularmente relevantes para o dimensionamento dos aparelhos de apoio e das juntas de dilatação.

$$\Delta T_{N,con} = T_{0,sup} - T_{N,min} \quad (1)$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{N,max} - T_{0,inf} \quad (2)$$

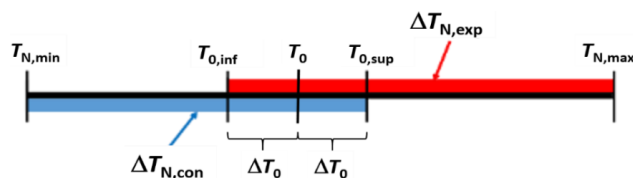


Figura 1 Valor característico da amplitude de contração máxima ($\Delta T_{N,con}$) e da máxima expansão ($\Delta T_{N,exp}$) da componente uniforme da temperatura da ponte

Destaca-se ainda o alargamento do âmbito de aplicação da norma, de modo a incluir princípios para a avaliação das ações térmicas em elementos estruturais devidas à pavimentação de asfalto quente em tabuleiros de pontes.

7 Principais alterações à EN 1991-1-6: Ações durante a construção

A nova geração da EN 1991-1-6 [14] é constituída por 7 secções e dois anexos normativos. No corpo da norma destaca-se a inclusão de uma secção dedicada a “Considerações adicionais sobre ações durante a execução”, na qual são abordadas as ações devidas às imperfeições, às forças laterais para verificação de estabilidade e às ações aplicadas dinamicamente. Os dois anexos, ambos normativos, correspondem a uma atualização dos atuais anexos A1 e A2, sendo o anexo A dedicado às regras complementares para edifícios durante a execução e o anexo B sobre as regras complementares para pontes durante a execução. O atual anexo B (informativo), relativo a ações em estruturas durante obras de alteração, de reconstrução ou de demolição, foi removido na nova versão da norma.

A evolução da EN 1991-1-6 compreendeu uma atualização e clarificação do âmbito da sua aplicação e dos pressupostos, bem como uma delimitação relativamente à utilização de normas de produtos relevantes para estruturas e equipamentos auxiliares, como cimbres, equipamentos de trabalhos temporários ou andaimes. Procurou-se também clarificar o conceito de projeto de estruturas auxiliares, melhorar a descrição das situações de projeto e atualizar a classificação e representação das ações.

Procedeu-se também à atualização das orientações para determinação dos valores característicos das ações climáticas, expressas na Tabela 3.

Tabela 3 Orientação para determinação dos valores característicos das ações climáticas

Duração das atividades	Método para determinar valores característicos
≤ 5 dias	Os valores característicos são determinados com base em dados meteorológicos fiáveis que abrangem um período que se estende por toda a duração máxima prevista da atividade em análise.
≤ 1 ano (mas > 5 dias)	Os valores característicos são tomados conforme especificado na parte aplicável da EN 1991 (ou seja, com base numa probabilidade anual de excedência de 0,02), contabilizando, quando aplicável, variações sazonais por fatores sazonais.
> 1 ano	Os valores característicos são considerados conforme especificado na parte aplicável da EN 1991 (ou seja, com base numa probabilidade anual de excedência de 0,02), mas negligenciando fatores sazonais.

8 Principais alterações à EN 1991-1-7: Ações de acidente

A nova geração da EN 1991-1-7 [15] não apresenta alterações muito significativas relativamente à versão atual. Para além de se procurar melhorar a redação de algumas cláusulas e garantir a compatibilidade com a EN 1990 [6], [7], procedeu-se à reorganização da categorização das classes de consequência e a esclarecimentos sobre o impacto das embarcações fluviais, de canal ou marítimas. Foram adicionadas novas fórmulas de impacto de navios e esclarecidas questões relativas a explosões internas. Por fim, foi adicionado um novo anexo E, sobre ações devidas a resíduos.

9 A nova EN 1991-1-8: Ações das ondas e das correntes nas estruturas costeiras

A EN 1991-1-8 [2] estabelece princípios e regras para determinar os valores das ações das ondas e das correntes em estruturas e obras de engenharia civil na zona costeira. É uma nova parte da norma, introduzida no âmbito da 2.ª geração dos Eurocódigos Estruturais. Trata-se de um documento extenso, constituído por 13 secções e 8 anexos informativos (anexos A a H).

A sua elaboração foi baseada na norma ISO 21650:2007 [3], como referido anteriormente, mas com um âmbito mais restrito, na medida em que aborda apenas as ações. Em contrapartida, a EN 1991 1 8 introduz coeficientes parciais de segurança e estabelece combinações de ações, omissas na supracitada norma ISO.

Os principais tópicos cobertos neste documento são os seguintes:

- Bases do projeto, enquadrando as ações das ondas e das correntes na estrutura de projeto do Eurocódigo;
- Condições hidrodinâmicas (condições ambientais do mar, essencialmente nível da água, condições das ondas, correntes);
- Ações de ondas e correntes em estruturas cilíndricas fixas e tabuleiros suspensos;
- Ações de ondas e correntes em quebra-mares de taludes; Ações de ondas e correntes em quebra-mares de parede vertical;
- Ações de ondas e correntes em quebra-mares mistos;
- Ondas e ações atuais em aterros costeiros;
- Ações de ondas e correntes em estruturas flutuantes;
- Projeto assistido por ensaios em modelo físico;
- Ações de ondas e correntes numa análise de fiabilidade.

Os 8 anexos fornecem informações complementares para a conceção dos vários tipos de estruturas costeiras sujeitas às ações das ondas e das correntes, incluindo tópicos específicos como, por exemplo, orientações adicionais relacionadas com a modelação física das estruturas costeiras e a análise da fiabilidade das estruturas costeiras.

Como aspetos mais significativos da EN 1991-1-8 referem-se a implementação da “*Hydrodynamic Estimation Approach*” (HEA), definida como metodologia para avaliar parâmetros meteoceânicos que se relacionam com a classe de consequência da estrutura e as

condições hidrodinâmicas locais, e a implementação de “Design Approaches” (DA). Pretende-se assim garantir que os métodos e requisitos para o projeto possam ser estabelecidos em função do nível HEA, do nível DA e das classes de consequência.

10 A nova EN 1991-1-9: Ações do gelo atmosférico

A norma EN 1991-1-9 [4] fornece princípios e regras para determinar os valores das cargas devidas à formação de gelo atmosférico a utilizar para os seguintes tipos de estruturas: mastros, torres, antenas e estruturas de antenas, cabos, tirantes, cabos de sustentação e

estruturas semelhantes, cabos para teleféricos, edifícios ou partes de edifícios expostos a possíveis formações de gelo e torres para linhas de transmissão de energia ou turbinas eólicas.

A EN 1991-1-9 é uma nova parte da norma, introduzida no âmbito da 2.ª geração dos Eurocódigos Estruturais, cuja elaboração foi baseada na norma ISO 12494:2017 [5], com o cuidado de garantir a coerência com a EN 1990 [6], [7]. É formada por 7 secções e 4 anexos informativos.

Realça-se o facto de a carga do gelo ser determinada e classificada de acordo com as classes de gelo (IC), tanto para o gelo vidrado (ICG) como para a geada (ICR), uma vez que as suas características são diferentes. Para a definição das classes de gelo é utilizado o valor

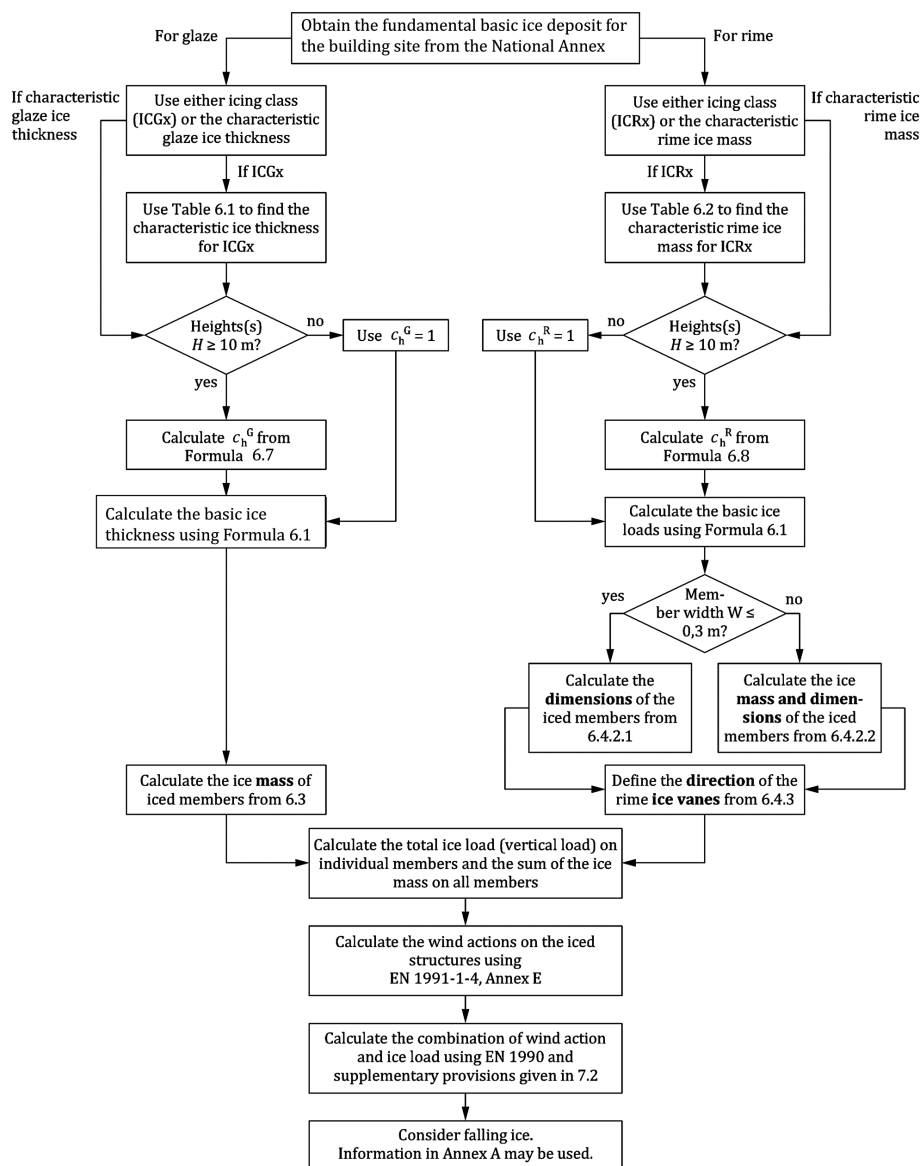


Figura 2 Guia para a utilização da EN 1991-1-9 [4]

característico para um período de retorno de 50 anos da acumulação de gelo no coletor de referência, sendo estabelecidas 6 classes de IGC e 10 classes de ICR.

Importa também referir que a EN 1991-1-9 considera a combinação com ações do vento e define um fator de altura tanto para o gelo de vidro como para a geada.

Os anexos fornecem informação complementar sobre a forma como o gelo atua nas estruturas, bem como os diferentes tipos de gelo, destacando-se, no anexo D, um fluxograma para a utilização da EN 1991-1-9, que se reproduz na Figura 2.

A maior parte das informações sobre como medir e modelar a formação de gelo atmosférico foi remetida para os anexos nacionais.

11 Principais alterações à EN 1991-2: Ações de tráfego em pontes e outras obras de engenharia civil

A EN 1991-2 [16] define as sobrecargas associadas ao tráfego rodoviário, às ações pedonais e ao tráfego ferroviário em pontes e obras de engenharia civil associadas. A sua evolução para a 2.ª geração levou ao alargamento do seu campo de aplicação para incluir outras obras de engenharia civil, designadamente as obras geotécnicas, o que motivou a alteração do seu título. Com efeito, os modelos e valores de carga indicados nesta 2.ª geração da EN 1991-2 são também aplicáveis ao dimensionamento de muros de contenção adjacentes a estradas e linhas ferroviárias, bem como ao dimensionamento de terraplanagens sujeitas a ações de tráfego rodoviário ou ferroviário.

A estrutura desta FprEN 1991-2:2023 [16] é semelhante à norma atualmente em vigor, mantendo como principais secções as ações devidas aos tráfegos rodoviário, pedonal e ferroviário. Em relação aos anexos, releva-se a atualização do anexo informativo E, sobre os limites de validade do modelo de carga HSLM (*High Speed Load Model*) e a supressão dos antigos anexos informativos F e G. Mantêm-se os restantes anexos, nomeadamente os anexos informativos A e B, os anexos normativos C e D e o anexo informativo H, agora designado por F. Foi criado um novo anexo informativo (Anexo G – “*Dynamic load models for footbridges*”) para pontes pedonais com requisitos adicionais relacionados com o anexo H da norma EN 1990, visando, em particular, as ações dinâmicas e as vibrações induzidas por peões, com base na literatura mais avançada.

Relativamente ao conteúdo, destacam-se também algumas alterações nos aspetos geotécnicos, nomeadamente uma nova redação, visando uma clarificação dos termos e definições, principalmente relacionadas com as cargas do tráfego ferroviário, bem como a introdução de duas novas cláusulas relativas a modelos de carga estática para estruturas geotécnicas para o tráfego rodoviário (6.9) e para o tráfego ferroviário (8.10).

Foram efetuados alguns ajustamentos tendo em vista a coerência com o Anexo A.2 da norma EN 1990 e outras partes do Eurocódigo relativas a pontes [6], [7]. Procedeu-se também à atualização das cláusulas relacionadas com o relatório CEN/TR 17231[21] para a interação via-ponte e à inclusão das bases de projeto para barreiras acústicas em linhas ferroviárias.

12 Principais alterações à EN 1991-3: Ações induzidas por guias e máquinas

A EN 1991-3 [17] fornece orientações para o projeto estrutural e geotécnico de edifícios e obras de engenharia civil que estão sujeitos a ações de pontes ou pórticos rolantes, ou a ações de máquinas que causem uma carga dinâmica nas estruturas de apoio.

Do ponto de vista formal, a nova geração deste documento é constituída por 7 secções e três anexos informativos. Em relação à versão anterior, destaca-se a introdução destes três anexos e a eliminação do anexo normativo A, cuja temática é tratada no anexo A.5 da nova geração da EN 1990 [6], [7], bem como do anexo B, também normativo, cujos requisitos são agora abrangidos pela cláusula 6.9 e pelo novo anexo A.

Relativamente ao conteúdo, para além da clarificação do âmbito de aplicação, releva-se a atualização das definições, juntamente com o anexo A.5 da EN 1990, com base na ISO 4306-1 [22], especialmente no que se refere aos termos relacionados com as guias. Importa também referir a melhor definição de alguns princípios e requisitos adicionais relativos às ações transferidas pelas guias ou máquinas na interface com as suas estruturas de suporte, bem como a clarificação e melhoria da forma de consideração do vento em serviço.

13 Principais alterações à EN 1991-4: Ações em silos e tanques

A EN 1991-4 [18] fornece orientações para a determinação de ações para o projeto estrutural de silos e tanques.

A 2.ª geração desta norma é um documento extenso, constituído por 11 secções: as três primeiras genéricas (âmbito de aplicação; referências normativas; termos, definições e símbolos); sete dedicadas aos silos e uma secção (secção 11) dedicada aos tanques. O documento compreende também 7 anexos, dos quais apenas dois são normativos: o anexo C, que contém disposições adicionais para identificar as propriedades das partículas sólidas armazenadas em silos, e o anexo D, que contém disposições complementares para a determinação dos parâmetros das partículas sólidas armazenadas, necessários para o cálculo das cargas dos silos ao longo da EN 1991-4.

Na elaboração deste documento houve o cuidado de melhorar a sua redação, no sentido de clarificar o uso dos diversos termos associados aos silos. Tal como nas anteriores partes deste Eurocódigo, foi dada particular atenção à consistência com a nova EN 1990 [6], [7], designadamente com o seu anexo A.4.

Foram introduzidos novos conteúdos, de que se destacam:

- Novas regras para a interação sólido armazenado - estrutura do silo, com base nos melhores dados disponíveis para os parâmetros materiais, como, por exemplo, o módulo tangente de uma partícula sólida;
- Novas regras para a consideração de pressões nas paredes verticais dos silos com um cone invertido interno, correspondendo à prática atual, uma vez que se aplicam especificamente a grandes silos de betão utilizados para o armazenamento do cimento ou dos seus constituintes;

- Uma nova secção para os silos retangulares com paredes flexíveis;
- Uma nova secção sobre pressões em tremonhas cónicas assimétricas, que inclui uma regra para cargas com grande excentricidade.

O documento tem uma estrutura que distingue os casos simples de silos, com saída e entrada centrais, que são a maioria e são tratados como "Casos Fundamentais de Carga de Silos" (*Silo Fundamental Load Cases* – SFLC), dos "Casos Especiais de Carga em Silos" (*Special Silo Load Cases* – SSLC), em que aquelas condições não se verificam.

Para facilitar a utilização da norma foi introduzido um novo anexo informativo (Anexo G), constituído por um conjunto de fluxogramas: dois dedicados a casos de carga fundamentais e os restantes a casos de carga especiais, de acordo com a seguinte sequência:

- a) Casos de carga fundamentais em silos para paredes verticais (SFLC W);
- b) Casos de carga fundamentais em silos para tremonhas e bases de silos (SFLC H);
- c) Casos de carga especiais em silos para paredes verticais 1 (SSLC W1);
- d) Casos de cargas especiais em silos para paredes verticais 2 (SSLC W2);
- e) Casos de cargas especiais em silos para paredes verticais 3 (SSLC W3);
- f) Casos de cargas especiais em silos para tremonhas e bases de silos (SSLC H).

14 Considerações finais

No presente artigo faz-se uma apresentação sucinta da segunda geração do Eurocódigo 1 – Ações em estruturas (EN 1991), designadamente da sua organização e conteúdo, destacando-se as alterações mais relevantes introduzidas nesta versão.

Na elaboração desta 2.ª geração da norma houve o cuidado de sistematizar o conteúdo de cada uma das partes da EN 1991, estabelecendo sucessivamente as situações de projeto, a classificação das ações e, por fim, a representação das ações. Procurou-se também garantir a consistência com a 2.ª geração da EN 1990, destacando-se o facto de ser aplicável a estruturas existentes, tanto para a avaliação estrutural, como no projeto de reparação ou reforço. Outro motivo de destaque prende-se com a introdução de duas novas partes: a EN 1991-1-8, relativa a "Ações das ondas e das correntes nas estruturas costeiras" e a EN 1991-1-9, sobre "Ações devidas ao gelo atmosférico".

À comunidade técnica e científica nacional cabe agora elaborar os anexos nacionais dos 12 documentos que constituem esta norma, envolvendo diversas ações naturais, cujo carácter marcadamente regional torna esta tarefa um interessante desafio.

Referências

- [1] M/515, 2012 – Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of Structural Eurocodes. Ref. Ares (2012)1516834 - 18/12/2012. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General.
- [2] prEN 1991-1-8:2024 – Eurocode 1 – Actions on structures - Part 1-8: Actions from waves and currents on coastal structures. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [3] ISO 21650:2007 – Actions from waves and currents on coastal structures, 2007.
- [4] FprEN 1991-1-9:2023 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-9: Atmospheric icing. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [5] ISO 12494:2017 – *Atmospheric icing of structures*, 2017.~
- [6] EN 1990:2023 – Eurocode - Basis of structural and geotechnical design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [7] EN 1990:2023/prA1 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design - Part 1: New structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [8] VILA REAL, P. – 2.ª geração das Partes 1-2 (verificação da resistência ao fogo) dos Eurocódigos Estruturais. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 125-138. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-014>
- [9] FprEN 1991-1-1:2024 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-1: Specific weight of materials, self-weight of construction works and imposed loads for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [10] FprEN 1991-1-2:2023 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-2: Actions on structures exposed to fire. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [11] prEN 1991-1-3:2023 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-3: Snow loads. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [12] prEN 1991-1-4:2024 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-4: Wind Actions. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [13] FprEN 1991-1-5:2023 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-5: Thermal Actions. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [14] prEN 1991-1-6:2024 – Eurocode 1 – Actions on structures - Part 1-6: Actions during execution. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [15] prEN 1991-1-7:2023 – Eurocode 1 – Actions on structures - Part 1-7: Accidental actions. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [16] FprEN 1991-2: 2023 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges and other civil engineering works. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [17] prEN 1991-3:2024 – Eurocode 1 - Actions on structures - Part 3: Actions induced by cranes and machines. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [18] prEN 1991-4:2024 – Eurocode 1 – Actions on structures – Part 4: Silos and tanks. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [19] ISO 4355:2013 – Bases for design of structures – Determination of snow loads on roofs, 2013.
- [20] ASCE/ SEI 7-16 – Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE standard, 2016.
- [21] CEN/TR 17231:2018 – *Eurocode 1: Actions on Structures. Traffic Loads on Bridges. Track-Bridge Interaction. Technical Report*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2018.
- [22] ISO 4306-1:2007 – *Cranes – Vocabulary* – Part 1: General, 2007.



2.^a geração do Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão

2nd generation of Eurocode 2 – Design of concrete structures

João F. Almeida

Resumo

A primeira geração do Eurocódigo 2 – Estruturas de betão – foi publicada há cerca de duas décadas. No período que se seguiu à sua publicação, verificou-se um importante desenvolvimento na área do betão estrutural, aspeto que, por si só, constituiria um forte motivo para se proceder a trabalhos de revisão e atualização da norma.

O artigo resume o conteúdo e organização da futura EN 1992-1-1, salientando as principais alterações e atualizações introduzidas. Este documento, já formalmente aprovado pelo CEN/TC250 em novembro de 2023, integra o conjunto da segunda geração de Eurocódigos Estruturais.

Abstract

The first generation of Eurocode 2 – Concrete structures – was published about two decades ago. In the period following its publication, there has been a significant development in the field of structural concrete, which would be a strong reason for revising and updating the standard.

The article summarises the content and organisation of the future EN 1992-1-1, highlighting the main changes and updates introduced. This document, already formally approved by CEN/TC250 in November 2023, forms part of the second generation of Structural Eurocodes.

Palavras-chave: Eurocódigo 2 / Projeto / Estruturas de betão / EN 1992-1-1 / 2.^a geração de Eurocódigos

Keywords: Eurocode 2 / Design / Concrete structures / EN 1992-1-1 / 2nd generation of Eurocodes

João F. Almeida

Presidente da SC 02 da CT 115
Professor Associado
IST, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
joao.f.de.almeida@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ALMEIDA, J. – 2.ª geração do Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 39-48. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-005>

1 Introdução

A primeira geração do Eurocódigo 2 é constituída por 4 documentos [1,2,3,4], publicados como normas europeias entre 2004 e 2006, após intensos trabalhos de preparação ocorridos nas duas décadas precedentes. A publicação das correspondentes normas nacionais teve lugar em 2010 [5, 6], 2018 [7] e 2020 [8].

Entretanto, a CEN/TC 250/SC2 EN 1992 iniciou em 2012 a discussão sobre o âmbito e organização dos trabalhos para preparação da 2.ª geração da EN 1992, cujas atividades técnicas relacionadas com o processo de revisão se realizaram principalmente a partir de 2015.

O desenvolvimento dos trabalhos correspondeu à elaboração, análise e discussão de sucessivas versões de trabalho das futuras EN 1992-1-1 e EN 1992-1-2, processo que conduziu à sua aprovação formal em novembro de 2023 [9].

O presente artigo resume os aspetos principais referentes ao conteúdo e organização da 2.ª geração da EN 1992-1-1 [9], salientando as alterações principais que se verificam em relação à atual versão.

Os aspetos referentes à nova EN 1992-1-2 serão abordados num outro artigo [10], publicado no presente número da **rpee**.

2 Conteúdo e organização do documento

2.1 Considerações gerais

Considera-se que ao longo de todo o processo de revisão das normas foi realizado um enorme trabalho de atualização do estado do conhecimento na área do betão estrutural. Em particular o **fib** Model Code 2010 [11] foi extensamente utilizado como documento de referência no processo de revisão, sendo em muitos casos esta informação de base complementada com estudos em curso para a preparação do **fib** Model Code 2020 [12].

De todo este procedimento resultou que as justificações para as muitas alterações efetuadas no processo de revisão, bem como a sustentação das propostas para os novos assuntos que não constavam das anteriores versões, tenham sido objeto de extensa calibração com bases experimentais. Toda esta informação foi reunida num extenso volume, “*Background document to FprEN 1992-1-1*” [13], com enorme interesse para uma análise e justificação mais detalhada das alterações introduzidas.

Como resultados gerais do trabalho efetuado salientam-se os seguintes pontos [14, 15], que se refletem numa alteração significativa na organização e, sobretudo, no conteúdo do atual documento:

- como critério geral, utilizado em todo o documento, a preferência pela adoção de prescrições de dimensionamento baseadas em modelos físicos, em detrimento de propostas de base empírica;
- apresentam-se primeiramente prescrições mais simples de aplicar, geralmente utilizáveis em situações correntes de projeto (parte principal, cláusulas 4 a 14), sendo, em alguns casos, posteriormente mais detalhadas / elaboradas (em geral nos Anexos), que poderão ser mais apropriadas para situações

particulares, por exemplo, para o projeto de estruturas existentes (Anexo I);

- sendo a maioria das prescrições independentes do tipo de estrutura, procede-se à integração da atual parte referente a pontes, EN 1992-2:2005 [2], na EN 1992-1-1 [9] – a informação referente a este tipo de estruturas é complementada, no Anexo K, com indicações específicas para o projeto de pontes;
- pela mesma razão, também a anterior EN 1992-3:2006 [3], referente a silos e reservatórios, passará a estar integrada na EN 1992-1-1, sendo neste caso a informação adicional específica referente a este tipo de estruturas incluída nos Anexos D e H;
- procede-se à introdução de novos tópicos relacionados com a sustentabilidade das estruturas de betão;
- procede-se, em geral nos anexos, à introdução de tópicos referentes a desenvolvimentos recentes na área do betão estrutural, tanto no que se refere à utilização de novos materiais, como à sofisticação verificada nos modelos para análise e verificação da segurança das estruturas de betão.

No parágrafo seguinte apresenta-se o conteúdo da 2ª geração da EN 1992-1-1 [9].

2.2 Conteúdo da nova EN 1992-1-1

A nova EN 1992-1-1 [9] está organizada numa parte geral / principal, com 15 secções (secções 0 a 14), complementada com 19 anexos (anexos A a R), com as seguintes designações:

- 0 Introduction
- 1 Scope
- 2 Normative references
- 3 Terms, definitions and symbols
- 4 Basis of design
- 5 Materials
- 6 Durability and cover
- 7 Structural analysis
- 8 Ultimate Limit States (ULS)
- 9 Serviceability Limit States (SLS)
- 10 Fatigue
- 11 Detailing of reinforcement and post-tensioning tendons
- 12 Detailing of members and particular rules
- 13 Additional rules for precast concrete elements and structures
- 14 Plain and lightly reinforced concrete structures
- Annex A (informative) Adjustment of partial factors for materials
- Annex B (normative) Time dependent behaviour of materials: Creep, shrinkage and elastic strain of concrete and relaxation of prestressing steel
- Annex C (normative) Requirements to materials
- Annex D (informative) Evaluation of early-age and long-term cracking due to restraint
- Annex E (normative) Additional rules for fatigue verification

- Annex F (informative) Safety formats for non-linear analysis
- Annex G (normative) Design of membrane, shell and slab elements
- Annex H (informative) Guidance on design of concrete structures for water-tightness
- Annex I (informative) Assessment of existing structures
- Annex J (informative) Strengthening of existing concrete structures with FRP
- Annex K (normative) Bridges
- Annex L (informative) Steel fibre reinforced concrete structures
- Annex M (normative) Lightweight aggregate concrete structures
- Annex N (informative) Recycled aggregates concrete structures
- Annex O (informative) Simplified approaches for second order effects
- Annex P (informative) Alternative cover approach for durability
- Annex Q (normative) Stainless reinforcing steel
- Annex R (informative) Embedded FRP reinforcement
- Annex S (informative) Minimum reinforcement areas for crack width control

3 Alterações e atualizações principais em relação à primeira geração do Eurocódigo 2

De entre as muitas alterações introduzidas, que incidem praticamente sobre a totalidade do atual documento, ilustram-se seguidamente algumas das que poderão ter maior impacto na prática de projeto.

3.1 Novos tópicos relacionados com a promoção da sustentabilidade das estruturas de betão

Como se reproduz seguidamente, o novo documento (§ 5.1.3) [9] permitirá que os ensaios para definição da resistência característica do betão possam ser efetuados para idades compreendidas entre 28 e 91 dias, devendo tal ser especificado no projeto.

5.1.3 Strength

(1) The compressive strength of concrete shall be denoted by concrete strength classes which relate to the characteristic (5 %) cylinder strength f_{ck} of the concrete in accordance with EN 206, determined at an age t_{ref} .

(2) The value for t_{ref}

a) should be taken as 28 days in general; or

b) may be taken between 28 and 91 days when specified for a project.

Tal disposição permitirá a utilização de betões com menores conteúdos de cimento, também com mais lento desenvolvimento de resistência, com as vantagens de redução de pegada carbónica que daí podem decorrer, promovendo-se desta forma a sustentabilidade e competitividade das estruturas de betão.

No mesmo sentido, o Anexo N, com carácter informativo, introduz indicações referentes à utilização de betões com agregados reciclados.

3.2 Prescrições referentes a materiais

Propõe-se a extensão do domínio de aplicação da norma a classes de betão até $f_{ck} = 100\text{MPa}$ (C100), a armaduras ordinárias até à classe B700 ($f_{yk} = 700\text{MPa}$) e a armaduras de pré-esforço até à classe Y2060 ($f_{pk} = 2060\text{MPa}$).

Adicionalmente, introduzem-se em anexos, ou atualizam-se os existentes, secções específicas para novos materiais na área do betão estrutural, nomeadamente os seguintes anexos já anteriormente referidos:

- J - Reforço de estruturas existentes com FRP;
- L - Estruturas de betão reforçado com fibras de aço;
- M - Estruturas de betão com agregados leves;
- N - Estruturas de betão com agregados reciclados;
- Q - Armaduras de aço inoxidável;
- R - Betão armado com armaduras FRP.

3.3 Definição da resistência de cálculo do betão

A resistência de cálculo do betão, f_{cd} , é definida de forma única para a determinação dos valores das diversas resistências de cálculo, independentemente do tipo de esforço ou verificação a que se aplica (§ 5.1.6) [9].

5.1.6 Design assumptions

(1) The value of the design compressive strength shall be taken as:

$$f_{cd} = \eta_{cc} \cdot k_{tc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5.3)$$

η_{cc} is a factor to account for the difference between the undisturbed compressive strength of a cylinder and the effective compressive strength that can be developed in the structural member. It shall be taken as:

$$\eta_{cc} = \left(\frac{f_{ck,ref}}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 1,0 \quad (5.4)$$

k_{tc} is a factor considering the effect of high sustained loads and of time of loading on concrete compressive strength.

Note The following values apply unless the National Annex gives different values:

$$f_{ck,ref} = 40 \text{ MPa};$$

$k_{tc} = 1,00$ for $t_{ref} \leq 28$ days for concretes with classes CR and CN and $t_{ref} \leq 56$ days for concretes with class CS where the design loading is not expected for at least 3 months after casting;

$k_{tc} = 0,85$ for other cases including when f_{ck} is replaced by $f_{ck}(t)$ in accordance with 5.1.3(4).

3.4 Fatores parciais de segurança para os materiais

Na secção 4.3.4 – “Partial factors for materials” são primeiramente indicados os valores a considerar (Table 4.3), para a situação que se considera como de referência para projeto, correspondente, segundo a EN 13670 [16], à classe de tolerância 1 e classe de execução 2.

Table 4.3 (NDP) – Partial factors for materials

Design situations – Limit states	γ_s for reinforcing and prestressing steel	γ_c and γ_{CE} for concrete	γ_v for shear and punching resistance without shear reinforcement
Persistent and transient design situation	1,15	1,50*	1,40
Fatigue design situation	1,15	1,50	1,40
Accidental design situation	1,00	1,15	1,15
Serviceability limit state	1,00	1,00	–

Note: The partial factors for materials correspond to geometrical deviations of Tolerance Class 1 and Execution Class 2 in EN 13670.

a The value for γ_{CE} applies when the indicative value for the elastic modulus according 5.1.4(2) is used. A value $\gamma_{CE} = 1,3$ applies when the elastic modulus is determined according to 5.1.4(1).

As bases estatísticas para o estabelecimento dos fatores indicados no quadro anterior são apresentadas no Anexo A (informativo) – “Adjustment of partial factors for materials”. No mesmo anexo apresentam-se indicações para a possível adaptação dos valores anteriores para situações em que seja possível considerar maiores requisitos de qualidade de execução, melhor conhecimento dos materiais ou de tolerâncias geométricas de execução, podendo assim tornar-se mais eficiente a utilização dos materiais, com a consequente maior competitividade das estruturas de betão.

Salienta-se também a abordagem adotada para o fator parcial a utilizar no cálculo dos valores resistentes ao esforço transversal e punção em elementos sem armaduras transversais, com a introdução de um novo fator γ_v que substitui o fator γ_c anteriormente utilizado de forma indiferenciada para todos os esforços. Tal deve-se essencialmente à menor influência da variabilidade da resistência à compressão do betão face à componente de incertezas do modelo, o que se verificou conduzir a uma melhor concordância com os resultados das bases experimentais de referência.

3.5 Prescrições referentes à verificação da durabilidade

Na secção 6. “Durability and cover” [9] propõe-se uma nova metodologia, baseada na avaliação de desempenho, para verificação das condições de durabilidade, com a introdução do conceito ERC (“Exposure resistance classes”), para classificar o betão no que respeita à resistência à corrosão das armaduras, para as várias condições de exposição da estrutura ou elemento estrutural. A designação ERC

constitui assim uma abreviação para um conjunto de requisitos do betão que serão necessários para resistir a um determinado tipo de exposição (associado a uma classe de exposição ambiental).

As regras para definição das ERCs serão incluídas numa nova parte da EN 206 (em fase final de preparação) [17].

O quadro seguinte (Table 6.3) ilustra, neste caso para o efeito da carbonatação, combinações possíveis entre valores de recobrimento, $c_{min,dur}$ e diferentes classes de resistência ERC do betão.

6.5.2.2 Minimum cover for durability

(1) The minimum concrete covers $c_{min,dur}$ dependent on design service life, exposure class and exposure resistance class (ERC) are given in Table 6.3 (NDP) and Table 6.4 (NDP).

NOTE 1 The recommended minimum covers apply unless the National Annex gives other values.

NOTE 2 Additional and intermediate or a selection of exposure resistance classes can be applied according to the National Annex with correspondingly adjusted minimum cover for durability, provided they are based on the same methodology and give protection against deterioration consistent with that inherent in Table 6.3 (NDP) and Table 6.4 (NDP).

Table 6.3 (NDP) – Minimum concrete cover $c_{min,dur}$ for carbon reinforcing steel – Carbonation

ERC	Exposure class (carbonation)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Design service life (years)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRS 0,5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC 1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC 4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

Note 1: XRC classes for resistance against corrosion induced by carbonation are derived from the carbonation depth [mm] (characteristic value 90% fractile) assumed to be obtained after 50 years under reference conditions (400 ppm CO₂ in a constant 65% RH environment and at 20 °C). The designation value of XRC has the dimension of a carbonation rate [mm/√(years)].

Note 2: The recommended minimum concrete cover values $c_{min,dur}$ assume execution and curing according to EN 13670 with at least execution class 2 and curing class 2.

Note 3: The minimum covers can be increased by an additional safety element $\Delta_{cdur,y}$ considering special requirements (e.g. more extreme environmental conditions).

O Anexo P, “Alternative cover approach for durability”, de carácter informativo, mantém, em alternativa e de forma semelhante à atual norma, a possibilidade de definição de um valor mínimo de recobrimento para a durabilidade, sem a utilização explícita do conceito de classes de resistência ERC anteriormente introduzido.

3.6 Prescrições referentes a Estados Limites Últimos de Resistência (ULS)

3.6.1 Esforço transversal e punçoamento

As maiores alterações verificadas referem-se principalmente aos modelos propostos para a verificação da segurança ao esforço transversal e punçoamento, em particular para elementos sem armaduras transversais, razão pela qual são neste artigo ilustradas com maior desenvolvimento.

Trata-se de um tópico que continuou a merecer durante os últimos anos uma atenção muito particular na área do betão estrutural e, de entre algumas propostas analisadas durante os trabalhos de revisão, a decisão incidiu sobre a adoção do modelo baseado na CSCT, “critical shear crack theory” [13].

Os esforços atuantes são, de forma consistente ao longo de todo o documento, apresentados como tensões de corte; define-se um valor resistente mínimo que, a verificar-se, dispensará um cálculo mais detalhado para a verificação da segurança do elemento (§ 8.2.1), como a seguir se reproduz [9].

8.2.1 General verification procedure

(3) In regions of members without geometric discontinuities, the average shear stress over the cross-section τ_{Ed} is defined as:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} \quad \text{or} \quad \tau_{Ed} = \frac{v_{Ed}}{z} \quad (8.18) \text{ e } (8.19)$$

where

V_{Ed} is the design shear force at the control section in linear members;

v_{Ed} is the design shear force per unit width in planar members;

b_w is the width of the cross-section of linear members. The width b_w for cross-sections with variable width and for circular cross-sections is defined in 8.2.3(9);

z is the lever arm for the shear stress calculation defined as $z = 0,9d$; where d refers to the centroid of tensile reinforcement.

(4) The minimum shear stress resistance may be calculated as:

$$\tau_{Rdc,min} = \frac{11}{\gamma_v} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}}} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \quad (8.20)$$

where

γ_v is the partial factor for shear design according to Table 4.3 (NDP) or Tables A.1 (NDP) and A.2 (NDP);

f_{yd} is the design value of the yield strength which has been used to design the flexural reinforcement;

d is the effective depth of the flexural reinforcement. For prestressed members see 8.2.2(6);

d_{dg} is a size parameter describing the failure zone roughness, which depends on the concrete type and its aggregate properties. d_{dg} (in mm) may be taken as:

$$16 \text{ mm} + D_{lower} \leq 40 \text{ mm for concrete with } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa};$$

$$16 \text{ mm} + D_{lower} (60/f_{ck})^2 \leq 40 \text{ mm for concrete with } f_{ck} > 60 \text{ MPa}.$$

NOTE 2 D_{lower} is the smallest value of the upper sieve size D in an aggregate for the coarsest fraction of aggregates in the concrete permitted by the specification of concrete according to EN 206. In case D_{max} is known, D_{lower} can be replaced by D_{max} . The appropriate choice of aggregate size (D) depends on spacing and density of reinforcement. The definition of D_{lower} via D in EN 12620 can lead to a range of aggregate gradings. Similarly EN 206 does not specify a minimum coarse aggregate content. The model is calibrated against tests carried out with typical gradings. The use of non-typical aggregate gradings where the percentage of larger aggregate sizes in relation to D_{lower} is small can result in different behaviour. This can be avoided by specifying grading parameters in addition to D_{lower} .

Por outro lado, aqui referido de forma simples e muito resumida, segundo o modelo físico adotado, a resistência ao esforço transversal em elementos de betão armado sem armaduras transversais depende da abertura da *fenda crítica* que se desenvolve ao longo da alma (proporcional à deformação da armadura longitudinal), e da sua *rugosidade* (relacionada com a dimensão do agregado), bem como da resistência à compressão do betão, o que permite obter a expressão base proposta, a seguir transcrita (§ 8.2.2) [9, 13]:

8.2.2 Detailed verification for members without shear reinforcement

(2) The design value of the shear stress resistance should be taken as:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,66}{\gamma_V} \cdot \left(100 \rho_1 \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \geq \tau_{Rd,c,min} \quad (8.27)$$

where

$$\rho_1 = \frac{A_{st}}{b_w d}$$

A_{st} is the effective area of tensile reinforcement at the distance d beyond the section considered (see Figure 8.7)

A verificação da segurança ao punçoamento, apresentada no § 8.4 [9] tem também por base o mesmo modelo físico atrás referido (CSCT), como a seguir indicado:

8.4 Punching

8.4.1 General

(1) The rules in 8.4 complement those given in 8.2 and cover punching shear in solid slabs and waffle slabs with solid areas over supporting areas (columns, capitals, shear heads, wall ends and wall corners). The rules presented hereafter for supporting areas apply by analogy to loaded areas of planar members and foundations (column bases).

(2) The punching shear resistance shall be verified according to the following procedure:

a) detailed verification of the punching shear resistance may be

omitted, provided that the following condition at the control perimeter $b_{0,5}$ is satisfied:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,c,min} \text{ according to 8.2.1(4)}$$

b) punching shear reinforcement may be omitted when the following condition at the control perimeter $b_{0,5}$ is satisfied

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,c} \text{ according to 8.4.3}$$

8.4.3 Punching shear resistance of slabs without shear reinforcement

(1) The design punching shear stress resistance should be calculated as follows:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_V} \cdot k_{pb} \left(100 \rho_1 \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{0,5}{\gamma_V} \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (8.94)$$

k_{pb} is the punching shear gradient enhancement coefficient that may be calculated as:

$$1 \leq k_{pb} = 3,6 \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2,5 \quad (8.96)$$

Existem também alterações importantes em relação ao atual documento, sobretudo na definição do perímetro de controle para verificação da segurança ao punçoamento (§ 8.4.2) [9], em que o valor médio das tensões atuantes é agora definido a $0,5d$ do contorno da área carregada.

8.4.2 Shear-resisting effective depth, control perimeter and shear stress

(1) The shear-resisting effective depth of the slab d_v should be taken as the distance from the supporting area to the average level of the reinforcement layers, see Figure 8.17.

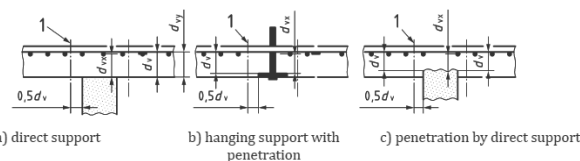


Figure 8.17 – Shear-resisting effective depth of the slab d_v considering effective level of supporting area [9]

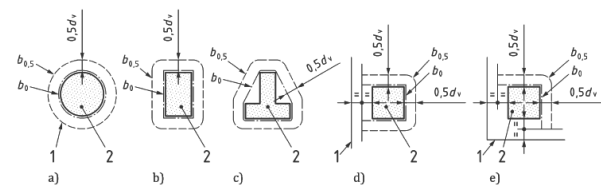


Figure 8.18 – Typical control perimeters $b_{0,5}$ and perimeters b_0 around supporting areas (same perimeter shapes) [9]

Em conclusão deste capítulo, referem-se brevemente outras alterações que, embora menos profundas em relação à atual norma,

correspondem também a atualizações importantes para a prática de projeto.

3.6.2 Esforço transversal – elementos com armaduras transversais

Para o dimensionamento de elementos com armadura transversal mantem-se, no essencial, o modelo de campos de compressões na alma, com inclinação variável (§ 8.2.3) [9].

8.2.3 Members with shear reinforcement

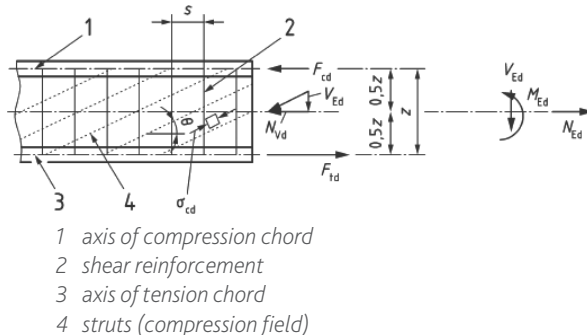


Figure 8.9 – Model and notation for shear reinforced members

As indicações para quantificação da inclinação do campo de compressões são apresentadas de forma mais detalhada em relação ao anteriormente proposto, como a seguir se reproduz.

(4) The inclination of the compression field in the web carrying shear may be selected within the following range:

$$1 \leq \cot\theta \leq \cot\theta_{\min}$$

where the cotangent of the minimal inclination of the compression field θ_{\min} should be for shear reinforcement of ductility class B or C:

$\cot\theta_{\min} = 2,5$ for ordinary reinforced members without axial force;

$\cot\theta_{\min} = 3,0$ for members subjected to significant axial compressive force (average axial compressive stress ≥ 3 MPa) and provided that the depth of the compression chord x determined from a sectional analysis according to 8.1.1 and 8.1.2 is less than $0,25d$. Interpolated values between 2,5 and 3,0 may be adopted for intermediate cases. For very high compressive forces ($x > 0,25d$), (11) can apply;

$\cot\theta_{\min} = 2,5 - 0,1 \cdot N_{Ed} / |V_{Ed}| \geq 1,0$ for members subjected to axial tension.

For shear reinforcement of ductility class A, $\cot\theta_{\min}$ shall be reduced by 20%.

No § 8.2.4 [9] apresentam-se indicações simplificadas para a consideração da interação esforço transversal (no plano da placa) / flexão transversal, informação que é depois complementada, para o caso mais geral, no Anexo G (normativo), "Design of membrane, shell and slab elements".

Finalmente, no § 8.2.5 [9] aprofundam-se e atualizam-se as indicações para a utilização de modelos de escoras e tirantes / modelos de campos de tensões, tornando-as mais consistentes com a verificação da segurança ao esforço transversal e à torção (secções 8.2.3 a 8.2.5, 8.3 e anexo G).

3.7 Prescrições referentes a estados limites de utilização (SLS)

A secção 9, "Serviceability limit states" [9] incide sobre os aspetos de verificação da segurança para condições de serviço, mantendo, no essencial, os princípios gerais e organização da atual norma: limites de tensões e controlo da fendilhação (§9.2), controlo de deformações (§9.3) e, também, de forma sintética, alguns aspetos referentes ao controlo de vibrações (§9.4).

A expressão a utilizar para avaliação da estimativa da abertura das fendas (valor de referência definido na superfície do elemento) é ligeiramente alterada, por forma a melhorar a concordância com os resultados das bases experimentais de referência. Tal facto resulta da melhor aproximação considerada para o efeito do tipo de distribuição de tensões na secção, bem como da consideração explícita da influência da posição relativa das armaduras em relação à direção de betonagem (condições de aderência), em ambos os casos para a avaliação do espaçamento entre fendas e, também, da influência da curvatura da secção sobre o aumento da abertura das fendas (avaliada na superfície do elemento).

Adicionalmente, também fruto da integração da EN 1992-3:2006 [3] na nova EN 1992-1-1:2023 [9], introduzem-se considerações particulares referentes à influência das condições de restrição de paredes ou lajes (nas extremidades ou ao longo do seu desenvolvimento), no controlo da fendilhação para deformações impostas restringidas.

Por outro lado, as indicações referentes ao controlo indireto da fendilhação, que integravam a parte principal da norma, são agora incluídas, com carácter informativo, no Anexo S, "Minimum reinforcement for crack control and simplified control of cracking".

Finalmente, na secção referente ao controlo de deformações, salienta-se a atualização significativa nas disposições incluídas para o controlo indireto da deformação (§9.3.2 "Simplified deflection control by span/depth-ratio for buildings"). Como se transcreve seguidamente, as indicações agora propostas, derivadas de forma consistente com base no método geral [13], permitem, de forma mais clara, a sua aplicação a um domínio mais vasto de situações de projeto.

9.3.2 Simplified deflection control by span/depth-ratio for buildings

(1) Provided that reinforced concrete beams or slabs in buildings, subjected to predominantly uniformly distributed loads, are dimensioned in compliance with the limits of span to effective depth ratio given in Table 9.3, their deflections may be considered as not exceeding a total deflection of $l/250$. In such cases explicit verification of the deflections may be omitted.

Table 9.3 – Limiting span/effective depth ratios l/d for buildings

	Structural system	Required mechanical reinforcement ratio ^a								
		$\omega_r = 0,3$			$\omega_r = 0,2$			$\omega_r = 0,1$		
		LL/TL ^b			LL/TL ^b			LL/TL ^b		
		60 %	45 %	30 %	60 %	45 %	30 %	60 %	45 %	30 %
1	Simply supported beam, one-way spanning simply supported slab	15	14	12	17	15	13	22	19	17
2	End span of continuous beam or one-way spanning slab	20	18	16	22	20	17	29	25	22
3	Interior span of continuous beam or on-way spanning slab	23	21	18	26	23	20	33	29	26
5	Cantilever	7	7	6	8	7	6	10	9	8

Note: This table assumes the quasi-permanent value of the live load with $\psi_s = 0,3$ and that the deflection limit for long-term deflection is $l/250$, where l is the span of the beam or slab.

- a $\omega_r = A_{s,req} / (bw \cdot d) \cdot f_{yd} / f_{cd}$ is the required mechanical tension reinforcement ratio to resist the moment due to the design loads, at mid span for continuous or simply supported elements and at the support for cantilevers. Intermediate values may be interpolated. The limits are conservative for flanged sections.
- b Characteristic values of: LL = characteristic value of live load (imposed or variable); TL = characteristics value of total load. Intermediate values may be interpolated.

(2) For a different maximum total deflection of l/a , the l/d -values of Table 9.3 should be multiplied by $(250/a)$, where a is the deflection ratio factor different from 250.

(3) The limiting span/effective depth ratios of Table 9.3 may be extrapolated to other support conditions by multiplying them by the cubic root of the ratio of the maximum value of the linear elastic deflection of a simply supported beam of the same span and the maximum value of the linear elastic deflection of the actual structure.

(4) For rectangular 2-way flat slabs supported on columns, with slenderness ratio l_{max}/d , the limiting span/effective depth ratios of Table 9.3 may be multiplied by the following factor:

$$\left(\frac{1}{1 + \left(\frac{l_{min}}{l_{max}} \right)^4} \right)^{1/4} \quad (9.21)$$

where

l_{min} is the minimum span of the slab;

l_{max} is the maximum span of the slab.

(5) For rectangular 2-way flat slabs, simply supported on walls or supported on stiff beams on all four sides, with slenderness ratio l_{min}/d , the limiting span/effective depth ratios of Table 9.3 may be multiplied by the following factor:

$$\left(\frac{1}{1 - 0,65 \frac{l_{min}}{l_{max}}} \right)^{1/4} \quad (9.22)$$

3.8 Anexo K, Pontes

Conclui-se esta breve síntese das alterações principais introduzidas na EN 1992-1-1 com uma referência particular ao anexo K [9], com carácter normativo, onde se incluem os aspetos específicos referentes ao projeto de pontes de betão.

Como anteriormente referido, tal decisão resultou de a grande maioria das prescrições serem independentes do tipo de estrutura, o que faz com que as cláusulas gerais, bem como os anexos, se apliquem ao caso das pontes, com exceção de algumas indicações adicionais referidas no anexo K. Como exemplos, referem-se a inclusão de cláusulas adicionais para a verificação da segurança à fadiga, complementos ao cálculo de armaduras mínimas para a garantia de não fragilidade face a uma eventual redução de secção das armaduras pré-esforçadas, bem como prescrições específicas para pontes com pré-esforço exterior ou não aderente, e, ainda, aspetos a considerar no projeto de pontes de tirantes, extradorsadas e suspensas.

Adicionalmente, o anexo está preparado para que se admitam parâmetros nacionais (NDPs) diferentes, mais restritivos, em relação aos considerados no projeto de edifícios.

4 Considerações finais

Apresentou-se uma breve descrição da organização, conteúdo e atualizações principais referentes à segunda geração do Eurocódigo 2 [9], para o projeto de estruturas de betão.

Como salientado, considera-se que ao longo de todo o processo de revisão da norma foi realizado um enorme e muito bem-sucedido trabalho de atualização, em que se procurou refletir a importante evolução verificada no estado do conhecimento na área do betão estrutural durante as últimas duas décadas, sempre que se considerou que este já estava suficientemente consolidado para a sua aplicação prática em projeto.

O domínio de aplicação do documento foi significativamente alargado, com a inclusão de novos tópicos e materiais da atual área do betão estrutural.

A nova geração da EN 1992-1-1 [9] constituirá certamente, a nível internacional, uma norma de referência para o projeto de estruturas de betão.

Referências

- [1] EN 1992-1-1: 2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [2] EN 1992-2: 2005 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 2: Concrete bridges. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [3] EN 1992-3: 2006 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [4] EN 1992-1-2: 2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [5] NP EN 1992-1-1: 2010 – Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [6] NP EN 1992-1-2: 2010 – Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [7] NP EN 1992-2: 2018 – Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão – Parte 2: Pontes de betão – Projeto e disposições construtivas. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [8] NP EN 1992-3: 2020, Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão – Parte 3: Silos e reservatórios. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [9] EN 1992-1-1: 2023 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Parte 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [10] VILA REAL, P. – 2.ª geração das Partes 1-2 (verificação da resistência ao fogo) dos Eurocódigos Estruturais. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 125-138. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-014>
- [11] fib: 2013 – Fédération Internationale du Béton, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn, 2013.
- [12] fib: 2023 – Fédération Internationale du Béton, *fib Model Code for Concrete Structures 2020*. ISBN: 978-2-88394-175-5, 2023.
- [13] CEN-TC 250-SC 2_N2087_Background document FprEN 1992-1-1 (final version), March 2023.
- [14] Ganz, H.R. – *The 2nd generation of Eurocode 2 – EN1992*. Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LNEC, 2022.
- [15] Ganz, H.R. – *EN1992 Design of concrete structures*. Eurocode conference, Berlin, May 2023.
- [16] EN 13670: 2009 – Execution of concrete structures. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [17] prEN 206-100, Concrete – Part 100: Exposure resistance class concrete – Specification and conformity criteria (under drafting). CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.



2.^a geração do Eurocódigo 3 – Dimensionamento de estruturas em aço

2nd generation of Eurocode 3 – Design of steel structures

Luís Simões da Silva

Resumo

A segunda geração do Eurocódigo 3, que está em desenvolvimento desde 2017, contém 20 partes, em que as primeiras 14 lidam com regras gerais e as restantes abordam aplicações específicas. Este artigo apresenta as alterações introduzidas nas várias partes do Eurocódigo 3 na segunda geração dos Eurocódigos Estruturais bem como descreve as novas partes que foram adicionadas nesta primeira revisão dos Eurocódigos.

Abstract

The second generation of Eurocode 3 is under development since 2017 and contains 20 parts, whereby the first 14 address general rules while the remaining parts deal with specific applications. This paper presents the changes that were introduced in the various parts of the second Generation of Eurocode 3, as well as the new parts that were added in this first revision of the Structural Eurocodes.

Palavras-chave: Estruturas em aço / Eurocódigos Estruturais / Eurocódigo 3 / Dimensionamento

Keywords: Steel structures / Structural Eurocodes / Eurocode 3 / Design

Luís Simões da Silva

Presidente da SC 03 da CT 115
Prof. Catedrático
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
luiss@dec.uc.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

SIMÕES DA SILVA, L. – 2.ª geração do Eurocódigo 3 – Dimensionamento de estruturas em aço. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 49-58.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-006>

1 Introdução

O Eurocódigo 3 (EN 1993) contém 20 partes e é o mais extenso de todos os Eurocódigos Estruturais. A Figura 1 apresenta uma visão geral da estrutura do Eurocódigo 3, o qual se subdivide em “partes gerais” (partes EN 1993-1-1 a EN 1993-1-14), que tratam de tópicos gerais que são independentes do tipo estrutural, e “partes aplicadas” (partes EN 1993-2 a EN 1993-7) que tratam de tópicos relevantes para um tipo estrutural específico, tais como pontes em aço, torres, mastros e chaminés, silos e tanques, estacas, estruturas de suporte de guindastes, e painéis “sandwich”.

A primeira revisão dos Eurocódigos Estruturais foi objeto em 2012 de um Mandato (M/515) [2] pela Comissão Europeia, no contexto do Regulamento dos Produtos da Construção [3], que estabeleceu o âmbito e objetivos dessa revisão. A revisão dos Eurocódigos Estruturais foi organizada em 4 fases. O processo de revisão propriamente dito iniciou-se em 2017, aproximando-se agora da sua conclusão, estando neste momento em processo de votação as fases 3 e 4. O cronograma atualizado da revisão dos Eurocódigos Estruturais está resumido na Figura 2.

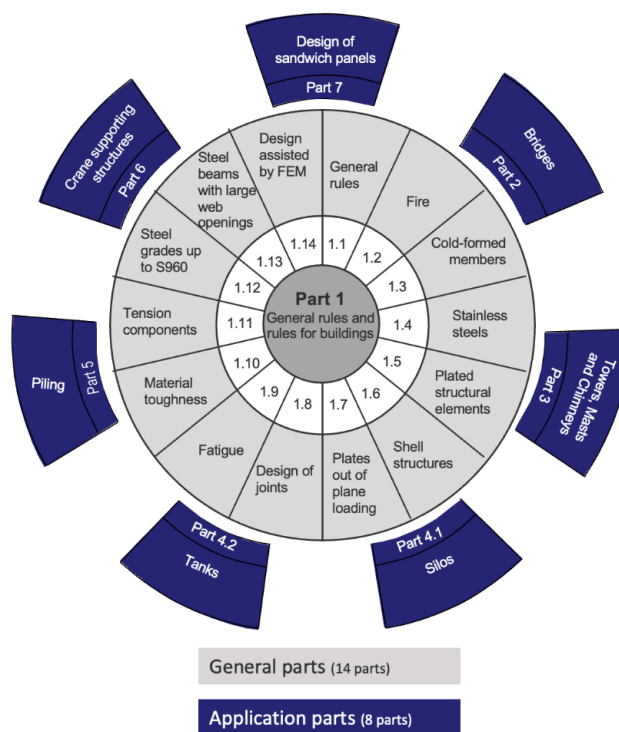


Figura 1 Eurocódigo 3: partes gerais e partes aplicadas (adaptada de [1])

Às partes do Eurocódigo 3 definidas no Mandato M/515 foram acrescentadas algumas partes adicionais durante o desenvolvimento do processo de revisão (EN 1993-1-13, EN 1993-1-14 e EN 1993-7), bem como um conjunto de Especificações Técnicas (TS) e Relatórios Técnicos (TR) que complementam as normas. O trabalho de elaboração das diversas partes do Eurocódigo 3 foi desenvolvido sob a égide do TC250/SC3 (liderado pela Prof. Ulrike Kuhlmann,



Figura 2 Processo de desenvolvimento dos Eurocódigos [4]

recentemente substituída pelo Prof. Markus Knobloch), redigidas pelos *Project Teams* (PT) estabelecidos especificamente para cada parte e validados pelos 22 *Working Groups* (WGs) do Eurocódigo 3. Neste artigo resumem-se as principais alterações introduzidas em cada parte do Eurocódigo 3, descrevem-se resumidamente os conteúdos das novas partes, referem-se as Especificações Técnicas e Relatórios Técnicos, e ainda os passos que ocorrerão até à finalização do processo de revisão com a entrada em vigor das novas versões dos Eurocódigos, incluindo os aspetos de implementação em Portugal.

2 Revisão das partes existentes do Eurocódigo 3

2.1 EN 1993-1-1

A EN 1993-1-1, que define as regras gerais e as regras para edifícios, foi a primeira norma a ser aprovada e publicada em 2022 [5], indicando-se seguidamente as principais alterações em relação à versão anterior de 2005 [6].

- o âmbito da EN 1993-1-1 foi alargado a classes de aço até S700;
- o âmbito foi alargado ao dimensionamento de secções ocas elípticas;
- os métodos de análise estrutural foram clarificados e resumidos num fluxograma;
- foi implementado um novo método para o dimensionamento de secções semicompactas (classe 3);
- os efeitos da torção na resistência das secções e barras foram melhorados e explicitados de forma mais clara;
- foram alteradas as curvas relativas à encurvadura por compressão;
- foi introduzido um novo método para a verificação da encurvadura lateral por torção de vigas, tendo-se eliminado o método especial;
- o método simplificado de encurvadura lateral por torção foi totalmente revisto;
- o dimensionamento de barras uniformes com secções transversais monossimétricas foi explicitamente abrangido;

- foi introduzida uma abordagem simplificada para a consideração da fadiga;
- foi introduzido um anexo informativo que fornece dados estatísticos de materiais e propriedades dimensionais usados para a calibração dos fatores parciais.

Salienta-se a possibilidade de utilizar aços de alta resistência com tensões de cedência de $460 \text{ N/mm}^2 < f_y \leq 700 \text{ N/mm}^2$. Note-se que a maior tensão de cedência vem geralmente acompanhada por uma perda de ductilidade pelo que as regras existentes não são diretamente aplicáveis [7]. Assim, as principais modificações relativas ao novo âmbito da norma foram as seguintes:

- integração da norma de produto EN 10149 [8];
- ampliação das tabelas de materiais para aços de alta resistência;
- adaptação dos requisitos de ductilidade;
- adaptação dos requisitos para dimensionamento plástico;
- adaptação para elementos tracionados;
- extensão e modificação das curvas de encurvadura.

2.2 EN 1993-1-2

Não se referem aqui as alterações a esta parte [9] já que foi elaborado um artigo complementar específico sobre a resistência ao fogo pelo Grupo de Trabalho Horizontal sobre as alterações introduzidas nas Partes 1-2 relativas à verificação da resistência ao fogo.

2.3 EN 1993-1-3

As principais alterações em relação à versão atual da norma, que define as regras suplementares para estruturas de chapa enformada a frio [10], são as seguintes:

- harmonização da redação de acordo com as últimas edições da EN 1993-1-1 [5], da EN 1993-1-5 [11] e da EN 1993-1-8 [12];
- introdução de valores nominais da resistência à tração máxima (Tabela 5.1) ajustados à EN 1993-1-1 ou à norma de produto relevante (Secção 5);
- clarificação para o dimensionamento de chapas sinusoidais (7.6.5);

- clarificação para o dimensionamento de chapas trapezoidais em compressão axial (8.1.3);
- dimensionamento da secção transversal para forças transversais em secções com duas ou mais almas não reforçadas, em função do tipo de suporte (8.1.6.3);
- revista a fórmula de cálculo para a resistência de secções transversais sujeitas a esforço axial e momento fletor, esforço transversal e torção (8.1.10);
- melhor especificação das regras para o dimensionamento à encurvadura de secções sujeitas a compressão e flexão (8.2.5);
- os critérios para a verificação dos estados limites de utilização passaram a ser explicitados quantitativamente através de expressões de fácil utilização (Secção 9);
- dimensionamento de chapas trapezoidais com sobreposições (11.3.4);
- resistência à flexão de “liner trays” (11.2.2);
- foi especificado o “setup” de ensaio e respetivo procedimento para a determinação experimental da resistência à flexão (na ausência de esforço transversal) e respetiva rigidez de flexão efetiva de chapas perfiladas através de um ensaio de vão simples (A.5.2);
- procedimentos de ensaio experimental de chapas e critérios de avaliação dos resultados (A.5.6);
- foram eliminadas as disposições especiais para fixadores em aço inoxidável em relação ao ambiente corrosivo, sendo esta especificação remetida para a norma EN 1993-1-4 [13] (Anexo B).

2.4 EN 1993-1-4

As principais alterações em relação à versão atual da norma [13] que explicita as regras suplementares para aços inoxidáveis, são as seguintes:

- foi introduzido um sistema de classes de resistência e de corrosão (5.1.1 e anexo A);
- foi incluído um método para calcular o aumento de resistência numa secção resultante da enformagem a frio (5.1.2.3);
- foram incluídas regras de dimensionamento atualizadas para determinar a tenacidade (5.1.3);
- foram adicionadas regras de projeto para parafusos de aço inoxidável pré-esforçados (5.2.2 e 10.2);
- foram adicionadas regras para análise estrutural (7.1, 7.2, 7.3, 7.4);
- foram acrescentadas regras relativas à resistência das almas às forças transversais (8.2.6);
- foram incluídas regras atualizadas para encurvadura lateral por torção (8.3.3.1);
- foram incluídas regras atualizadas para elementos sujeitos a compressão e flexão axial combinadas (8.3.4);
- foram incluídas regras atualizadas para a resistência ao esmagamento de uma placa de aço inoxidável em ligações aparafusadas, para a resistência ao corte de um parafuso e para parafusos sujeitos a corte e tração combinados (10.2);

- o método de resistência contínua (CSM) foi incluído para ter em conta o efeito benéfico da plastificação parcial e do endurecimento (Anexo B).

2.5 EN 1993-1-5

As principais alterações em relação à versão atual da norma relativa a elementos estruturais constituídos por placas [11] são as seguintes:

- foi tida em conta a rigidez torsional dos reforços de secção fechada;
- foi revisto o procedimento de interpolação entre o comportamento de coluna e o comportamento de placa;
- o âmbito foi alargado aos painéis não retangulares;
- a presença de reforços longitudinais com baixa rigidez passou a ser desprezada para a verificação de tensões normais;
- foram revistas as regras para resistência ao carregamento de cargas transversais locais;
- foram revistas e ampliadas as fórmulas de interação;
- foram revistas as regras para a verificação dos reforços transversais;
- foram revistas as regras para a verificação da encurvadura induzida pela curvatura dos banzos;
- o método de tensão reduzida foi alargado à carga biaxial;
- as regras para vigas com almas nervuradas foram ampliadas.

2.6 EN 1993-1-6

Ao nível da resistência e estabilidade de cascas, as principais alterações em relação à versão atual da norma [14] são as seguintes:

- o texto de todo o documento foi reformulado significativamente para aumentar a clareza, a facilidade de uso e para incorporar novos conteúdos científicos;
- o âmbito do documento foi restringido às cascas em aço fabricadas: as secções ocas circulares estão agora claramente fora do âmbito e são tratadas na norma EN 1993-1-1. As estacas tubulares fabricadas permanecem no âmbito, embora com disposições para imperfeições e tolerâncias a serem retiradas da EN 1993-5 [15];
- as relações entre as medições de tolerâncias em cascas e as amplitudes de imperfeição assumidas são definidas explicitamente para os três regimes básicos de tensões uniformes: compressão axial uniforme, compressão circunferencial uniforme e torção uniforme. Foi considerada pela primeira vez uma metodologia rigorosa para interpretar campos de tensão relativamente complicados em termos das resistências para estes três regimes básicos de tensão;
- as fórmulas de resistência no Anexo D foram reformuladas significativamente para resolver situações omissas. Para um caso de referência importante de cascas cilíndricas sob compressão axial uniforme (meridional), essas fórmulas foram alteradas para torná-las mais ajustadas à forma de imperfeição mais comum e para corrigir um pequeno erro na Emenda de 2017. Estas também

foram estendidas para cobrir aços inoxidáveis, bem como aços carbono. Foram desenvolvidas e incluídas no Anexo D fórmulas de resistência para compressão circunferencial uniforme e torção uniforme;

- o Anexo D contém agora disposições atualizadas para cascas com paredes com espessura variável constituídas por patamares com espessura descontínua, incluindo os casos de pressão externa uniforme ou carga de vento assimétrica;
- o dimensionamento utilizando o método LBA-MNA (análise linear de estabilidade combinada com análise materialmente não linear) foi esclarecido;
- o método inteiramente novo de dimensionamento usando resistências de referência foi adicionado para a verificação do Estado Limite Último de Encurvadura (LS3) para geometrias de casca e condições de carregamento apropriadas. O Anexo E fornece funções de resistência para cascas cilíndricas sob flexão uniforme e cascas esféricas sob pressão externa uniforme;
- a verificação das tolerâncias geométricas relevantes à encurvadura foi reformulada e tornada menos onerosa. A classe geral de qualidade de tolerância de fabrico passou a ser diretamente dependente do estado de tensão de membrana dominante em situações de encurvadura. Foram introduzidas novas disposições para auxiliar na interpretação de medições de tolerância contínuas, como aquelas obtidas em “laser scanning”;
- quando as verificações de encurvadura LS3 são realizadas usando a análise GMNIA, é fornecida uma descrição mais abrangente das imperfeições do modelo aplicável, que têm em conta as amplitudes nominais assumidas em cálculos manuais;
- as disposições de projeto para o estado limite último de fadiga (LS4) foram totalmente reformuladas e são agora compatíveis com a EN 1993-1-9 [19];
- foram agora introduzidas referências a partes essenciais da EN 1993-1-14 [18] relativa à malha, verificação e validação de modelos de elementos finitos que são utilizados em análises lineares elásticas (LA), análises lineares de estabilidade (LBA), análises materialmente não lineares (MNA), análises geometricamente não lineares incluindo imperfeições (GNIA) e análises geométrica e materialmente não lineares incluindo imperfeições (GMNIA), incluindo pressupostos apropriados para propriedades de materiais.

2.7 EN 1993-1-7

A norma que se dedica especificamente às estruturas constituídas por placas sujeitas a cargas fora do plano, foi significativamente alterada (âmbito e organização) em relação à sua versão atual [16] :

- foram introduzidas secções sobre gestão de fiabilidade e valores de cálculo de dados geométricos;
- foi introduzida uma secção dedicada à modelação de materiais, oferecendo considerações mais detalhadas relacionadas com a modelação de materiais para análises não lineares;
- a análise estrutural é descrita mais detalhadamente, abrangendo vários aspetos, tais como tipos de análise, modelação de

montagem de placas e diferentes métodos de análise para conjuntos de placas e placas individuais;

- é fornecida uma descrição detalhada das verificações dos estados limites últimos para várias configurações de assemblagem das placas.

2.8 EN 1993-1-8

A organização da norma relativa ao projeto de ligações (EN 1993-1-8) foi completamente revista, com quatro Anexos Normativos (A-D) resumindo: (A) as propriedades dos componentes básicos; (B) dimensionamento de juntas viga-coluna e emendas com transmissão de momento; (C) dimensionamento de juntas nominalmente rotuladas; e (D) dimensionamento de bases de colunas.

As principais alterações em relação à versão atual da norma [12] são as seguintes:

- o âmbito foi estendido para aços até S700;
- o âmbito foi estendido ao projeto de juntas nominalmente rotuladas;
- foram introduzidas novas disposições para ligações com parafusos em furos roscados;
- foram introduzidas novas disposições para o dimensionamento de soldaduras de topo em classes de aço superiores a S460;
- foram introduzidas novas disposições para o dimensionamento de bases de colunas;
- foi introduzida uma formulação revista para o valor de cálculo da resistência ao esmagamento de ligações aparafusadas;
- foi feita a revisão dos requisitos para o dimensionamento de grupo de parafusos ao corte;
- foi introduzido um método alternativo para a verificação da resistência de soldaduras de cordão, tendo em conta explicitamente as propriedades do material de adição;
- foram revistos os requisitos para o dimensionamento de ligações com pinos;
- foram revistos os requisitos para avaliação dos coeficientes de resistência e rigidez do componente “painel de alma ao corte”;
- foram revistas as tabelas de dimensionamento de juntas tubulares.

2.9 EN 1993-1-9

As principais alterações em relação à versão atual da norma que estabelece métodos para a avaliação da resistência à fadiga de elementos, ligações e juntas sujeitos a um carregamento de fadiga [19] são as seguintes:

- reorganização da norma para maior clareza e para se adaptar à nova estrutura de todos os Eurocódigos;
- alinhamento de termos com a EN 1990 [17], extensão de definições, introdução de distinção entre conceitos e métodos;
- adaptação dos fatores parciais para as três classes de consequências da EN 1990;

- eliminação de interpretações erradas no cálculo das tensões nominais, em particular nas soldaduras; inclusão de regras para cálculo de tensões nominais em parafusos; inclusão de orientação sobre cálculo de tensões nominais em parafusos pré-esforçados sujeitos a tração; inclusão de fatores de concentração de tensões k_t ;
- eliminação de lacunas no cálculo de tensões em pontos críticos, fortemente ligadas ao desenvolvimento da EN 1993-1-14 [18];
- inclusão de método de cálculo de tensões efetivas de entalhe, também ligado ao desenvolvimento da EN 1993-1-14;
- inclusão de conjuntos de curvas de resistência à fadiga para tensões normais, em função da tensão geométrica (na zona termicamente afectada) e para tensões efetivas em entalhes;
- atualização e extensão ou inclusão de tabelas de categorias de detalhes para todos os métodos de cálculo de tensão;
- inclusão de recomendações para juntas soldadas submetidas ao tratamento por Impacto Mecânico de Alta Frequência (HFMI) para o método de tensão nominal.

2.10 EN 1993-1-10

As principais alterações da parte 1-10, relativa à tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura, em relação à versão atual da norma [21] são as seguintes:

- a aplicação deste documento foi alargada a materiais de aço não normalizados abrangidos pela EN 1993-1-1 [5], 5.1 (1.1);
- foi introduzido um fluxograma para a seleção de um procedimento de dimensionamento para avaliação de rotura frágil (4.1);
- foi incluída a possibilidade de considerar classes de execução no procedimento de projeto para avaliação de rotura frágil (4.1, 4.2.2, 4.2.2.2, 4.2.2.3, 4.3);
- foi incluída a possibilidade de limitar a diferença entre a temperatura mínima do aço e a temperatura do ensaio de impacto (4.2.1);
- foi introduzida uma relação entre o raio da curvatura a frio e o valor máximo da deformação plástica (4.2.2.1);
- os valores tabelados dos valores máximos permitidos da espessura do elemento são estendidos para temperaturas de referência inferiores -80 °C e -120°C (4.2.2.2);
- os valores tabelados dos valores máximos permitidos da espessura do elemento constantes do anterior Quadro 2.1 são transferidos para o novo Quadro 4.2 (4.2.2.2), o qual se aplica às Classes de Execução EXC3 e EXC4;
- foram introduzidos novos valores na tabela 4.3 relacionados com EXC1 e EXC2 (4.2.2.2);
- foram incluídas novas regras de projeto para pormenores não conformes com a EN 1993-1-9 [] e juntas complexas (4.2.2.3);
- relativamente aos requisitos do material para evitar rotura frágil, foram introduzidas regras adicionais relativamente à energia de impacto mínima para temperaturas superiores à zona de transição (correspondendo ao patamar superior da curva tenacidade-temperatura) (4.3);

- os requisitos adicionais relacionados com o material para soldadura em zonas enformadas a frio foram transferidos da EN 1993-1-8 [12] para a subsecção 4.4 deste documento;
- foi introduzido um novo anexo informativo que trata de regras específicas para placas de reforço com recortes (Anexo A);

2.11 EN 1993-1-11

De acordo com [20] as principais alterações em relação à versão atual da norma [22] resumem-se da seguinte forma:

- No desenvolvimento da segunda geração do Eurocódigo 3 – “Projeto de estruturas de aço” a Parte 1-11 – Componentes tensionados, foi revista por completo. Os objetivos desta revisão foram: a) ampliar o âmbito da norma e atualizá-la tendo em atenção os significativos avanços tecnológicos dos elementos tensionados; b) reduzir o número de parâmetros determinados a nível nacional (NDP) através de uma maior harmonização das regras de projeto entre os vários países; e c) simplificar a utilização da norma, melhorando a clareza do texto e das disposições técnicas. Foram introduzidas alterações significativas para alcançar estes objetivos.
- A Parte 1-11 do EC3 classifica os componentes tensionados em três grupos: A - barras, B - cabos e C – tirantes constituídos por cordões paralelos. Para cada um destes grupos foi realizada uma atualização das disposições relativas aos “Materiais”, “Estados limites últimos” e “Estados limites de serviço”. Como resultado, essas secções foram significativamente revistas, incluindo disposições de verificação da segurança para novas soluções de selas de desvio do grupo C. A secção da “fadiga” de componentes tensionados foi completamente revista, incluindo o ajuste de vários parâmetros de verificação da segurança. A secção “Vibrações de elementos tensionados” foi suprimida, dado que incluía apenas recomendações de projeto.
- O Anexo A – “Requisitos dos componentes para componentes tensionados” foi totalmente revisto para refletir as normativas atuais em termos dos materiais e disposições de ensaio.
- O Anexo informativo B foi também atualizado com novos esquemas que refletem o estado da arte em elementos tensionados e terminações.
- No Anexo C foram incluídos requisitos específicos para o novo grupo D – “Componentes tensionados de fios paralelos para estruturas suspensas”.

2.12 EN 1993-5

A parte do Eurocódigo 3 dedicada a estacas e estacas-prancha tem as seguintes alterações em relação à versão atual da norma [15]:

- os métodos de análise estrutural foram harmonizados com a EN 1993-1-1 [5] e resumidos num fluxograma;
- a terminologia para ancoragens e estacas tensionadas, as propriedades dos materiais e a sua durabilidade foram clarificadas;
- o dimensionamento por recurso ao Método dos Elementos Finitos foi incluído como forma de verificação dos requisitos para estacas;

- a classificação das estacas Z foi atualizada;
- foi implementado um novo método para o dimensionamento de secções semicompactas (Classe 3) (Z-, U e estacas tubulares (Anexo E));
- os valores recomendados para os fatores de redução β_B e β_D , levando em consideração a falta de transmissão de força de corte nos travamentos das estacas em U, foram introduzidos como NDP.

3 Novas partes adicionadas ao Eurocódigo 3

3.1 EN 1993-1-12

Originalmente, o plano era retirar a EN 1993-1-12 [23] no final do trabalho do mandato, quando todas as regras tivessem sido transferidas para as restantes partes do Eurocódigo 3. No entanto, em 2017, foi aprovado um novo âmbito e um novo título para a EN 1993-1-12: extensão das regras para classes de aço superiores a S700 e até S960. Este documento encontra-se em elaboração à data de publicação do presente artigo.

3.2 EN 1993-1-13

O âmbito da nova EN 1993-1-13 [24] consiste em fornecer disposições complementares que estendam a aplicação da EN 1993-1-1 [5] e da EN 1993-1-5 [11] ao dimensionamento de perfis de aço laminados e soldados com vários formatos de aberturas de alma. São considerados os seguintes casos:

- vigas laminadas ou soldadas com aberturas de alma simples ou muito espaçadas;
- vigas laminadas ou soldadas com aberturas de alma pouco espaçadas;
- vigas celulares com aberturas circulares obtidas por corte e soldadura de duas partes de perfis de aço que podem ter dimensões diferentes;
- vigas com aberturas hexagonais e sinusoidais obtidas por corte e soldadura de duas partes de aço seções que podem ter dimensões diferentes.

Este documento aplica-se a barras uniformes com perfis I ou H, que são simétricas em relação ao eixo fraco. Não se aplica a vigas não prismáticas ou curvas, embora os mesmos princípios possam ser aplicados. Aplica-se também a vigas de aço com aberturas de alma que estão sujeitas a momentos fletores positivos ou negativos. Finalmente, abrange a verificação da resistência nas aberturas e os seus efeitos no comportamento global da viga, incluindo a encurvadura lateral por torção.

3.3 EN 1993-1-14

A nova EN 1993-1-14 [18] estabelece requisitos para a utilização de métodos numéricos no dimensionamento de estruturas de aço, mais especificamente para verificações do estado limite último (incluindo fadiga) e do estado limite de utilização. Também fornece requisitos para a aplicação de elementos finitos avançados

e técnicas de modelação similares, que também podem ser usadas no dimensionamento direto de estruturas e componentes em aço.

Em particular, a EN 1993-1-14 fornece regras sobre:

- a modelação do componente estrutural e das condições fronteira;
- o uso de imperfeições (imperfeições geométricas e tensões residuais);
- a modelação das propriedades dos materiais;
- a modelação de cargas;
- tipos de análise;
- validação e verificação de modelos FE;
- modelação de critérios de estado limite;
- harmonização dos critérios de estado limite e nível de modelação aplicada e tipos de análise;
- os fatores parciais a serem aplicados;
- a escolha do *software* e da documentação.

Relativamente ao estabelecimento da resistência de projeto a utilizar aquando do dimensionamento direto por elementos finitos, a norma remete para as várias partes do Eurocódigo 3, de forma a poder incorporar os aspetos específicos de cada tipo de problema.

As informações complementares sobre as regras da EN 1993-1-14 podem ser encontradas no Relatório Técnico – CEN/TR 1993-1-141 [25], que inclui uma série de exemplos de validação e de projeto. Os exemplos de validação fornecem base e apoio ao processo de validação do modelo numérico, enquanto os exemplos de projeto apoiam a correta aplicação das disposições de projeto da EN 1993-1-14.

3.4 EN 1993-7

Esta nova parte do Eurocódigo 3 [26] é aplicável ao dimensionamento de sistemas estruturais ou autoportantes constituídos por painéis sanduíche com faces em aço e núcleo em lã mineral, PUR/PIR¹ ou EPS/XPS² com Declaração de Desempenho (de acordo com as normas EN 14509-1 e -2) [27-28] utilizados como paredes internas e externas, telhados e tetos.

4 O que falta ainda?

4.1 Especificações Técnicas e Relatórios Técnicos

Existe um conjunto de Especificações Técnicas (TR) e Relatórios Técnicos (TR) em elaboração relacionados com o Eurocódigo 3:

- CEN/TS 1993-1-101:2022 Eurocode 3 – *Design of steel structures – Part 1-101 Alternative method for members in bending and compression* [29];
- CEN/TR 1993-1-103:2022 Eurocode 3 – *Design of Steel Structures – Part 1-103: Elastic Critical Buckling of Members* [30];
- CEN/TR 1993-1-141:2022 Eurocode 3 – *Design of steel structures*

¹ PUR/PIR - rigid polyurethane.

² EPS/XPS - expanded polystyrene/extruded polystyrene foam.

- Part 1-141: Background and Explanations on EN 1993-1-14 *Design assisted by finite element analysis* [25];
- CEN/TS 1993-1-901:2022 Eurocode 3 – *Design of steel structures – Fatigue design of orthotropic bridge decks with the hot spot stress method* [31];

Embora não tenham o estatuto de norma, estes documentos complementam as normas com que estão relacionados, fornecendo informações adicionais para a elaboração de projetos de estruturas em aço.

4.2 Traduções e Anexos Nacionais

Para a aplicação plena dos Eurocódigos Estruturais em Portugal, é necessário proceder à elaboração dos respetivos Anexos Nacionais, bem como à eventual tradução de algumas partes. A SC3 da CT 115 está neste momento já a ultimar o Anexo Nacional da EN 1993-1-1, a que se seguirão os Anexos Nacionais das restantes partes relevantes.

5 Conclusões

Neste artigo são apresentadas as alterações introduzidas nas várias partes do Eurocódigo 3 no contexto da primeira revisão dos Eurocódigos Estruturais. Estas alterações tornam a utilização do Eurocódigo 3 mais simples, com maior abrangência e mais eficiente, incorporando alguns dos desenvolvimentos baseados em investigação recente que abre novas oportunidades para a aplicação e desenvolvimento em projeto de estruturas de aço.

Relativamente à emergência climática que atualmente afeta a Humanidade, as estruturas em aço apresentam grandes vantagens relativamente aos objetivos de redução das emissões de gases com efeito de estufa (acordo de Paris) devido a:

- facilidade de reutilização de componentes e estruturas em aço;
- fácil reciclagem do aço, processo esse que pode ser repetido um número infinito de vezes;
- implementação em curso de novos processos de produção de aço (produção de aço carbonicamente neutro devido à utilização de redução direta com hidrogénio verde), que está atualmente em curso na Europa, prevendo-se atingir, até 2030, 25% da produção europeia de aço com zero emissões de CO₂eq.

Em Portugal, a construção em aço representou, em 2022, 2,6% do PIB Português e 3,34% das exportações nacionais [32], sendo um contribuinte de relevo para a economia portuguesa, pelo que as novas versões do Eurocódigo 3 são um necessário contributo para a continuidade deste trajeto da indústria portuguesa.

Agradecimentos

Este artigo utilizou material constante dos artigos apresentados pela Prof. Ulrike Kuhlmann e pelo Prof. Bert Snijder quando do XI Congresso de Construção Metálica e Mista que teve lugar em Coimbra em novembro de 2017, bem como o artigo apresentado pelo Prof. José Oliveira Pedro no XIV Congresso de Construção Metálica e Mista que teve lugar em Coimbra em novembro de 2023, pelo que se agradece esta ajuda preciosa.

Referências

- [1] Kuhlmann, U.; Schmidt-Rasche, C. – “Next generation of Eurocode 3 – evolution by improvement and harmonization”, *XI Congresso de Construção Metálica e Mista*, 2017, cmm Press, Coimbra, Portugal.
- [2] M/515 EN – *Mandate for amending existing eurocodes and extending the scope of structural eurocodes*, European Commission, 12 December 2012.
- [3] OJ L 088 (2013) – Regulamento dos Produtos de Construção – Regulamento no 305/2011 do parlamento Europeu e do Conselho de 09 Março de 2011, Jornal oficial da União Europeia, Bruxelas, 04/04/2011, L 88/5 – L 88/43.
- [4] CEN/TC 250 N 3659, Letter – *Timeline for the evolution of the EN Eurocodes*, November 2023.
- [5] EN 1993-1-1: 2022 – Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [6] EN 1993-1-1: 2005 – Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [7] Snijder, H.H. – “Recent developments regarding the next version of Eurocode 3 part 1-1 on steel structures”, *XI Congresso de Construção Metálica e Mista*, 2017, cmm Press, Coimbra, Portugal.
- [8] EN 10149: 2013 – Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [9] EN 1993-1-2: 2005 – Design of steel structures – Part 1-2: General rules: structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [10] EN 1993-1-3: 2006 – Design of steel structures – Part 1-3: General rules: supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [11] EN 1993-1-5: 2006 – Design of steel structures – Part 1.5: Plated structural elements. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [12] EN 1993-1-8: 2005 – Design of steel structures – Part 1.8: Design of joints. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [13] EN 1993-1-4: 2006 – Design of steel structures – Part 1-4: General rules: supplementary rules for stainless steels. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [14] EN 1993-1-6: 2006, Design of steel structures – Part 1.6: General rules – Strength and stability of shell structures. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [15] EN 1993-5: 2007 – Design of steel structures - Part 5: Piling. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [16] EN 1993-1-7: 2007 – Design of steel structures - Part 1-7: Plated structures subject to out-of-plane loading. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [17] EN 1990: 2024 – Eurocode 0: Basis of structural and geotechnical design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [18] prEN 1993-1-14: 2024 – Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [19] EN 1993-1-9: 2005 – Design of steel structures – Part 1.9: Fatigue. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [20] EN 1993-1-10: 2005, Design of steel structures – Part 1.10: Material toughness and through-thickness properties. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.

- [21] Oliveira Pedro, J. – “A norma prEN 1993-1-11:2023 para o dimensionamento de componentes tensionados de aço”, *XIV Congresso de Construção Metálica e Mista*, 2023, cmm Press, Coimbra, Portugal.
- [22] EN 1993-1-11: 2006 – Design of steel structures – Part 1-11: Design of structures with tension components. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [23] EN 1993-1-12: 2007 – Design of steel structures – Part 1-12: Additional rules for the extension of EN 1993 Up to steel grade S700. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [24] EN 1993-1-13: 2023, Design of steel structures - Part 1-13: Beams with large web openings. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [25] CEN/TR 1993-1-141:2022 – Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-141: Background and Explanations on EN 1993-1-14 Design assisted by finite element analysis.
- [26] prEN 1993-7: 2024 – Design of steel structures – Part 7: Design of sandwich panels. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [27] prEN 14509-1: 2024 – Factory-made double skin metal faced insulating sandwich panels – Part 1: Self-supporting applications. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [28] prEN 14509-2: 2024, Factory-made double skin metal faced insulating sandwich panels - Part 2: Structural applications - Fixings and potential uses of stabilization of individual structural elements. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [29] CEN/TS 1993-1-101:2022 – Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-101 Alternative method for members in bending and compression;
- [30] CEN/TR 1993-1-103:2022 Eurocode 3 – Design of Steel Structures – Part 1-103: Elastic Critical Buckling of Members;
- [31] CEN/TS 1993-1-901:2022 – Eurocode 3 – Design of steel structures – Fatigue design of orthotropic bridge decks with the hot spot stress method;
- [32] Simões, R.; Murtinho, V. – CMM 25 anos 25 obras internacionais. cmm Press, Coimbra, 2023.



2.^a geração dos Eurocódigos Estruturais – Projeto de estruturas mistas aço-betão

2nd generation of Structural Eurocodes – Design of composite steel-concrete structures

José Miguel Castro
Isabel Valente

Resumo

As estruturas mistas aço-betão oferecem vantagens significativas em termos de resistência e durabilidade, e conduzem a soluções atrativas do ponto de vista económico. Neste artigo apresenta-se uma perspetiva global sobre o projeto de estruturas mistas no contexto da nova geração dos Eurocódigos estruturais. Após a apresentação da nova estrutura do Eurocódigo 4, são identificadas as principais alterações e evoluções da norma europeia no que se refere ao projeto de edifícios e de pontes. O artigo concluiu com uma breve referência ao projeto sísmico de estruturas mistas, destacando algumas das evoluções relevantes das regras de dimensionamento previstas na nova versão do Eurocódigo 8.


Abstract

Steel-concrete composite structures offer significant advantages in terms of strength, durability, and cost-effectiveness. Composite steel-concrete structures offer significant advantages in terms of strength, durability, and cost-effectiveness. This paper provides an overview of the design of composite structures within the framework of the new generation of the structural Eurocodes. Following a description of the revised structure of Eurocode 4, the main changes and developments in the European standards regarding the design of buildings and bridges are identified. The paper concludes with a brief discussion on the seismic design of composite structures, highlighting significant advancements in the design rules introduced in the latest version of Eurocode 8.


Keywords: Eurocódigo 4 / Estruturas mistas aço-betão / Dimensionamento sísmico

Palavras-chave: Eurocode 4 / Composite steel-concrete structures / Seismic design

José Miguel Castro

Presidente da SC 04 da CT 115
Professor Associado
CONSTRUCT
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
 0000-0001-9732-9969
miguel.castro@fe.up.pt

Isabel Valente

Secretária da SC 04 da CT 115
Professora Auxiliar
ISISE, ARISE
Escola de Engenharia da Universidade do Minho
 0000-0003-0502-9956
isabelv@civil.uminho.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CASTRO, J. [et al.] – 2.^a geração dos Eurocódigos Estruturais – Projeto de estruturas mistas aço-betão. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 59-70.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-007>

1 Introdução

Na Europa, o projeto de edifícios e pontes mistas aço-betão realiza-se com base na norma EN 1994, também designada por Eurocódigo 4. A primeira versão desta norma foi publicada nos anos de 2004 [1] e de 2005 [2,3], anos que coincidiram com a fase de conclusão do desenvolvimento da primeira geração dos Eurocódigos estruturais. Em 2012, a Comissão Europeia decidiu avançar para o desenvolvimento da segunda geração dos Eurocódigos, através da publicação do mandato M/515 EN [4]. Em 2013, o Comité Técnico TC250 do Comité Europeu de Normalização (CEN), foi encarregue de desenvolver esta nova geração de normas.

O desenvolvimento da segunda geração dos Eurocódigos tem por base 3 grandes objetivos, nomeadamente: i) refletir a evolução do estado da arte e os avanços científicos das últimas duas décadas; ii) simplificar a utilização por parte da comunidade técnica assim como atender às necessidades do mercado da construção e iii) atingir um maior nível de harmonização, reduzindo os parâmetros determinados a nível nacional (NDP).

No contexto específico do projeto de estruturas mistas aço-betão, foram vários os objetivos definidos para o desenvolvimento da nova versão do Eurocódigo 4. De entre estes, merecem destaque os seguintes: i) procurar uma maior harmonização com os Eurocódigos 2 e 3; ii) expandir o âmbito de aplicação para novos tipos de conectores e aumento das classes de materiais; iii) atualizar as regras de dimensionamento da conexão aço-betão; iv) definir regras para o dimensionamento de vigas com aberturas na alma e pisos de baixa altura, incluindo pisos materializados com painéis pré-fabricados; v) definir novas regras de dimensionamento ao fogo para pilares mistos tubulares preenchidos com betão.

Neste artigo, são descritas as principais novidades associadas à nova versão do Eurocódigo 4, com especial ênfase na Parte 1-1, dedicada ao projeto de edifícios mistos e na Parte 2, referente ao projeto de pontes mistas. As evoluções mais relevantes relativas à Parte 1-2 são abordadas noutro artigo deste número temático [5]. O artigo termina com uma referência a algumas evoluções relevantes na nova versão dos Eurocódigos no que diz respeito ao projeto sísmico de estruturas mistas.

2 Organização do Eurocódigo 4

Em linha com a versão atual da norma, a nova versão do Eurocódigo 4 será constituída por 3 partes. Para além disso, a norma será complementada por três especificações técnicas (Figura 1). A Parte 1-1 contempla regras gerais de projeto de estruturas mistas aço-betão e regras específicas para edifícios [6]. A Parte 1-2 estabelece regras de projeto em situação de incêndio [7]. Por último, a Parte 2 refere-se ao projeto de pontes mistas [8]. As especificações técnicas distinguem-se das 3 partes do Eurocódigo 4 por conterem informação que se considera não ter ainda um nível de maturidade para poder constituir uma parte da norma. No entanto, é expectável que a informação nelas contida poderá, no futuro, vir a ser parte integrante da norma. As três especificações técnicas definem regras para apoio ao projeto de i) estruturas mistas com elementos de camada simples e camada dupla, ii) sistemas de conexão alternativos e iii) colunas mistas de elevado desempenho.

EN 1994: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures

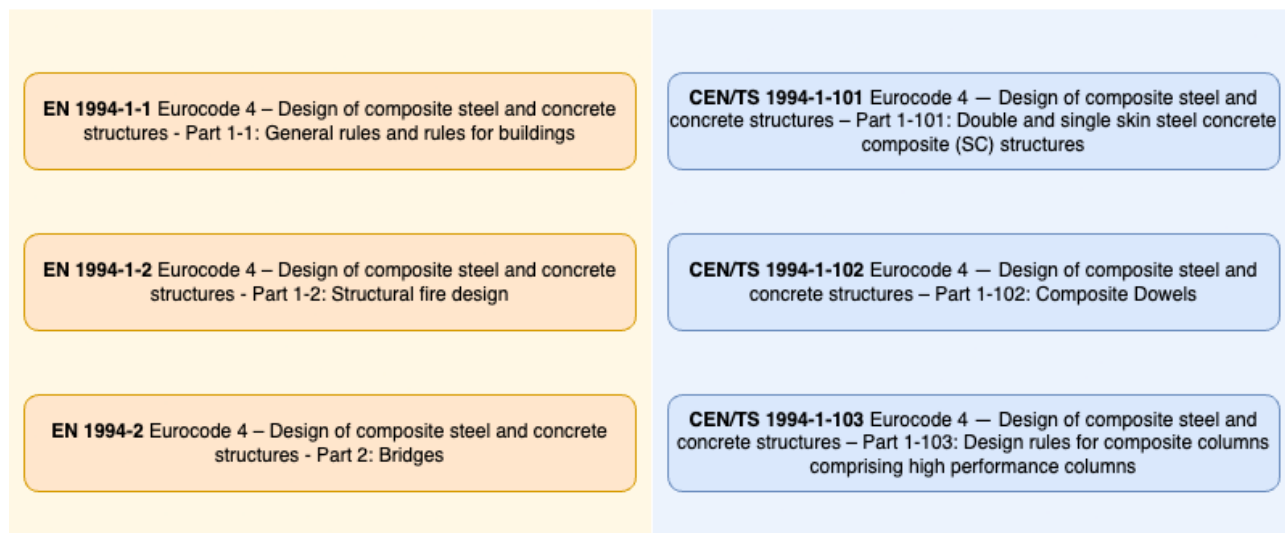


Figura 1 Partes e especificações técnicas da nova versão do Eurocódigo 4

No que diz respeito à Parte 1-1, importa destacar o aumento significativo do número de anexos. A versão atual contém três anexos informativos, um referente ao projeto de ligações mistas outro relativo a ensaios e o terceiro relativo ao fenómeno de retração em estruturas de edifícios. A nova versão é constituída pelos 10 anexos listados na Tabela 1.

Tabela 1 Lista de anexos da nova versão da EN 1994-1-1 [6]

Anexo	Descrição	Caráter
A	Rigidez de componentes de ligações em edifícios	Informativo
B	Ensaio normativos	Normativo
C	Retração do betão em estruturas mistas de edifícios	Informativo
D	Vigas mistas com aberturas na alma	Normativo
E	Vigas mistas com aberturas na alma e lajes rígidas	Informativo
F	Pernos de cabeça que provocam forças de tração na direção da espessura da laje	Normativo
G	Resistência de conectores de perno utilizados em combinação com chapas de aço perfiladas de calha aberta em edifícios com nervuras transversais às vigas de suporte	Informativo
H	Resistência à tração de conectores de perno	Normativo
I	Regras adicionais para vigas de altura reduzida	Normativo
J	Pavimentos de edifícios com lajes pré-fabricadas de betão	Informativo

É importante salientar o facto do Anexo B, relativo a ensaios, passar a ter caráter normativo.

Uma diferença importante entre a versão atual e a nova versão do Eurocódigo 4 diz respeito ao projeto de pontes. Ao contrário da versão atual, na nova versão da Parte 2 não são definidas regras gerais de projeto. Esta alteração reflete a preocupação que existiu na harmonização dos documentos. Desta forma, as regras gerais a adotar no projeto de pontes encontram-se definidas na Parte 1-1.

Por último, importa destacar que o número de parâmetros determinados a nível nacional (NDP) manteve-se ou foi reduzido nas várias partes que constituem a nova versão do Eurocódigo 4. Na Parte 1-1, o número de parâmetros NDP (19) mantém-se idêntico em relação à versão atual da norma tendo, no entanto, ocorrido alterações dos parâmetros. Em relação à Parte 1-2, verifica-se uma redução dos parâmetros NDP de 8 para 3. De modo similar, verifica-se uma redução dos parâmetros NDP de 12 para 8 na Parte 2 do Eurocódigo 4.

3 Evolução e principais alterações na EN 1994-1-1

A Parte 1-1 da nova versão do Eurocódigo 4 apresenta alterações a vários níveis, sendo de destacar i) o alargamento das classes de resistência do aço e do betão, ii) a introdução de regras para elementos mistos e soluções estruturais que têm vindo a ter uma adoção crescente ao longo do tempo e iii) a definição de novas regras de dimensionamento para a conexão aço-betão. Nas secções seguintes apresenta-se um resumo das principais novidades associadas à Parte 1-1.

3.1 Materiais

Ao longo das últimas duas décadas, tem-se vindo a observar a utilização crescente de aços e betões com resistência cada vez maior. Este avanço nos materiais de construção tem permitido, por um lado a criação de estruturas mais eficientes do ponto de vista económico e, por outro lado, responder ao arrojo permanente por parte de engenheiros e arquitetos de estruturas em projetar estruturas cada vez mais esbeltas e complexas. A nova versão do Eurocódigo 4 reflete esses avanços, possibilitando a utilização de betões e aços de maior resistência.

Especificamente, de acordo com a nova norma, podem ser utilizados betões das classes C20/25 e LC20/22 até C70/85 e LC60/66. Esta gama de classes de betão não é tão vasta quanto aquela que podemos encontrar nas novas versões do Eurocódigo 2 (betões entre as classes C12/15 e C100/15). Esta realidade reflete o menor conhecimento sobre o comportamento de estruturas mistas em comparação com estruturas de aço e de betão armado.

Em termos do material aço, a nova versão da norma permite a utilização dos aços previstos nas novas versões dos Eurocódigos 2 e 3, isto é, varões de aço das classes B400 até B700 e aços estruturais das classes S235 até S700, quando o método de dimensionamento seccional for baseado numa análise elástica e/ou no controlo de extensões. No entanto, nos casos em que seja adotada análise plástica, o aço estrutural deverá ser limitado à classe S460 e os varões de armadura deverão ser limitados à classe B500.

3.2 Dimensionamento de vigas mistas

3.2.1 Cálculo do momento plástico resistente

No cálculo do momento fletor resistente, $M_{pl,Rd}$ mantêm-se os pressupostos já considerados na versão vigente da Parte 1-1 do Eurocódigo 4. Considera-se que a área efetiva de betão à compressão deve resistir a uma tensão f_{cd} constante em toda a profundidade entre o eixo neutro plástico e a fibra mais comprimida do betão, em que f_{cd} é o valor de cálculo da resistência à compressão do betão calculado de acordo com a Secção 5 da nova versão da Parte 1-1 do Eurocódigo 2 [9]. Considera-se que z_{pl} é a distância entre o eixo neutro plástico, determinado assumindo a interação total entre o aço e o betão, e a fibra extrema do banzo comprimido de betão, e h é a profundidade total do elemento misto.

A resistência à flexão, $M_{pl,Rd}$ deve ser calculada de modo a evitar a rotura do betão antes de se atingir o momento plástico resistente, quando o rácio z_{pl}/h excede o valor de 0,2 para uma classe de aço não superior a S355, ou 0,15 para as classes de aço S420 e S460.

Para tal, devem ser cumpridas as seguintes condições:

- a classe de betão está compreendida entre C20/25 e C50/60;
- a altura total da chapa perfilada, h_{pg} é inferior a 135 mm;
- $(h_c + h_{pg})/h_a$ está compreendido entre 0,15 e 0,7;
- a relação entre as áreas dos banzos superior e inferior, A_{ft}/A_{fb} , é inferior a 1,0;
- a relação entre as áreas dos banzos inferior e superior, A_{fb}/A_{ft} , é inferior a 3,0;

e o valor do momento plástico resistente deve ser tomado como $\beta M_{pl,Rd}$ em que β é um fator de redução traduzido pela Figura 2.

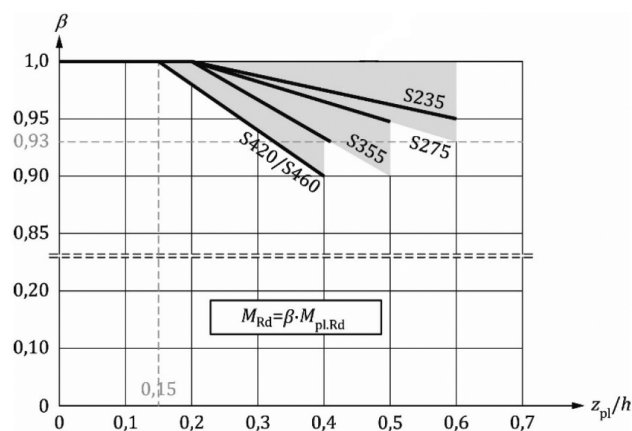


Figura 2 Fator de redução β no cálculo de $M_{pl,Rd}$ [6]

De uma forma geral, o valor de β pode ser considerado igual a 1,0 quando,

- a resistência à compressão do banzo de betão completo for, pelo menos, 2 vezes a resistência plástica total, $N_{pl,a}$, da secção de aço; ou
- todas as condições seguintes forem satisfeitas:
 - a secção metálica é do tipo IPE, HEAA, HEA, HEB, UB ou uma secção soldada com geometria equivalente
 - a classe de aço não é superior a S355;
 - a profundidade da secção de aço, h_a , não é inferior a 2,5 vezes a altura do banzo de betão ($h_c + h_{pg}$);
 - a largura efetiva dos banzos de betão não é inferior a 1,5 m;
 - o eixo neutro plástico, assumindo uma interação total, não se situa abaixo do banzo superior do perfil de aço;
 - o banzo de betão é maciço ou com chapa perfilada e uma profundidade de betão h_c de, pelo menos, 70 mm.

Se todas as condições anteriormente indicadas forem satisfeitas, exceto a largura efetiva do banzo de betão ser inferior a 1,0 m (mas não inferior a 0,5 m), o momento resistente deve ser afetado de um fator de redução de 0,9.

3.2.2 Vigas com aberturas na alma

As regras apresentadas na norma EN 1993-1-13 [10] para vigas de aço com aberturas na alma devem ser seguidas no dimensionamento de vigas mistas em aço e betão com aberturas na alma.

O Anexo D da Parte 1-1 do Eurocódigo 4 é aplicável a vigas mistas com aberturas na alma em que a rigidez à flexão da laje de betão pode ser desconsiderada. No Anexo E do mesmo documento estabelecem-se regras suplementares para vigas nas quais a rigidez à flexão da laje e betão é significativa, através da consideração de modos de rotura adicionais.

O Anexo D estabelece limites para as dimensões das aberturas e respetivo espaçamento e apenas considera aberturas situadas na

região de momento fletor positivo. As regiões de momento fletor negativo em vigas contínuas, consolas ou pilares não são abrangidas. As regras propostas no Anexo D são aplicáveis a vigas mistas com conectores da classe de ductilidade D2 ou D3.

Na Figura 3, representam-se os modos de rotura considerados. O Modo 1 corresponde à secção metálica em T localizada abaixo da abertura que está tracionada, o Modo 2 corresponde à secção metálica em T localizada acima da abertura que está comprimida, o Modo 3 diz respeito à camada de betão comprimida na zona superior da laje mista, o Modo 4 considera o esforço de corte na secção metálica na zona onde fica a abertura, o Modo 5 corresponde à Flexão de Vierendeel nos limites da abertura e o Modo 6 traduz a instabilidade da alma do perfil metálico nos limites da abertura. Os Modos 7, 8 e 9 resultam da flexão, corte e instabilidade da alma nas zonas entre aberturas, respetivamente.

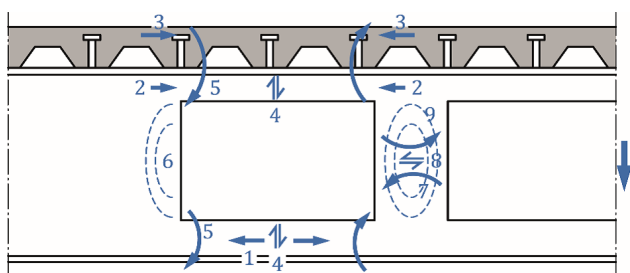


Figura 3 Modos de rotura de vigas mistas nas zonas com aberturas [6]

3.2.3 Vigas de baixa altura (*slim floor*)

Uma viga mista de baixa altura é constituída por uma laje de betão e uma secção de aço que fica total ou parcialmente inserida na espessura da laje. A laje é apoiada no banzo inferior da viga metálica e ambas as secções funcionam em conjunto. A laje pode corresponder a uma solução *in situ* de betão armado, pré-fabricada ou mista com chapa colaborante. A secção de aço pode ser laminada a quente ou soldada, com secção transversal aberta ou fechada.

A nova versão da Parte 1-1 do Eurocódigo 4 inclui o Anexo normativo I que estabelece regras para o dimensionamento deste tipo de vigas. As disposições do Anexo I são aplicáveis a vigas cuja secção transversal é da classe 1, classe 2 ou classe 2 efetiva, sendo dadas orientações para a determinação da classe da secção transversal. A sua aplicação é limitada a secções transversais organizadas em 3 grupos: Tipo I, Tipo II e Tipo III, definidos em função da importância

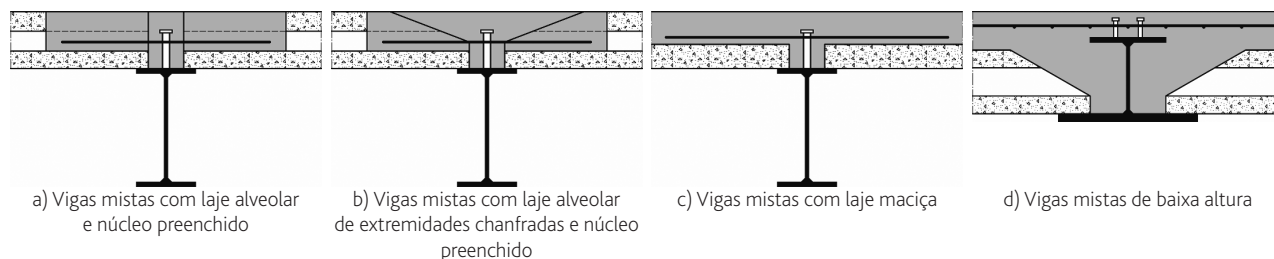


Figura 4 Secções transversais tipo em vigas mistas com lajes pré-fabricadas [6]

da rigidez à flexão do banzo de betão em relação à rigidez total da secção mista.

O Anexo I considera apenas a fase definitiva (funcionamento misto) e assume que os carregamentos são estáticos. São considerados Estados Limite Últimos associados a esforços de flexão, corte, torção localizada em elementos de extremidade e corte longitudinal. É também possível considerar situações de conexão parcial no dimensionamento à flexão e corte longitudinal, sendo o grau de conexão η (rácio entre o n.º de conectores efetivamente colocado no comprimento L_e e o n.º de conectores necessário para garantir uma conexão total nesse mesmo comprimento) definido pela condição (1).

$$\text{Se } L \leq 18 \text{ m, } \eta \geq 1 - (355/f_y) \cdot (0,30 - 0,015L_e), \eta \geq 0,5$$

$$\text{Se } L > 18 \text{ m, } \eta = 1 \quad (1)$$

A conexão entre as secções de aço e betão é garantida com a utilização de pernos de cabeça soldados ao banzo superior da viga metálica ou à alma, e também com recurso a armadura disposta transversalmente à viga. Esta armadura deve ser de classe B ou C e ter um diâmetro maior ou igual a 12 mm e menor do que 20 mm. Estes conectores devem ser incluídos na classe de ductilidade D1 quando não há resultados experimentais disponíveis.

3.2.4 Vigas com pavimentos pré-fabricados

Em edifícios altos é usual a utilização de vigas e pilares metálicos e pavimentos de betão pré-fabricado. Esta combinação é particularmente adequada em hotéis, edifícios residenciais e parques de estacionamento, pois permite maximizar a utilização de elementos produzidos em fábrica e reduzir a mão de obra *in situ*.

A Figura 4 ilustra secções transversais tipo de vigas mistas com lajes pré-fabricadas.

É possível considerar o funcionamento misto entre as lajes pré-fabricadas e as vigas metálicas e o Anexo J da Parte 1-1 do Eurocódigo 4 contempla regras para o dimensionamento desta solução mista. As disposições restringem-se a vigas de aço com secção transversal bissimétrica ou monossimétrica, que podem ser laminadas a quente, enformadas a frio ou reconstituídas soldadas e contemplam vigas mistas simplesmente apoiadas, com betão de peso normal de classe C20/25 a C60/75, aplicadas em edifícios. O Anexo J define ainda condições específicas para o cálculo da largura efetiva da laje de betão associada à viga mista.

A verificação de segurança considera os seguintes Estados Limite Últimos: flexão, encurvadura lateral, corte longitudinal e efeito

de forças transversais na alma aplicadas através de um banzo. Contempla ainda regras específicas para o cálculo da capacidade resistente de pernos de cabeça no contexto desta aplicação e várias disposições construtivas.

3.3 Conexão aço-betão

Numa viga mista, o perfil de aço é associado à laje de betão por meio de conectores metálicos. Estes elementos permitem garantir o funcionamento conjunto do perfil metálico e da laje de betão, proporcionando a transferência de esforços entre eles. A ligação natural entre os dois materiais é ignorada. Os conectores metálicos devem resistir ao esforço de corte longitudinal que se mobiliza entre as duas secções e também a esforços transversais ao plano da laje que tendem a causar a separação entre a laje e o perfil metálico. É ainda necessário colocar armadura transversal na laje de betão, de forma a garantir uma boa transmissão dos esforços de corte.

3.3.1 Regras atualizadas relativas à conexão em casos que envolvem chapa perfilada (nervuras perpendiculares à viga)

O cálculo da capacidade resistente de pernos de cabeça aplicados em vigas que utilizam chapa perfilada é baseado no cálculo realizado para pernos embebidos em lajes maciças, ao qual se aplica um coeficiente de redução k_f , se a chapa perfilada estiver orientada paralelamente à viga metálica e k_t se a mesma estiver orientada perpendicularmente à viga metálica. As geometrias da chapa perfilada mais utilizadas têm sofrido uma evolução ao longo do tempo e apresentam características diferentes daquelas que eram utilizadas há trinta ou quarenta anos. Na nova versão, optou-se por manter as equações existentes na versão atual do Eurocódigo 4, mas foi necessário rever a sua aplicabilidade.

O coeficiente k_t é definido de forma idêntica ao que acontece na versão atual do Eurocódigo 4, mas a sua aplicabilidade é restringida aos casos seguintes, para além dos que já eram considerados na versão vigente (Figura 5):

- a espessura nominal das chapas perfiladas é igual ou superior a 0,70 mm;
- a altura da chapa perfilada, h_p , é igual ou superior a 105 mm;
- em chapas de nervura aberta, os pernos são colocados com uma profundidade de embebedimento $h_A \geq 2,7d$, onde $h_A = (h_{sc} - h_p)$, sendo h_{sc} a altura total do perno (mas não superior a 75 mm) e h_p a altura total da chapa perfilada, não incluindo o reforço reentrante posicionado no banzo superior de nervuras abertas;
- em chapas de nervura aberta, a distância entre o bordo da nervura de betão e a linha central do perno mais próximo $e_k > 60$ mm;
- em chapas com nervura reentrante, os pernos são colocados com uma profundidade de embebedimento $h_A \geq 2d$;
- para chapas trapezoidais de nervura aberta e com um reforço reentrante localizado no banzo superior, $d_{ef} \leq 15$ mm e $b_{fp} \geq 25$ mm (ver Figura 5.b);
- existe armadura posicionada abaixo da cabeça do perno;

- o número de pernos numa mesma nervura não é superior a 2.

Quando as condições acima definidas não são cumpridas, é possível realizar o cálculo com base no que está disposto no Anexo G. Em alternativa, os valores podem ser determinados por ensaios, em conformidade com o Anexo B.

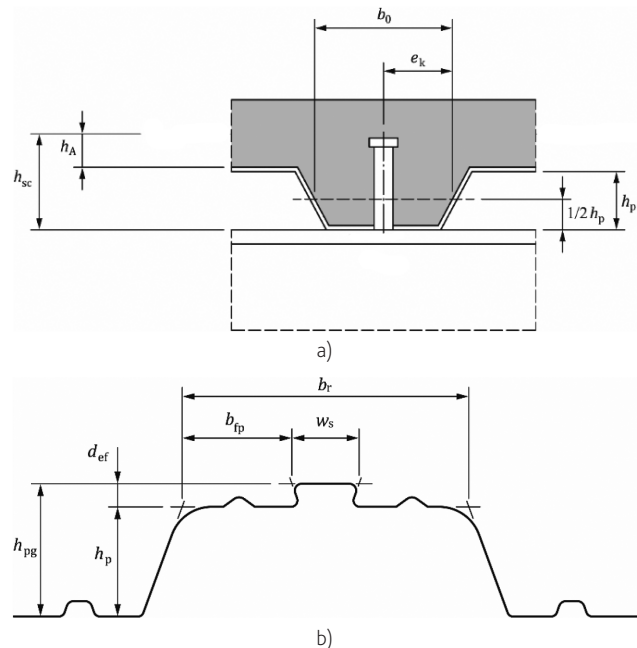


Figura 5 a) Perno soldado, centrado numa nervura orientada transversalmente à viga metálica; b) Secção transversal de uma chapa perfilada com reforço reentrante posicionado no banzo superior [6]

3.3.2 Ductilidade dos conectores

Para caracterizar o comportamento da conexão aço-betão recorre-se ao ensaio de tipo “push out”, realizado de acordo com o Anexo B da Parte 1-1 do Eurocódigo 4, pois este permite observar e avaliar o comportamento da conexão e dos mecanismos de rotura associados.

A nova versão da norma estabelece uma nova classificação da ductilidade de conectores metálicos. Esta classificação é realizada com base em resultados experimentais de ensaios do tipo push-out e tem implicações na forma como o elemento estrutural pode ser dimensionado.

A capacidade resistente da viga mista depende do nível de conexão que é garantido pelos conectores metálicos. As vigas podem ser dimensionadas para a situação de conexão total, onde a totalidade dos esforços de corte é transmitida pelos elementos de conexão e o modo de rotura da viga é condicionado pela sua resistência à flexão ou ao corte vertical, ou para a situação de conexão parcial, onde o modo de rotura é condicionado pela conexão. Neste último caso, a resistência à flexão do elemento estrutural é inferior àquela que teria se o dimensionamento fosse realizado para uma hipótese de conexão total.

Tabela 2 Categorias de ductilidade propostas na nova versão da EN 1994-1-1 [6]

Categoria	Valor característico do escorregamento elástico δ_{ek}	Valor característico do escorregamento último δ_{uk}	Definição
D1		$\delta_u > \delta_{ek}$	Conector frágil, ou Conector flexível com evolução linear na curva que relaciona carga e escorregamento, ou Conector flexível com evolução bilinear ou trilinear na curva que relaciona carga e escorregamento
D2	$\delta_{ek} < 2,5 \text{ mm}$	$\delta_{uk} \geq 6,0 \text{ mm}$ $\delta_{uk} < 10 \text{ mm}$	Conector dúctil com capacidade de deformação suficiente para justificar o pressuposto de funcionamento plástico da conexão. A conexão atinge o valor característico da sua capacidade de carga, P_{Rk} , em dois momentos: no ramo ascendente da curva que relaciona carga e escorregamento (δ_{ek}) e no ramo descendente da mesma curva, antes da rotura ($\delta_{uk} \geq 6 \text{ mm}$)
D3	$\delta_{ek} < 2,5 \text{ mm}$	$\delta_{uk} \geq 10 \text{ mm}$	Conector dúctil com capacidade de deformação suficiente para justificar o pressuposto de funcionamento plástico da conexão. A conexão atinge o valor característico da sua capacidade de carga, P_{Rk} , em dois momentos: no ramo ascendente da curva que relaciona carga e escorregamento (δ_{ek}) e no ramo descendente da mesma curva, antes da rotura ($\delta_{uk} \geq 10 \text{ mm}$)

Os conectores dúcteis são aqueles que apresentam uma capacidade de deformação suficiente para justificar a hipótese de comportamento plástico ideal da ligação ao corte na estrutura considerada. A nova versão do Eurocódigo 4 estabelece a classificação dos conectores metálicos de acordo com a Tabela 1, onde são definidas as classes D1, D2 e D3. Considera-se que o conector é dúctil quando pertence às classes D2 ou D3. As categorias de ductilidade indicadas na Tabela 2 são genericamente representadas na Figura 6.

δ_{ek} e δ_{uk} são definidos na Tabela 2.

O dimensionamento de vigas mistas pode ser realizado assumindo o comportamento plástico da conexão, o que resulta numa distribuição plástica dos esforços de corte ao longo da viga. Esse pressuposto só é possível quando são utilizados conectores dúcteis. Essa condição de ductilidade é garantida quando são utilizados conectores da classe D2 ou D3, de acordo com a Tabela 2.

De um modo geral, os conectores devem ter capacidade de deformação suficiente para justificar qualquer redistribuição

inelástica dos esforços de corte que seja assumida no projeto.

A nova versão do Eurocódigo 4 estabelece que os pernos embebidos em lajes maciças de betão, cuja classe de resistência não exceda C60/75 e a altura do conector não seja inferior a 3,9 vezes o diâmetro da respetiva haste, podem ser integrados na categoria D2. Os pernos embebidos em lajes mistas com chapa trapezoidal podem também ser incluídos na categoria D2 se a capacidade resistente do conector for calculada de acordo com o que está previsto neste regulamento.

3.3.3 Grau mínimo de conexão em vigas de edifícios

Os conectores dúcteis são aqueles que apresentam capacidade de deformação suficiente para justificar a hipótese de um comportamento plástico da conexão na estrutura considerada. Este requisito é cumprido se um conector for da categoria de ductilidade D2 ou D3.

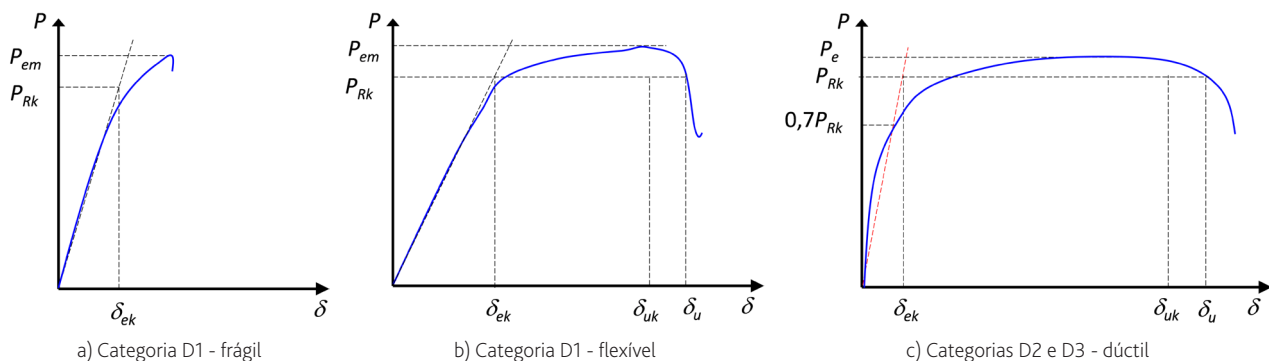


Figura 6 Categorias de ductilidade de conectores metálicos (adaptado de [6])

Em vigas onde se considera a resistência plástica da secção transversal e se utilizam conectores dúcteis (classe D2 ou D3), é possível calcular o momento resistente admitindo uma conexão parcial entre o perfil metálico e a laje e betão. O grau de conexão, η , é calculado a partir do rácio entre o n.º de conectores efetivamente colocado no comprimento L_e e o n.º de conectores necessário para garantir uma conexão total, nesse mesmo comprimento. A nova versão do Eurocódigo 4 introduz algumas alterações no cálculo do valor mínimo a considerar no grau de conexão, tal como se apresenta a seguir.

Nos casos em que a viga está predominantemente sujeita a cargas simétricas, são utilizados conectores das categorias de ductilidade D2 ou D3, a classe do betão não é superior a C60/75 e a classe do aço não excede S460, o grau de conexão deve respeitar a condição (1).

$$\eta \geq \eta_0 \cdot \rho_m^2 \cdot k_{up} \geq \eta_{\min} \quad (1)$$

$$\rho_m = M_{Ed} / 0,95 M_{Rd}(\eta) \text{ e } 0,8 \leq \rho_m \leq 1,0$$

M_{Ed} é o valor de cálculo do momento fletor atuante;

$M_{Rd}(\eta)$ é o valor de cálculo do momento fletor resistente, considerando o grau de conexão η ;

k_{up} é um fator que considera a sequência construtiva:

$k_{up} = 1,0$ quando a secção metálica é escorada em fase construtiva

$k_{up} = (1 - \rho_{up})$ quando a secção metálica não é escorada em fase construtiva

$$\rho_{up} \frac{M_{a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \leq 0,15 \quad \text{quando} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}(\eta)} \leq 0,95$$

$\rho = 0$ nas restantes situações

$M_{a,Ed}$ é o momento atuante resultante do peso próprio, aplicado na secção metálica antes do funcionamento misto ser efetivo;

$M_{pl,Rd}$ é o momento plástico resistente, considerando uma conexão total;

$\eta_{\min} = 0,4$ para conectores da categoria de ductilidade D2

$\eta_{\min} = 0,3$ para conectores da categoria de ductilidade D3

As equações apresentadas são graficamente traduzidas na Figura 7, onde se consideram duas classes de ductilidade, ρ_m igual a 0,8 ou 1,0 e perfil metálico que pode ou não estar escorado em fase construtiva.

4 Evolução e principais alterações na EN 1994-2

Conforme foi já referido anteriormente, uma das principais novidades associadas à Parte 2 da nova versão do Eurocódigo 4 está relacionada com o facto das regras gerais de projeto passarem a estar definidas na Parte 1-1 da norma. No entanto, em algumas situações, a Parte 2 introduz alterações pontuais às regras gerais de projeto definidas na Parte 1-1.

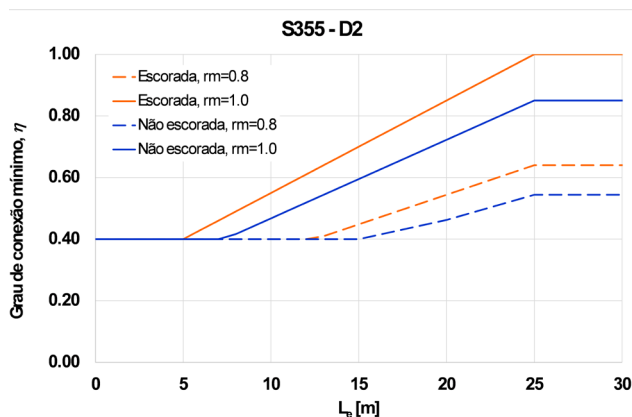
A Parte 2 apresenta novidades a vários níveis. Nos capítulos relativos às bases de projeto e à análise estrutural é possível identificar alterações muito pontuais que têm como objetivo clarificar a interpretação das cláusulas normativas. A única novidade de realce, no âmbito do Capítulo 7, dedicado à análise estrutural, refere-se à introdução de uma metodologia simplificada para o tratamento de elementos de betão tracionados.

As principais novidades da Parte 2 residem nas disposições relativas às verificações de segurança aos Estados Limite Últimos e de Serviço, que se encontram resumidas nas secções seguintes.

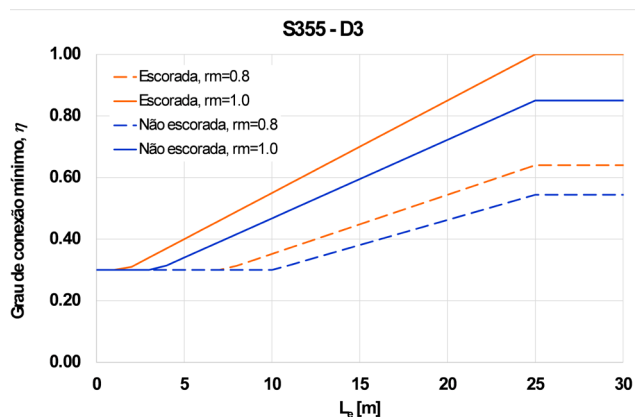
4.1 Vigas mistas embebidas

A nova versão da EN 1994-2 introduz uma alteração ao cálculo do momento resistente de vigas mistas embebidas (Figura 8) simplesmente apoiadas, constituídas por perfis de secção duplamente simétrica das classes 1 ou 2.

De acordo com a norma, o momento resistente positivo pode ser calculado com base numa distribuição plástica de tensões,



a) Viga metálica S355 – Classe ductilidade D2



b) Viga metálica S355 – Classe ductilidade D3

Figura 7 Grau de conexão mínimo

considerando um fator de redução, β , conforme definido na Parte 1-1 e já referido na Secção 3.2.1 deste artigo, igual a 0,95. A aplicação do referido fator requer o cumprimento das seguintes condições:

- a espessura do banzo da secção metálica deve ser igual ou inferior a 80 mm;
- os perfis de aço não são escorados durante a fase de construção e suportam o peso próprio do tabuleiro estrutural. Sob a ação do peso próprio numa combinação de cargas característica, a tensão máxima, $\sigma_{a,CS}$, durante a fase construtiva deve ser superior a:

$$\sigma_{a,CS} \geq 0,5 \cdot (f_y - 275) \text{ MPa} \quad (2)$$

- o contributo da armadura para o cálculo do momento resistente é desprezado.

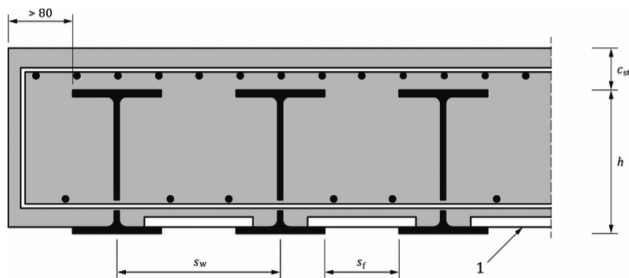


Figura 8 Secção transversal de uma viga mista embebida [8]

4.2 Conexão aço-betão

Na nova versão da Parte 2 do Eurocódigo 4, o dimensionamento dos elementos de conexão aço-betão é remetido para a Parte 1-1. No entanto, a norma introduz uma alteração e uma novidade em relação às disposições normativas atuais.

A alteração está relacionada com o diâmetro e o número de conectores num determinado segmento de viga mista. De acordo com a versão atual da Parte 2, “a dimensão e o espaçamento dos conectores podem ser mantidos constantes em qualquer comprimento em que o corte longitudinal de projeto por unidade de comprimento não exceda a resistência ao corte longitudinal de projeto em mais de 10%.” Na nova versão o limite de 10% é alterado para 15%.

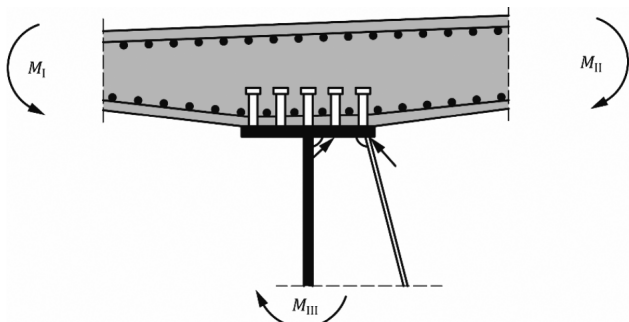


Figura 9 Consideração de momentos fletores no dimensionamento da conexão aço-betão [8]

A novidade encontra-se no dimensionamento de conectores localizados em zonas adjacentes a vigas transversais e a reforços verticais da alma, e para as vigas mistas em caixão. Nestes casos devem ser aplicados os efeitos dos momentos fletores na interface aço-betão, em torno de um eixo paralelo ao eixo da viga metálica, como se mostra na Figura 9, causados por deformações da laje ou do elemento de aço.

4.3 Fadiga

A Parte 2 da nova versão do Eurocódigo 4 introduz algumas alterações no clausulado relativo às verificações à fadiga. Uma das alterações está relacionada com a verificação à fadiga de pernos de cabeça em vigas mistas constituídas por betão leve. Nestes casos a norma introduz um coeficiente corretivo à resistência à fadiga do conector que depende da resistência à compressão do betão. A segunda alteração relevante refere-se ao procedimento de avaliação de segurança à fadiga. A nova versão prevê critérios de verificação de segurança para cenários em que o perno de cabeça está sujeito a cenários de carregamento não estáticos caracterizados, predominantemente, por corte e tração e em que, para o Estado Limite Último, a força de tração é superior a 10% da resistência do conector. Nas pontes mistas, estes cenários de carregamento ocorrem, por exemplo, na ligação entre as estruturas transversais e o tabuleiro de betão de uma viga mista em caixão.

4.4 Estados limite de serviço

Uma das alterações relevantes que é possível identificar na nova Parte 2 do Eurocódigo 4 refere-se à necessidade de verificação dos Estados Limite de Serviço na fase de construção. Segundo a norma, a verificação não é obrigatória, devendo ser realizada quando imposta pelas autoridades relevantes ou quando acordada entre o projetista e as restantes partes envolvidas na construção e/ou exploração da infraestrutura.

5 Considerações sobre o projeto sísmico de estruturas mistas aço-betão

Para além das alterações e novidades identificadas nas secções anteriores, é importante salientar que a nova versão do Eurocódigo 8, a norma que regulamenta o projeto sísmico de estruturas, incorpora também um conjunto de evoluções relevantes no que se refere ao projeto de estruturas mistas aço-betão. Nos parágrafos seguintes descrevem-se algumas dessas evoluções que contribuirão, não só para a simplificação dos procedimentos do projeto, mas também para uma maior exploração do potencial associado às estruturas mistas aço-betão. O enfoque desta secção centra-se apenas em disposições regulamentares aplicáveis ao projeto sísmico de edifícios [11].

5.1 Limites de esbelteza de tubos de aço preenchidos com betão

Os elementos mistos aço-betão caracterizam-se por um nível de comportamento superior ao dos correspondentes elementos metálicos. No caso dos elementos mistos de secção tubular preenchidos com betão, a melhoria do comportamento resulta do confinamento do betão conferido pela secção metálica e, simultaneamente, do contributo do betão no adiamento da encurvadura local do perfil metálico. Estes efeitos combinados refletem-se não só em termos do aumento da capacidade resistente, mas também no aumento da ductilidade do elemento estrutural. De forma análoga aos elementos metálicos, a ductilidade de um elemento misto sujeito a flexão depende da esbelteza das placas de aço da secção metálica. Na nova versão do Eurocódigo 8 observa-se um aumento dos limites de esbelteza (Tabela 3), de tubos metálicos preenchidos com betão, de secção retangular ou circular, em relação aos limites definidos na norma atual [12]. O aumento dos limites de esbelteza verifica-se para as classes de ductilidade de projeto, DC2 e DC3, definidas na Parte 1-1 da nova versão do Eurocódigo 8 [13]. Esta alteração irá permitir, na prática, a utilização de elementos mistos mais esbeltos.

Tabela 3 Limites de esbelteza de secções mistas na EN 1998-1-2 [11]

Classe de ductilidade	DC2	DC3
Valores de referência do coeficiente de comportamento (q)	$q = 1,5$	$1,5 < q \leq 3,5$
Secção em I ou H total ou parcialmente revestida com betão: Limites da relação c/t_f	20ε	14ε
Secção retangular com enchimento: Limites da relação h/t	70ε	52ε
Secção circular com enchimento: Limites da relação d/t	$125\varepsilon^2$	$90\varepsilon^2$

5.2 Ductilidade de vigas mistas

No Eurocódigo 8 a ductilidade de uma viga mista é avaliada em função da profundidade do eixo neutro, usualmente traduzida sob a relação z_c/d_c em que z_c é a profundidade do eixo neutro plástico e d_c representa a altura da secção mista. A nova versão do Eurocódigo 8 estabelece um aumento generalizado da relação z_c/d_c para as várias classes de ductilidade de projeto definidas na norma. Este aumento reflete, na prática, a possibilidade de exploração de maiores níveis de ductilidade neste tipo de elementos estruturais.

Tabela 4 Valores limite de z_c/d_c para ductilidade de vigas com laje na EN 1998-1-2 [11]

Classe de ductilidade	Coefficiente de comportamento (q)	f_y (MPa)	z_c/d_c limite superior
DC2	$1,5 < q \leq 3,5$	355	0,45
		275	0,50
		235	0,55
DC3	$3,5 < q \leq 5,0$	355	0,35
		275	0,40
		235	0,45
	$q > 5,0$	355	0,30
		275	0,35
		235	0,40

5.3 Largura efetiva em vigas mistas

O conceito de largura efetiva é um parâmetro fundamental no projeto de estruturas mistas, mais concretamente na análise e dimensionamento de vigas mistas. A versão atual do Eurocódigo 8 define larguras efetivas diferentes para a análise global da estrutura e para a quantificação da resistência das vigas mistas. Para além disso, as larguras efetivas não coincidem com os valores propostos no Eurocódigo 4. Esta situação tinha como resultado uma maior complexidade nos procedimentos de cálculo. Na nova versão do Eurocódigo 8 continua a efetuar-se uma distinção entre larguras efetivas a utilizar para fins de análise global e para quantificação de resistência. No entanto, as larguras efetivas a adotar na análise global são as definidas no Eurocódigo 4. Já no que diz respeito à quantificação do momento plástico, as larguras efetivas são as apresentadas na Tabela 5.

Na tabela é possível constatar que a largura efetiva depende do sentido do momento fletor, da localização da coluna adjacente à secção da viga em análise, assim como do tipo de viga transversal existente na ligação à coluna. É importante salientar que o desenvolvimento de momentos plásticos junto dos nós de ligação viga-pilar requer a formação de mecanismos de escoras e tirantes na laje de betão, situação que exige a adoção de armadura específica (varões sísmicos).

Tabela 5 Largura efetiva de laje para avaliação do momento plástico na EN 1998-1-2 [11]

Tensões na laje	Localização da coluna	Elemento transversal	$b_{eff,Rd}$
Tração	Interior	Com varões sísmicos	b_{eff}
Tração	Exterior	Com armaduras amarradas à viga ou à faixa de bordo em consola em betão. Com varões sísmicos.	b_{eff}
Tração	Exterior	Sem armaduras amarradas à viga ou à faixa de bordo em consola em betão. Com varões sísmicos.	0,0
Compressão	Interior/Exterior	Viga transversal de aço com conectores e rigidamente ligada à coluna. Com varões sísmicos.	b_{eff}
Compressão	Interior/Exterior	Sem viga transversal de aço com conectores. Com varões sísmicos.	$b_c + 0,7 h_c$
Compressão	Exterior (pórtico periférico)	Sem viga transversal de aço com conectores. Com varões sísmicos.	b_c

6 Considerações finais

Neste artigo efetuou-se uma apresentação global sobre o projeto de estruturas mistas aço-betão no contexto da nova geração de Eurocódigos estruturais. Após uma breve apresentação da organização da nova versão do Eurocódigo 4, foram descritas as principais alterações nas partes relativas ao projeto de edifícios (Parte 1-1) e ao projeto de pontes (Parte 2). Da análise de ambas as partes é possível concluir que ocorreu uma harmonização da norma, através da concentração de todas as regras gerais de projeto na Parte 1-1.

Simultaneamente, identificam-se evoluções relevantes em vários domínios, nomeadamente na gama de classes de materiais contemplada pela norma, nas regras de dimensionamento de vigas mistas, assim como nas regras de dimensionamento dos elementos de conexão aço-betão. No contexto do projeto de pontes, registam-se também evoluções importantes, sobretudo ao nível das verificações de segurança em relação aos Estados Limite Últimos. Por último, é importante salientar que a atualização das regras de projeto disponíveis no Eurocódigo 4 foi acompanhada também de evoluções importantes, ao nível do Eurocódigo 8, a norma europeia aplicável ao projeto sísmico de estruturas mistas aço-betão.

As evoluções dos Eurocódigos 4 e 8 refletem o aumento do conhecimento gerado ao longo das últimas duas décadas relativo ao comportamento de estruturas mistas aço-betão. Este avanço no conhecimento, vertido nas normas de projeto, irá refletir-se a vários níveis. Por um lado, é expectável que a aplicação dos novos

Eurocódigos venha a resultar em estruturas com comportamento mais fiável. Por outro lado, o refinamento das regras de projeto irá permitir uma maior exploração das boas características de comportamento dos sistemas mistos aço-betão, resultando em soluções mais sustentáveis e mais eficientes do ponto de vista económico.

Referências

- [1] EN 1994-1-1:2004 (2004) – “Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [2] EN 1994-1-2:2005 (2005) – “Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: General rules - Structural fire design”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [3] EN 1994-2:2005 (2005) – “Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [4] “M/515 EN – European Commission Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of structural Eurocodes” (2012). European Commission, Brussels, Belgium.
- [5] VILA REAL, P. – 2.ª geração das Partes 1-2 (verificação da resistência ao fogo) dos Eurocódigos Estruturais. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 125-138. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-014>
- [6] prEN 1994-1-1 (2023) – “Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [7] prEN 1994-1-2 (2023) – “Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 1-2: Structural fire design”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [8] prEN 1994-2 (2023) – “Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures. Part 2: Bridges”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [9] prEN 1992-1-1 (2023) – “Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [10] FprEN 1993-1-13 (2023) – “Eurocode 3 - Design of steel structures. Part 1-13: Rules for beams with large web openings”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [11] prEN 1998-1-2 (2023) – “Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 1-2: Buildings”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [12] EN 1998-1:2004 (2004) – “Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [13] FprEN 1998-1-1:2024 (2024) – “Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 1-1: General rules and seismic action”. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.



2.^a geração do Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira

2nd generation of Eurocode 5 – Design of timber structures

Alfredo Dias
José Saporiti Machado
João Negrão

Resumo

Durante muitas décadas o uso da madeira teve pouco relevo no setor da construção em Portugal. Como resultado nunca existiram regulamentos para a sua aplicação, tendo a primeira versão do Eurocódigo 5 marcado um ponto de viragem, a esse nível. Publicado em 2004, num período imediatamente anterior ao aumento significativo do seu uso em aplicações Estruturais na Europa, tendência acompanhada pelo nosso país, ainda que mais recentemente. O processo de revisão da primeira versão do Eurocódigo 5, designada de nova geração, iniciou-se em 2010 e é suposto concluir-se em 2027, com a publicação dos documentos que compõem esta nova versão.

A nova versão pretende dar resposta às novas exigências do mercado das estruturas de madeira, em acelerada expansão, em particular destaca-se a inclusão dos sistemas mistos, CLT ou do reforço de estruturas de madeira. Nesta comunicação faz-se uma breve apresentação do trabalho que está a ser desenvolvido, com particular destaque para as inovações que são introduzidas.

Abstract


For many decades, the use of wood had a low relevance in the construction sector in Portugal. As a result, there were never any codes for its application, in this situation the first version of Eurocode 5 was a turning point at that level. Published in 2004, immediately prior to the significant increase in the use of timber in structural applications in Europe, a trend followed by our country, albeit more recently. The process of reviewing the first version of Eurocode 5, mentioned as the new generation, began in 2010 and is expected to be completed in 2027, with the publication of the documents that make up this new version.

The new version aims to respond to the new demands of the rapidly expanding timber structures market, in particular the inclusion of mixed systems, CLT or reinforcement of timber structures. This communication provides a brief presentation of the work being developed, with particular emphasis on the innovations that are introduced.


Keywords: Estruturas / Produtos de madeira / Ligações de madeira / Sistemas mistos madeira-betão / Reforço estrutural

Palavras-chave: Structures / Wood based products / Timber connections / Composite timber-concrete systems / Structural reinforcement


Alfredo Dias

Presidente da SC 05 da CT 115
Professor Associado com Agregação
ISISE, Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
 0000-0002-9752-1907
alfgdias@dec.uc.pt

José Saporiti Machado

Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0001-5057-0472
saporiti@lnec.pt

João Negrão

Professor Associado
Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal
 0000-0001-6044-2044
jhnegrao@dec.uc.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

DIAS, A. [et al.] – 2.ª geração do Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 71-78. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-008>

1 Enquadramento

Os primeiros trabalhos com o objetivo de produção de regulamentos estruturais unificados, no caso particular das estruturas de madeira, datam da segunda metade da década de 80 (Figura 1). Este trabalho resultou na publicação, em 1993, da ENV 1995 [1], que viria a dar origem à primeira versão do Eurocódigo 5, na primeira década deste século.

Esta iniciativa foi particularmente relevante para países como Portugal, em que a construção em madeira estava relegada para um plano secundário, tendo-se perdido muito do conhecimento e competências nas décadas anteriores. O baixo uso do material levou ainda ao não desenvolvimento de qualquer regulamentação para o projeto de estruturas de madeira, contrariamente ao que aconteceu para as estruturas de betão, o material dominante nas aplicações estruturais.

Por forma a potenciar o uso das madeiras, foi promovido um projeto Europeu com o objetivo de desenvolver ferramentas que auxiliassem ao uso desta pré-norma, tendo resultado um conjunto de dois volumes de exemplos de aplicações STEP 1 [2] e STEP 2 [3], complementados com um conjunto de ferramentas audiovisuais para mais fácil utilização e explicação. Apesar de os modelos e regras terem sido alterados com o passar do tempo, em particular com a publicação da primeira versão do Eurocódigo 5, em 2004 [4,5,6], constituem ainda uma referência bastante útil para compreensão de muitos dos modelos e regras desta norma.

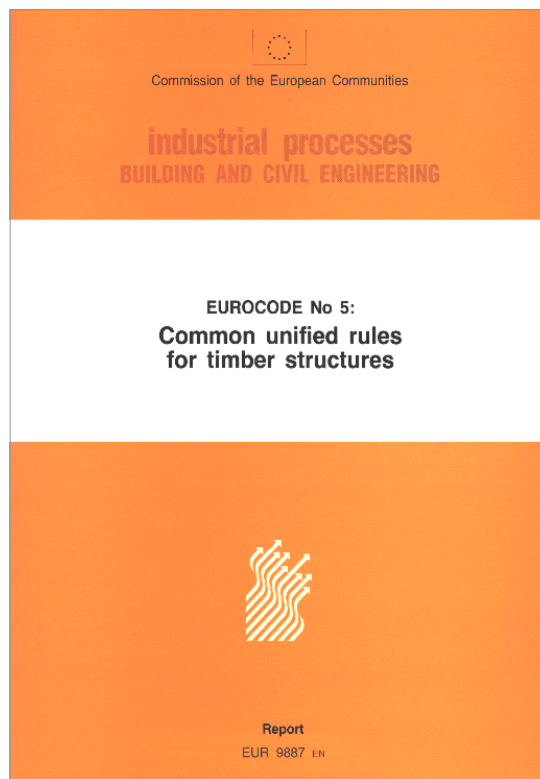


Figura 1 Relatório “Orange book” no qual se baseou a primeira versão do Eurocódigo 5

ENV1995

Tendo por base a ENV 1995, os trabalhos de desenvolvimento normativo continuaram resultando na primeira versão do Eurocódigo 5, que viria a ser publicada em 2004, sendo constituída por 3 partes [4,5,6]:

- EN 1995 Parte 1-1 – Regras gerais. Regras comuns e regras para os edifícios
- EN 1995 Parte 1-2 – Regras gerais. Verificação da resistência ao fogo
- EN 1995 Parte 2 – Pontes de madeira

Em 2010 iniciaram-se os trabalhos para o desenvolvimento da segunda geração do Eurocódigo 5. Numa primeira fase foram definidas as prioridades a considerar, por forma a acompanhar as necessidades e tendências do Mercado da Construção. Nestas incluíram-se não só novos conteúdos, mas também, a melhoria e aprofundamento de algumas regras e modelos existentes.

Em termos de mercado, uma das tendências mais relevantes é a construção em altura. Este tipo de construção é percecionado como um sinal de modernidade e exemplo de sustentabilidade, motivando um enorme interesse nas soluções à base de madeira, nas últimas duas décadas. Esta dinâmica está desde o início muito associada ao desenvolvimento e uso da madeira lamelada cruzada (CLT), a qual promoveu o aparecimento de soluções inovadoras, que permitiram ultrapassar múltiplos constrangimentos, impeditivos da construção em altura à base de produtos de madeira. Apesar do papel central do CLT a sua aplicação assenta na utilização conjunta com outros elementos estruturais de madeira (nomeadamente vigas lameladas coladas), mas em especial através da visão de uma construção híbrida com recurso a múltiplos materiais, em particular a elementos de betão estrutural.

Um excelente exemplo desse tipo de construção é a Mjøsa Tower, em Brunnumdøl na Noruega, com uma altura superior a 85m, terminado em 2019, sendo à altura, o mais alto edifício do mundo construído em madeira (Figura 2).



Figura 2 Mjøsa Tower, na Noruega

A revisão dos Eurocódigos foi incluída na resposta ao Mandato M515 da Comissão Europeia [7]. Tal resultou no estabelecimento de seis

Project Teams, relacionados com o Eurocódigo 5, distribuídos em quatro fases, mais concretamente:

- SC5.T1 – CLT e reforço estrutural
- SC5.T2 – Parte nova para Estruturas Mistas Madeira - Betão
- SC5.T3 – Cluster – Diversas cláusulas para o Eurocódigo 5
- SC5.T4 – Dimensionamento em situação de incêndio
- SC5.T5 – Ligações
- SC5.T6 – Pontes

Como resultado de cada um destes Project Teams foi desenvolvido um relatório técnico-científico com as propostas para cada uma destas seis áreas, sempre complementado com um segundo relatório “Background document” onde é apresentada a base científica, bem como o enquadramento, das opções tomadas.

Tomando como ponto de partida o relatório de cada um dos seis grupos, os correspondentes Grupos de Trabalho da CEN/TC250/SC5, em articulação com a comissão plenária e as comissões dos diversos países, discutiram e ajustaram as propostas por forma a obter as soluções finais que irão ser incluídas na futura versão do Eurocódigo. Neste particular importa relevar a informação constante dos *Background documents*, a qual poderá ser muito útil para perceber as opções e forma de usar os modelos e regras do regulamento, tornando mais fácil a sua compreensão e, logo, ultrapassar indefinições, omissões, ou outras questões cuja resposta não resulta necessariamente óbvia da leitura e análise do documento.

2 Organização

A organização da nova versão é bastante semelhante à da anterior, tendo, contudo, algumas diferenças, as quais podem ser agrupadas em dois níveis: i) Partes constituintes do Eurocódigo; ii) Secções constituintes de cada uma das partes do Eurocódigo.

Enquanto a versão anterior do Eurocódigo 5 era constituída somente pelas três partes comuns a todos os Eurocódigos, referidas anteriormente, a segunda geração do Eurocódigo 5 é constituída pela Parte 1-1 [8], pela Parte 1-2 [9] pela Parte 2 [10] e terá ainda mais duas partes, a Parte 1-3 TS19103 [11] e a Parte 3 [12].

A Parte 1-3 trata os sistemas mistos madeira-betão, sendo baseada no trabalho do Project Team SC5.T2. O relatório deu lugar a uma Especificação Técnica CEN/TS 19103 [11], que está atualmente em vigor sendo, pela sua natureza, de aplicação voluntária, passando estas regras a obrigatórias somente aquando da publicação enquanto norma integrante do Eurocódigo. Durante este período deverão ser introduzidos ajustes resultantes da experiência de aplicação, nos vários países membros do CEN.

As soluções mistas madeira-betão (Figura 3) representam um contributo muito importante na viabilização de construções inovadoras e disruptivas, quer seja por razões construtivas (e.g. redução da transmissão sonora) ou estruturais (e.g. limitações de deformações e vibrações).

A Parte 3 trata questões relacionadas com execução de estruturas, procurando suprir uma lacuna identificada no caso das estruturas de madeira, dado não ter uma norma autónoma de execução como acontece com outros materiais, caso do betão ou do aço. Esta

norma terá particular relevância para países como Portugal, onde a prática e as boas regras de construção ainda não estão tão bem estabelecidas e consolidadas como em outros países congéneres, com uma tradição de construção em madeira muito mais forte.



Figura 3 Exemplo de construção com solução mista madeira-betão

Esta nova parte do Eurocódigo poderá constituir-se como uma ferramenta muito útil a todos os processos de construção em madeira, complementando a regulamentação de projeto aplicável, nomeadamente as restantes partes do Eurocódigo, permitindo uma mais eficaz e rigorosa implementação dos projetos e respetiva pormenorização. O documento apresenta requisitos mínimos, os quais foram definidos por forma a serem atingidos todos os pressupostos de projeto (e.g. modelos, durabilidade), garantindo assim um adequado desempenho ao longo de toda a vida útil da estrutura. Tal é complementado com linhas orientadoras em relação, por exemplo, ao manuseamento ou desvios, em todas as fases do processo, desde o transporte ao final da obra.

Seguindo a lógica da primeira geração de Eurocódigos, a organização interna de cada uma das suas partes é semelhante, sendo que na versão atualmente em discussão, se mantêm as secções da versão anterior. Adicionalmente, são autonomizadas algumas secções e é removida a secção 10 relativa a disposições construtivas e controlo (integradas na nova Parte 3), tendo sido adicionada uma secção dedicada à fadiga e outra às estacas de fundação.

3 Novos conteúdos

A nova versão do Eurocódigo teve como pressupostos base responder às novas exigências do mercado e facilitar o uso e aplicação em relação à versão anterior. Em particular, será aqui dado destaque aos novos conteúdos da Parte 1-1, dado ser a mais relevante e onde se encontram as condições gerais, essenciais para as restantes partes. Existem novos conteúdos e melhoria dos já existentes, na versão em vigor. Neste particular, as principais clarificações estão diretamente relacionadas com situações em que existiam muitas dúvidas ou que, sendo sensíveis, justificavam a disponibilização de alternativas

mais robustas, mesmo que mantendo as existentes, que apesar de simples são adequadas à maioria das situações práticas.

O surgimento do CLT trouxe consigo novas possibilidades para a construção em madeira, nomeadamente no caso particular da construção em altura. Trata-se de um material de elevado potencial, mas também com especificidades muito próprias, que no início deste século dava os primeiros passos, não tendo por isso sido incluído na primeira geração do Eurocódigo 5. Tendo em atenção o crescimento do uso deste material, nos mais variados tipos de obra, em muitos casos associado com outros materiais e outros produtos de madeira (Figura 4), era desde logo um conteúdo essencial para inclusão nesta nova versão. As propostas apresentadas tiveram por base o trabalho do *Project Team SC5.T1*. A este respeito importa, ainda, referir que os produtos estruturais são cobertos por marcação CE obrigatória, com base em normas europeias harmonizadas, ou voluntária, com base em Avaliações Técnicas Europeias.



Figura 4 Exemplo de estrutura mista com utilização de CLT

Tratando-se de um material novo, os conteúdos surgem dispersos no documento, desde as definições na secção 3 até às verificações de segurança nos capítulos 8 e 9, ou ao dimensionamento de ligações no capítulo 11. Existe ainda um Anexo normativo com regras de dimensionamento adicionais, para CLT.

A necessidade de reforço de estruturas de madeira surge em muitas situações, maioritariamente relacionadas com reabilitação e reforço estrutural (Figura 5), mas também, em situações novas, como a situação clássica de surgimento de trações perpendiculares ao fio da madeira, em vigas em arco ou de pendente.



Figura 5 Exemplo de reforço estrutural

As disposições relativas ao reforço estrutural surgem essencialmente na secção de verificação aos Estados Limites Últimos, em cada uma das situações consideradas, mais concretamente: compressão na direção perpendicular às fibras em apoios, corte, membros com

geometrias especiais (e.g. vigas de pendente), membros com entalhes ou com aberturas.

A durabilidade é um aspeto essencial nas estruturas de madeira, em particular em países com elevados níveis de risco de ataque biológico e práticas de manutenção muitas vezes inadequadas, como é o caso de Portugal. A anterior versão do Eurocódigo 5 continha muito pouca informação relacionada com durabilidade, sendo a existente predominantemente relacionada com os elementos metálicos.

A nova versão fornece algumas indicações adicionais, para os elementos metálicos e produtos de madeira, em particular no que se relaciona com riscos biológicos e colagens. No caso específico dos riscos biológicos é dada uma particular atenção à conceção para a durabilidade, nomeadamente através de orientações como o exemplo da Figura 6.



Figura 6 Exemplo de exposição/proteção à chuva [9]

As verificações de estabilidade, seja no caso da encurvadura em elementos comprimidos ou no caso do bambeamento em elementos à flexão, continua a poder ser feita, de uma forma implícita, através dos modelos simplificados apresentados na anterior versão. Nesta

versão introduzem-se algumas alterações, nomeadamente com a apresentação de indicações para o cálculo explícito, quer através de modelos simplificados, quer através de modelos mais complexos, como os modelos não lineares. Estas propostas são complementadas com orientações para a determinação e consideração das imperfeições, no contexto da análise e verificação de segurança.

Uma outra novidade importante diz respeito à análise e verificação de segurança dos elementos e sistemas de contraventamento, para os quais são apresentadas disposições detalhadas, num anexo informativo.

Na secção 8, dedicada à verificação aos Estados Limites Últimos dos membros estruturais, existe uma secção dedicada aos elementos com geometrias especiais. Nesta, além das tipologias já incluídas na versão anterior, são acrescentadas novas situações com bastante relevância e frequente aplicação prática, como elementos com entalhes ou com aberturas. Ambas as situações podem ser críticas, não só pela redução de secção, mas igualmente pelo tipo de esforços que aí se podem gerar, em particular a tração na direção perpendicular à direção das fibras. Para todas estas situações são apresentadas indicações para o dimensionamento de reforços que permitam garantir a segurança, nas situações mais críticas.

A verificação dos Estados Limites de Utilização, secção 9, constitui mais um bom exemplo de clarificação, nesta nova versão. A estrutura geral bem como as respetivas disposições regulamentares são muito semelhantes às da anterior versão. No entanto, foram ajustadas com o objetivo de tornar mais clara a sua aplicação.

No caso da verificação de deformações, os ajustes são essencialmente referentes à forma de interpretar e aplicar as disposições, em diferentes circunstâncias. Por outro lado, no caso das vibrações, um aspeto muito sensível e complexo em pavimentos de madeira, as alterações têm uma maior profundidade. Além da introdução dos níveis de desempenho, é proposto um novo modelo de análise, complementado com a informação necessária para facilitar a sua aplicação.

A disposições relativas à verificação de segurança em casos de fadiga, secção 10, constitui uma novidade na Parte 1-1 do Eurocódigo 5. Apesar deste fenómeno, em estruturas de madeira, ocorrer essencialmente em pontes, pode surgir, igualmente, em estruturas de edifícios, como, por exemplo, em ligações a sistemas de elevação ou torres eólicas. Acresce, por outro lado, que as disposições base devem constar da Parte 1-1, sobre as quais se detalha a Parte 2, em tudo o que respeita às especificidades das pontes. Nesta secção, para além dos pressupostos base, são dadas orientações e dados técnicos necessários à aplicação dos modelos de verificação de segurança, em elementos estruturais e ligações.

Na lógica de clarificação e simplificação, outro excelente exemplo é o das classes de serviço, apresentadas na subsecção 4.3.1.4. A lógica da anterior versão mantém-se, sendo somente acrescentada uma classe de serviço para melhor enquadramento do caso específico das estruturas ou componentes estruturais em condições saturadas. A abordagem de apresentação é, contudo muito distinta, são apresentados limites superiores e valores médios para o teor de água, em cada uma das classes de serviço, bem como o enquadramento que deve ser tido em consideração na atribuição das classes de serviço.

A prática demonstra que esta atribuição, sendo essencial em todas as análises e verificações de segurança, e em muitas situações de fácil interpretação, pode tornar-se particularmente complexa em zonas de transição. Neste contexto a informação adicional será muito útil, evitando más interpretações ou abordagens demasiado penalizadoras.

As ligações constituem, em geral, o ponto mais crítico das estruturas de madeira, não só ao nível de projeto e verificação de segurança, mas igualmente ao nível de execução. Nos últimos anos têm sido muitas as inovações técnicas (e.g. produtos, modelos, processos) que têm sido desenvolvidos, com o objetivo de mitigar estas dificuldades. A regulamentação tem de acompanhar esses desenvolvimentos, motivo pelo qual surgem com naturalidade, múltiplas alterações na secção 11. Podemos encontrar, desde logo, novas tipologias de ligação, como as ligações com varões colados, adiante abordadas com mais detalhe, com tubos expandidos ou até mesmo as ligações 3D. Apesar disso, os linhas de orientação e princípios base mantêm-se semelhantes para todas as tipologias de ligação aos que já constavam da anterior versão. De entre as várias mudanças, as maiores alterações ocorrem ao nível organizativo, com o agrupamento por fenómeno mecânico, em vez da anterior organização, por tipologia de ligador, ou do detalhe e informação técnica de apoio disponibilizada. Esta opção procura responder aos desenvolvimentos técnicos que ocorreram e, simultaneamente, clarificar a interpretação e aplicação dos modelos indicados. O melhor exemplo surge no caso das ligações com ligadores do tipo cavilha em que, além de orientações para novos ligadores, são apresentadas disposições muito mais detalhadas para os afastamentos entre ligadores.

O processo de desenvolvimento de um documento tão complexo é, necessariamente, um processo longo e muito dinâmico. Previamente à inclusão de um conteúdo, múltiplos aspetos têm de ser considerados, sendo necessária uma análise criteriosa e

cuidadosa dos vários valores em presença. Nas primeiras fases de desenvolvimento da versão anterior do Eurocódigo 5, um conteúdo considerado importante para inclusão eram os varões roscados colados, tendo mesmo sido discutidas propostas para a sua inclusão. Este tipo de ligação, constituía já na época uma solução bastante usada na prática, diferenciadora para ultrapassar dificuldades específicas, existindo um conhecimento razoável sobre os aspetos de conceção, dimensionamento e execução, envolvidos. Apesar de reunidas estas condições não foi atingido um consenso suficiente relativamente às propostas a incluir no regulamento, pelo que tal acabou por não acontecer.

Na versão agora em desenvolvimento, a questão foi retomada existindo, na secção de ligações, uma subsecção dedicada a este tema, para ligações com varões colados, como a exemplificada na Figura 7.

A organização e conteúdo segue as mesmas linhas orientadoras usadas para as restantes tipologias de ligação. Concretamente, além, dos requisitos exigíveis para cada um dos componentes (madeira, aço e adesivo) são apresentados os vários modelos passíveis de serem utilizados, para a verificação de segurança para cada um parâmetros aplicáveis.

A robustez estrutural é um aspeto crítico no desempenho das estruturas em situações limite. Uma conceção eficaz deverá assegurar um nível de robustez adequado, o qual poderá, em muitas situações evitar acidentes ou, pelo menos, minimizar os danos provocados por estes, quando exista uma falha numa zona ou componente isolada. Por esta razão o maior enfoque dado a esta questão, na nova versão do regulamento, surge de forma absolutamente natural.

Além de disposições constantes da secção 4 “Bases para o projeto” a proposta em discussão inclui um anexo informativo dedicado ao tema, o Anexo A. Enquanto na secção 4 são apresentadas algumas disposições gerais, o anexo apresenta indicações para a análise, conducente a melhorar a robustez estrutural.

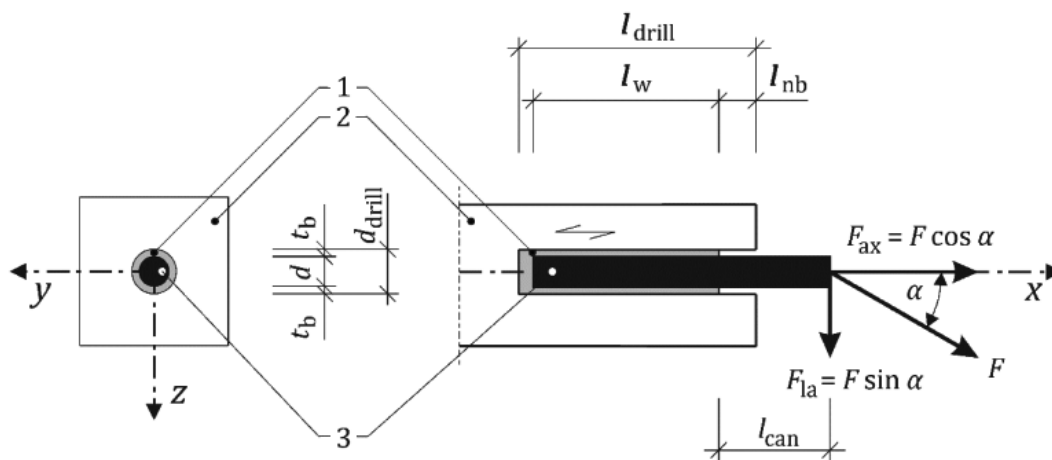


Figura 7 Exemplo de ligação com varão colado [9]

4 Notas finais

A nova versão do Eurocódigo 5, pretende responder a múltiplas questões resultantes do desenvolvimento ocorrido nos últimos 20 anos, entre o desenvolvimento da anterior versão (primeira geração) e da atual (segunda geração). Estes desenvolvimentos ocorreram em múltiplas vertentes, desde logo ao nível dos novos produtos e soluções, mas particularmente, ao nível das novas utilizações, com destaque para a construção em altura. Por estas razões, o foco não pode estar somente no aperfeiçoamento dos modelos existentes e na melhoria do ease of use, mas também na resposta a um elevado número de novas e complexas necessidades.

Para responder a este exigente desafio foram desenvolvidos novos conteúdos, baseados no melhor conhecimento consolidado disponível, ao mesmo tempo que se complementavam outros já existentes, procurando responder a dificuldades de interpretação e aplicação identificadas em duas décadas de uso deste regulamento.

No desenvolvimento deste regulamento foi desde início considerada a existência de *background documents*, compilando um enquadramento claro e exaustivo de todas as opções tomadas, não só para informação futura, mas igualmente para eventual apoio aos utilizadores, estratégia que tinha sido utilizada aquando do início do desenvolvimento das primeiras ENV, com reconhecido sucesso e utilidade.

Pretende-se que no final deste processo a nova versão do Eurocódigo 5 possa ajudar a potenciar a forte dinâmica do setor da construção em madeira, contribuindo positivamente para a resolução de alguns dos desafios centrais do nosso tempo, com a sustentabilidade à cabeça, mantendo-se o seu reconhecimento, em todo o mundo, como um (ou até “o”) regulamento de referência para o setor.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através dos fundos PIDDAC; no âmbito da Unidade de Investigação Instituto para a Sustentabilidade e Inovação (ISISE), com a referência UIDB/04029/2020, e do Laboratório Associado ARISE no âmbito do projeto com a referência LA/P/0112/2020.

Referências

- [1] ENV 1995-1-1:1993 – “Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [2] STEP 1 – Timber Engineering” – First Edition Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- [3] STEP 2 – Timber Engineering” – First Edition Centrum Hout, The Netherlands, 1995.
- [4] Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels: CEN; 2004.
- [5] Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels: CEN; 2004.
- [6] Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 2: Bridges. Brussels: CEN; 2004.
- [7] CEN/TC 250 – Response to Mandate M/515 EN ‘Towards a second generation of EN Eurocodes’. Brussels: CEN; 2013.
- [8] CEN TS 19103 Eurocode 5: Design of Timber Structures – Structural design of timber-concrete composite structures - Common rules and rules for buildings. CEN 2021.
- [9] DRAFT prEN 1995-1-1 - “Eurocode 5 - Design of timber structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”; CEN; 2023.
- [10] DRAFT prEN 1995-1-2 – “Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-2: Structural fire design”; CEN; 2023.
- [11] DRAFT prEN 1995-2 – “Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 2: Bridges”; CEN; 2023
- [12] DRAFT prEN 1995-3 – “Eurocode 5 - Design of timber structures – Part 3: Execution”; CEN; 2023



2.^a geração do Eurocódigo 6 – Projeto de estruturas de alvenaria

2nd generation of Eurocode 6 – Design of masonry structures

Rui Marques
Paulo B. Lourenço

Resumo

As regras para o projeto de estruturas de alvenaria necessitam de atender a novas tendências e soluções na construção. Desde a publicação da atual versão da EN 1996-1-1 (2005), foi desenvolvida ampla investigação sobre o comportamento estrutural da alvenaria, pelo que as especificações para projeto necessitaram de ser atualizadas. Na sequência do Mandato M/515 da CE, diferentes subtarefas foram consideradas na revisão da EN 1996-1-1, tendo em vista melhorar aspetos transversais aos Eurocódigos (p. ex., redução de *NDPs* e maior facilidade de uso) e questões específicas do projeto (p. ex., propriedades de materiais e regras para alvenaria armada). Embora trabalhos futuros possam vir a ser desenvolvidos para considerar necessidades de projeto mais recentes, foi alcançada uma evolução significativa da norma. O presente artigo aborda em geral a série EN 1996 e apresenta as principais alterações no Eurocódigo 6 (Regras gerais). Discutem-se ainda aspetos a melhorar e os principais desafios para o meio técnico nacional.


Abstract

The rules for the design of masonry structures need to meet new construction trends and solutions. Since the current version of EN 1996-1-1 (2005), much research has been carried out on the structural behavior of masonry, so the design specifications needed to be updated. Following the EC Mandate M/515, different subtasks were considered in the revision of EN 1996-1-1, to improve cross-cutting aspects of the Eurocodes (e.g., reduction in *NDPs* and enhanced ease of use) and project-specific issues (e.g., material properties and rules for reinforced masonry). Although future work may be developed to consider newer design needs, a significant evolution of the standard was achieved. This article addresses the EN 1996 series in general and presents the main changes in Eurocode 6 (General rules). Aspects to improve and the main challenges for the national technical field are also discussed.


Palavras-chave: Alvenaria / Projeto de estabilidade / Eurocódigo 6 (Regras gerais) / Evolução da EN 1996-1-1 / Desafios na aplicação

Keywords: Masonry / Structural design / Eurocode 6 (General rules) / Evolution of EN 1996-1-1 / Challenges in application

Rui Marques

Vogal da SC 06 da CT 115
Technical secretary of the Project Team for SC6.T1 Masonry - Revised version of EN 1996-1-1 (October 2015 - March 2018)
Investigador Doutorado
Universidade do Minho, ISISE
Guimarães, Portugal
 0000-0002-2033-0088
marquesmnc@sapo.pt

Paulo B. Lourenço

Presidente (2014-2022) e Vogal da SC 06 da CT 115
Convener of the Project Team for SC6.T1 Masonry - Revised version of EN 1996-1-1 (October 2015 - March 2018)
Professor Catedrático
Universidade do Minho, ISISE
Guimarães, Portugal
 0000-0001-8459-0199
pbl@civil.uminho.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

MARQUES, R. [et al.] – 2.ª geração do Eurocódigo 6 - Projeto de estruturas de alvenaria. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 79-90.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-009>

1 Introdução

A alvenaria foi historicamente utilizada como uma solução fácil e económica na construção de habitação. Atualmente, a construção em alvenaria estrutural obriga a responder a inúmeros requisitos de forma concomitante, o que é uma condicionante importante do sistema. A alvenaria simples (AS) está largamente disseminada em países de baixa sismicidade, tais como o Reino Unido, a Alemanha e o Brasil. Noutras regiões, a construção de edifícios com alvenaria estrutural não tem vindo a ser muito utilizada, principalmente devido à perigosidade sísmica. Na Europa, mesmo em países de baixa sismicidade, a alvenaria tem vindo a ser substituída por outras soluções, nomeadamente o betão armado (BA), ver Quadro 1. No entanto, considerando que podem ser utilizadas soluções de alvenaria armada (AA) e alvenaria confinada (AC), estas têm potencial para serem retomadas em muitas regiões da Europa. Para esse efeito, a atual versão do Eurocódigo 6 para projeto de estruturas de alvenaria, e em particular a parte correspondente às regras gerais (EN 1996-1-1:2005 [1]), foi submetida a revisão tendo em conta o novo contexto de desenvolvimento e investigação na área dos materiais para alvenaria e as práticas de construção.

O desenvolvimento de normas abrangentes para o projeto estrutural de edifícios é hoje reconhecido como fundamental para garantir um desempenho adequado dos mesmos, tanto em termos de estados limites últimos como de utilização. De acordo com [2], existem diferentes abordagens de projeto que foram consideradas na evolução das normas de estruturas, desde o projeto empírico baseado na experiência, passando pela regulamentação prescritiva, até abordagens mais atuais. No caso da EN 1996-1-1, a definição de dimensões mínimas com base no cálculo com limites de valores extremos, por exemplo, para a esbelteza das paredes estruturais, pode ser considerada um instrumento para uma abordagem baseada no desempenho [3].

Um dos principais desafios no desenvolvimento de normas de projeto é a tradução dos resultados da investigação em regras práticas, que cumpram com a filosofia de projeto subjacente. Este processo pode introduzir a questão da clareza, porque muitas das regras de projeto na normativa são apresentadas sem a devida contextualização. Desde a primeira publicação dos Eurocódigos (concluída em 2007), o contexto da sua aplicação alterou-se significativamente, no que diz respeito ao sector da construção, aos resultados da investigação e às abordagens de projeto. No âmbito do Mandato M/515 da Comissão Europeia para o desenvolvimento da segunda geração de Eurocódigos [12], foi estabelecida a tarefa SC6.T1 para a revisão da EN 1996-1-1. As subtarefas consideradas no Mandato foram abordadas no trabalho da Equipa de Projeto (*Project Team, PT*), exceto a robustez que foi abordada externamente. A nova versão do Eurocódigo 6 - Parte 1-1 [4] foi desenvolvida considerando a complexidade de vários resultados de investigação, com o pragmatismo da realidade da construção e as aptidões dos profissionais.

No desenvolvimento da EN 1996-1-1:2022 [4] foram identificados aspetos prioritários a abordar no projeto de alvenaria, em particular a definição das propriedades dos materiais, critérios de resistência e regras de projeto. A harmonização e extensão das regras de acordo com outras normas europeias, nomeadamente a EN 1992-1-1:2004

[5] para estruturas de betão, foi também uma exigência europeia. Por exemplo, a AA está amplamente disseminada internacionalmente, mas as suas regras de projeto estão menos desenvolvidas do que as do BA, sendo que coexistem tecnologias muito diversas. Materiais e soluções mais recentes para a construção em alvenaria necessitavam igualmente de ser enquadrados na norma. A seguir apresenta-se uma visão geral da EN 1996, os principais desenvolvimentos da futura EN 1996-1-1, bem como uma discussão sobre possíveis melhorias da norma e os desafios para a sua aplicação.

Quadro 1 Lista das principais tipologias de edifícios utilizadas em países europeus com diferente sismicidade (de acordo com pesquisa dos autores)

Países	Sismicidade	Principais tipologias estruturais
Agregado*	Baixa	AS
Malta	Baixa	AS, pórticos de BA
Espanha	Baixa	Pórticos de BA
Luxemburgo	Baixa	Pórticos de BA e metálicos
Suécia	Baixa	Painéis de madeira pré-fabricados
Noruega	Baixa a média	Construção modular em madeira
França, Portugal	Baixa a média	Pórticos de BA
Suíça	Baixa a média	Pórticos de BA e metálicos
Eslováquia	Baixa a média	AS, pórticos de BA
Hungria	Média	Pórticos de BA
Roménia	Média	Paredes de BA ligeiramente armadas
Eslovénia	Média	AS, AC, AA, BA, estruturas mistas
Chipre, Grécia	Média a alta	Pórticos de BA
Islândia	Média a alta	BA (pórticos e paredes ligeiram. armadas)
Itália	Média a alta	AS, AA, BA, estruturas mistas

* Agregado: AT, BE, CZ, DK, EE, FI, DE, IE, LV, LT, NL, PL, UK. Na LV os painéis de betão pré-fabricados e de grandes dimensões são também largamente utilizados.

2 Sobre a série EN 1996

O projeto de estruturas de alvenaria é tratado no Eurocódigo 6, ou seja, o conjunto de normas correspondentes à série EN 1996. Esta série inclui as partes correspondentes: às regras gerais para o projeto estrutural, EN 1996-1-1 (apresentada na Secção 3); à verificação da resistência ao fogo, EN 1996-1-2 [6]; às considerações de projeto, seleção de materiais e execução, EN 1996-2 [7]; e aos métodos de cálculo simplificados para alvenaria não armada, EN 1996-3 [8]. O Eurocódigo 6 não é ainda utilizado em muitos países, apesar da significativa promoção para a sua utilização. No entanto, os procedimentos de projeto no Eurocódigo 6 têm sido considerados como referência e até adotados em normativa de projeto de estruturas em países não membros do CEN [9].

De acordo com as versões das normas europeias submetidas a voto formal (FprEN), as principais alterações em relação às edições em vigor são sucintamente listadas abaixo. A EN 1996-3 está em fase

de inquérito, mas de qualquer forma não é aplicável a nível nacional, pelo que não é abordada neste artigo.

- FprEN 1996-1-1: Regras gerais para estruturas de alvenaria armada e não armada
 - melhoria da verificação ao carregamento combinado;
 - melhoria do fator de redução da capacidade para esbelteza e excentricidade;
 - adição do coeficiente de atrito ao corte fora do plano;
 - adição de regras para alvenaria confinada;
 - adição de anexos informativos para formas complexas e propriedades médias de materiais.
- FprEN 1996-1-2: Projeto estrutural ao fogo
 - fator reduzido η_{fi} para edifícios com pavimentos de madeira;
 - supressão do Anexo A da atual norma com orientações sobre a seleção dos períodos de resistência ao fogo;
 - atualização das tabelas do Anexo B da atual norma (como futuro Anexo A), tendo em conta evidências resultantes de ensaios recentes;
 - novo Anexo B com informações sobre parâmetros de cálculo, substituindo os atuais Anexos C e D;
 - a estrutura e o índice foram harmonizados com as partes principais dos outros Eurocódigos.
- FprEN 1996-2: Considerações de projeto, seleção de materiais e execução
 - os desvios permitidos da alvenaria construída em relação à sua posição pretendida foram tornados consistentes com a EN 1996-1-1;
 - as condições de exposição da alvenaria foram clarificadas;
 - foram atualizadas as especificações de unidades de alvenaria e argamassa para durabilidade da alvenaria em diversas condições de exposição;
 - o espaçamento das juntas de dilatação foi revisto;
 - foram desenvolvidas especificações sobre as tolerâncias a ser usadas para alvenaria com argamassa em juntas finas;
 - o refecimento das juntas de alvenaria foi substancialmente revisto;
 - foram adicionadas informações atualizadas sobre a durabilidade dos componentes auxiliares.

3 Descrição geral da EN 1996-1-1

O atual Eurocódigo 6 Parte 1-1 [1] tem nove secções (Figura 1). Estas consistem em: secções comuns a todos os Eurocódigos: Generalidades, Bases para o projeto; secções que estabelecem a sequência padrão: Materiais, Durabilidade, Análise estrutural, Estado limite último, Estado limite de utilização; e secções específicas da tipologia: Disposições construtivas, Execução. A norma inclui ainda dez anexos informativos, para sustentar e complementar o seu conteúdo.

A abordagem da EN 1996-1-1 baseia-se no projeto para estados limites, em conjunto com fatores parciais para calcular os valores de

cálculo das ações para combinação e das resistências dos materiais a partir dos valores característicos. O estado limite último considera-se relacionado com eventos de colapso estrutural, perda de equilíbrio, encurvadura e perda de estabilidade dos elementos de alvenaria, enquanto o estado limite de utilização está relacionado com a deformação e a fendilhação da alvenaria. Assim, o dimensionamento de um elemento estrutural baseia-se na verificação de que o valor de cálculo da carga aplicada ao elemento (E_d) é menor ou igual ao valor de cálculo da sua resistência (R_d). Em alguns casos, a redistribuição de esforços internos é permitida, por exemplo, para vigas de alvenaria armadas com varões de aço. Neste caso, a distribuição elástica linear dos esforços internos pode ser modificada, garantindo o equilíbrio, desde que os membros tenham suficiente ductilidade.

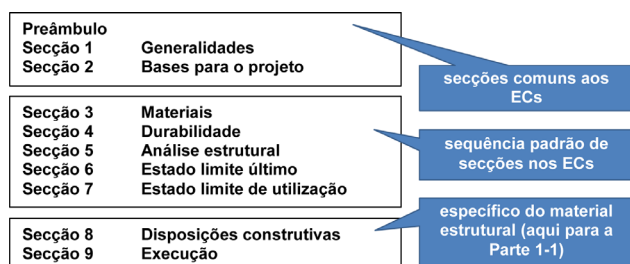


Figura 1 Estrutura da atual EN 1996-1-1 (2005)

A inclusão de Parâmetros de Determinação Nacional (NDPs) é comum nas normas das séries EN 199x. O Eurocódigo 6 é uma das normas que apresenta um menor número destes parâmetros, apesar de a alvenaria ser um material com elevada diversidade na Europa. O estágio de desenvolvimento dos atuais Eurocódigos permitiu comprovar alguma falta de harmonização. Adicionalmente, verificou-se a necessidade de desenvolver guiões de aplicação que simplificassem as tarefas da comunidade técnica. A este propósito, é feita referência ao website <https://www.eurocode6.org> [11], no qual se apresentam informação e exemplos para orientação na aplicação da EN 1996-1-1.

Desde a atual versão da EN 1996-1-1, em 2005, o sector da alvenaria sofreu alterações e foi desenvolvida muita investigação adicional. Além disso, há um conhecimento acumulado relativamente à aplicação da norma, que foi considerado na revisão para evolução da EN 1996-1-1, conforme apresentado na secção seguinte.

4 Evolução e principais alterações na EN 1996-1-1

No âmbito do Eurocódigo 6, foram introduzidos novos materiais e foram propostos diferentes métodos e requisitos para o projeto de estruturas de alvenaria. Como parte da tarefa para evolução da EN 1996-1-1, foram identificadas dez tarefas prioritárias:

1) Redução do número de Parâmetros de Determinação Nacional (NDPs): O objetivo consistia em rever a norma e o conteúdo dos Anexos Nacionais de todos os países, a fim de desenvolver propostas para reduzir o número de NDPs e/ou permitir um

maior consenso sobre os valores adotados pelos países.

- 2) Uso facilitado: Pretendia-se melhorar a facilidade de utilização da norma, aumentando a clareza, simplificando os percursos através da norma, evitando ou eliminando regras de menor utilidade prática no projeto, e evitando regras adicionais e/ou empíricas para estruturas ou tipos de elementos estruturais particulares.
- 3) Propriedades dos materiais de alvenaria: O objetivo era, tendo em conta os novos resultados experimentais disponíveis, estabelecer uma forma mais fiável de cálculo da resistência à compressão da alvenaria, com base nas propriedades das unidades e da argamassa utilizadas, e simplificando o agrupamento das unidades.
- 4) Análise estrutural – generalidades: Pretendia-se, face à semelhança do comportamento do betão armado e do betão simples com a alvenaria armada e a alvenaria simples, respetivamente, harmonizar as regras de cálculo dos efeitos de segunda ordem, e para as paredes carregadas no plano e de contraventamento.
- 5) Análise estrutural – formas complexas: O objetivo era, considerando que as formas complexas são possíveis nos edifícios de alvenaria, propor regras para estes membros, permitindo que os mesmos contribuam para a estabilidade das estruturas de alvenaria, possibilitando otimizar seções transversais com menos uso de material.
- 6) Alvenaria confinada: Pretendia-se alargar e melhorar as regras e disposições gerais para o projeto de estruturas de alvenaria confinada, e também incluir regras no que diz respeito aos esforços induzidos no plano das paredes, ou seja, corte e flexão.
- 7) Estados limites últimos: O objetivo era, com base em investigação recente, propor regras mais claras para paredes sujeitas a esforços principalmente verticais ou a forças verticais e laterais combinadas, melhorar os modelos de resistência para paredes sujeitas a forças concentradas, e melhorar as regras para alvenaria reforçada e confinada ao corte e à flexão.
- 8) Anexo relativo à excentricidade de carga fora do plano: Pretendia-se, com base nos novos conhecimentos, nos resultados da investigação e na experiência da prática, rever as disposições relativas aos pavimentos apoiados numa parte da espessura das paredes, e aos seus vãos.
- 9) Robustez: O objetivo era, tendo em conta a revisão das regras de robustez nas normas EN 1990:2002 (Eurocódigo - Bases para o projecto de estruturas) e EN 1991-1-7:2006 (Eurocódigo 1: Ações em estruturas - Parte 1-7: Ações gerais - Ações de acidente), elaborar regras específicas relacionadas com a alvenaria.
- 10) Sustentabilidade: Pretendia-se, devido às exigências crescentes em matéria de eficiência energética, alargar as regras a pormenores como pavimentos parcialmente apoiados em paredes devido a isolamento térmico, inclusão de unidades específicas para evitar pontes térmicas, e paredes duplas com caixa de ar mais larga apresentando diferenças elevadas na

rigidez dos panos exterior e interior.

Os avanços mais relevantes nas várias subtarefas, excluindo a Robustez que teve um tratamento harmonizado, são apresentados nas subsecções seguintes. A título de comparação com a atual versão da norma, apresenta-se na Figura 2 a estrutura da futura norma, onde se destaca o aumento do número de secções. Para além disso, a norma foi reestruturada para uma melhor coerência no agrupamento das regras aplicáveis a cada tipologia de alvenaria, e nos procedimentos de verificação de segurança para cada um dos tipos de carregamento considerados e para os esforços correspondentes envolvidos.

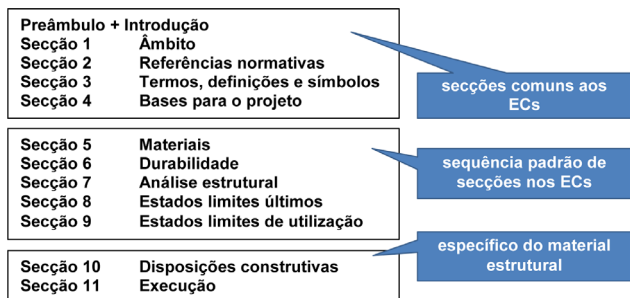


Figura 2 Estrutura do futuro Eurocódigo 6 - EN 1996-1-1 (2022)

4.1 Parâmetros de Determinação Nacional (NDPs)

A redução de *NDPs* é uma bandeira para a revisão dos Eurocódigos. Uma análise crítica e a comparação dos *NDPs* em vários Anexos Nacionais (ANs) do Eurocódigo 6 é feita em [13]. Segundo estes autores, a maioria dos *NDPs* do Eurocódigo 6 tem reduzidas possibilidades de harmonização, nomeadamente as propriedades de resistência, por serem muito diferentes em cada país. Um relatório sistemático de *NDPs* considerados nos ANs da EN 1996-1-1, para avaliar a sua influência na especificação da argamassa de alvenaria, é apresentado em [14].

O Quadro 2, retirado de Briceño *et al.* [14], apresenta os valores dos parâmetros utilizados em diferentes países para calcular a resistência característica à compressão da alvenaria, f_k , de acordo com a fórmula regulamentar aplicável. Observa-se uma variação significativa de valores, cuja utilização resulta em diferentes valores de f_k , como se mostra na Figura 3 para alvenaria de tijolo cerâmico com diferentes classes de argamassa. Os valores recomendados para estes parâmetros na EN 1996-1-1 resultam em valores de f_k que são, em geral, superiores aos obtidos pela utilização dos parâmetros nos ANs, com exceção da Estónia para a classe de argamassa de 2,5 MPa.

De facto, os materiais utilizados na alvenaria estrutural em cada país são diversos, ou seja, unidades com geometria e resistência muito diferentes, mesmo quando feitas de material similar, e argamassas com traços e resistência à compressão muito variados. Isto é ainda mais relevante para o cálculo da resistência ao corte da alvenaria, porque a resistência ao corte sob compressão nula

e o valor limite da resistência ao corte são especificados na EN 1996-1-1 em função do material da unidade e da resistência à compressão da argamassa. Para lidar com este problema, alguns países consideram fatores adicionais para definir a resistência ao corte, como o tipo de mecanismo de rotura por corte e a resistência à tração das unidades [14].

Quadro 2 Valores de K , α e β para cálculo de f_k para alvenaria com argamassa corrente em diferentes ANs [14]

Parâmetros	Países								
	B/L	AT	FI	NL	PL	LT	UK	EE	DE
K Cerâm.	G1	0,5	0,6	0,6	0,6	0,45	0,5	0,5	0,55
	G2	*	0,55	0,5	0,5	0,4	0,45	0,4	0,45 [0,54]
	G3	**	0,5	0,4	–	0,3	0,35	–	0,35 0,79]
	G4	–	–	0,35	–	0,3	0,3	–	0,35
K Betão	G1	0,6	0,6	0,65	0,6	0,4	0,5	0,75	0,55
	G2	0,5	0,55	0,55	0,5	0,35	0,45	0,7	0,45 [0,74]
	G3	0,45	0,5	0,5	–	0,3	0,3	–	0,4 0,95]
	G4	–	–	0,45	–	0,25	0,3	–	0,35
α		0,65	0,65	0,65	0,65	0,7	0,7	0,7	0,85 [0,58 0,63]
β		0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,3	0,3	0 [0,10 0,16]

B/L: Bélgica/Luxemburgo * 0,5 δ ^{-0,65} ** 0,4 δ ^{-0,65}

† $f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta$, em que f_b é a resistência à compressão média normalizada das unidades e f_m é a resistência à compressão da argamassa, em N/mm²

§ δ é o fator de forma conforme definido na norma EN 772-1:2011 [15]

Na futura versão da EN 1996-1-1 foram eliminados dois *NDPs* relativamente à norma atual:

- 1) Cláusula 2.4.4: O valor a atribuir ao fator parcial γ_{M^*} para todas as propriedades de material para estados limite de utilização, é agora definido de acordo com o valor recomendado de 1,0.
- 2) Cláusula 6.1.2.2: A esbelteza de uma parede abaixo da qual a excentricidade de fluência pode ser considerada igual a zero.

Para a maioria dos *NDPs*, as práticas de projeto e os materiais de construção localmente usados em diferentes países dificultam a harmonização, particularmente no que diz respeito à especificação de argamassas para alvenaria e à utilização de diferentes unidades de alvenaria, cujos parâmetros são baseados em resultados de ensaios e/ou regras de cálculo. Apesar da limitada redução de *NDPs* na futura EN 1996-1-1, o seu reduzido número e a forma como os mesmos são agora especificados permitem uma melhor orientação para apoiar a decisão em projeto, sem restringir os requisitos específicos necessários em cada país.

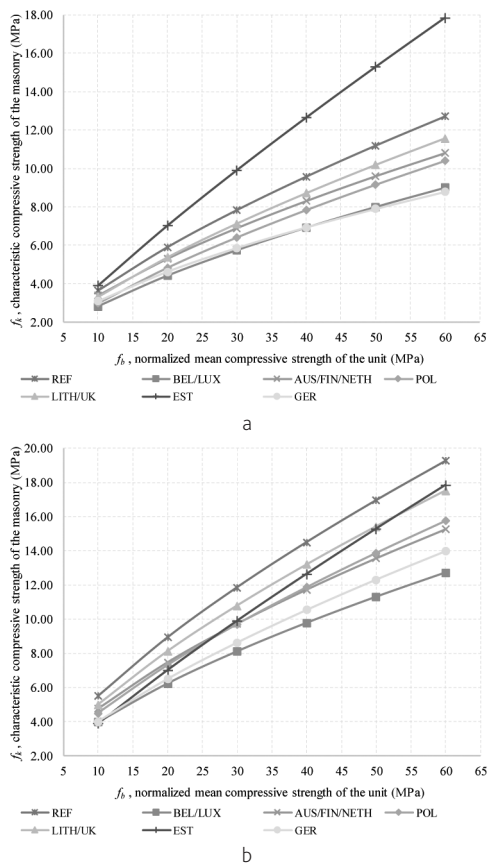


Figura 3 Valores de f_k para alvenaria de tijolo cerâmico com argamassa corrente das classes de (a) 2,5 MPa e (b) 10 MPa [14]. REF corresponde aos valores recomendados na norma EN 1996-1-1 (2005)

4.2 Resistência ao corte

A resistência ao corte de uma parede de alvenaria é um dos tópicos que tem suscitado maior interesse e discussão no projeto de estruturas de alvenaria, atendendo à sua relevância para a capacidade da estrutura quando submetida a ações horizontais. A consideração na EN 1996-1-1 de uma formulação da resistência ao corte baseada em diferentes modos de rotura, tendo em conta o historial de investigação experimental desde os anos 1980, foi reivindicada por diversos países. O projeto ESECMaSE (<http://www.esecmase.org>, 2004-2008) foi dedicado à investigação experimental e teórica da resistência ao corte de paredes de alvenaria, de forma a desenvolver procedimentos de projeto a incluir em normas e regras simplificadas para aplicação da alvenaria moderna. A aplicação crescente de materiais pouco utilizados, por exemplo, paredes com argamassas para juntas delgadas e membranas de corte de capilaridade, e o uso de determinados pormenores construtivos, como seja uma fiada de alvenaria com menor resistência na base ou no topo da parede, introduz dificuldades acrescidas no projeto. Isto, porque, nestas situações é necessário verificar a segurança ao corte em diferentes secções da parede.

A formulação da resistência ao corte fora do plano das paredes de alvenaria é outro aspeto a considerar, embora a resposta para fora do plano seja normalmente controlada por flexão. A rotura de uma parede de alvenaria para fora do plano pode levar a um colapso parcial ou mesmo global da estrutura, se envolver uma parede resistente. A rotura devido ao corte fora do plano é mais provável de ocorrer no caso de paredes com flanges e/ou como resultado de um mecanismo de corte combinado no plano e fora do plano. Seguidamente, apresentam-se as principais considerações para a revisão das regras de resistência ao corte na EN 1996-1-1.

4.2.1 Corte no plano

A fórmula para calcular a resistência ao corte da alvenaria baseia-se no critério de rotura de Mohr-Coulomb, no qual a resistência ao corte característica f_{vk} é calculada adicionando a resistência ao corte inicial característica f_{vk0} (considerada como coesão) à resistência por atrito. Para esta última parcela, é usual adotar um coeficiente de atrito μ_f , igual a 0,4, ou seja, com um valor de $0,4\sigma_d$, em que σ_d é a tensão de compressão de cálculo perpendicular ao corte. De facto, o μ_f de 0,4 é assumido após a aplicação de um fator de redução correspondente à teoria de Mann-Müller [16], de modo que a resistência ao atrito da parede dependa do atrito da junta e da geometria das unidades [17]. A rotura por corte diagonal através de unidades e juntas de argamassa é também considerada através da limitação da coesão em função da resistência à compressão das unidades. Desta forma, a fórmula atual é capaz de fornecer uma estimativa adequada da resistência ao corte de acordo com diferentes modos de rotura [18].

Outro aspeto que tem suscitado discussão é a influência das membranas de corte de capilaridade (dpc) na resistência ao corte das paredes de alvenaria. Efetivamente, a utilização de dpc é necessária para evitar humidade na alvenaria. Foram realizados ensaios experimentais para avaliar os parâmetros de resistência ao corte de acordo com o critério de Mohr-Coulomb, por exemplo [19] e [20]. Mojsilović [19] testou 10 séries de provetes pré-comprimidos de alvenaria com uma dpc de diferentes materiais. Uma reduzida resistência ao corte inicial (0,04 MPa) foi reportada para os provetes com uma dpc de elastómero quando comparada com outras membranas, e, nomeadamente, para a alvenaria simples, ver Quadro 3. Por outro lado, verifica-se um coeficiente de atrito muito baixo para uma dpc de betume. Estes resultados confirmam a necessidade de definir os valores de f_{vk0} e μ_f a utilizar na verificação da resistência ao corte, eventualmente com valores diferentes em distintas fiadas de uma parede.

Quadro 3 Valores médios dos parâmetros de resistência ao corte

Referência	membrana dpc	f_{vk0} (MPa)	$\tan\phi$
Mojsilović [19]	nenhuma (AS)	0,30	0,87
	à base de elastómero	0,04	0,71
	à base de poliéster	0,11	0,75
	à base de betume	0,17	0,06
Martens e Bertram [20]	nenhuma (AS)	0,51	0,63
	polietileno	0,10	0,38

A resistência ao corte da alvenaria armada é também um tópico que tem sido debatido, particularmente no que respeita ao efeito da armadura vertical. Há três pontos principais que foram considerados na revisão da EN 1996-1-1:

- 1) A formulação da contribuição da AS para a resistência ao corte deve considerar o comprimento da parte comprimida da parede em vez do seu comprimento total. Tendo em conta os trabalhos experimentais realizados para AA, conclui-se que a dupla simplificação de considerar a resistência ao corte ao longo do comprimento útil da secção e de considerar uma inclinação de 45° (fixa) da fenda permite uma boa estimativa do valor da resistência ao corte experimental [21]. A consideração da parte comprimida da parede de alvenaria, tal como é considerada em AS, levaria a um cálculo excessivamente complexo.
- 2) A definição da área total A_{sw} da armadura de corte horizontal na parte da parede que está a ser considerada necessita de ser clarificada. Se for assumido um plano de resistência ao corte com um ângulo de 45° ao longo do comprimento útil da parede (d), a percentagem de armadura deve ser obtida dividindo d pelo espaçamento dos varões, ou seja, d/s . Além disso, o valor da tensão na armadura de corte (assumindo que a armadura não plastifica) deve, de acordo com trabalhos experimentais (por exemplo, [21] e [22]), ser limitada a 0,5-0,7 da tensão de cedência, pelo que na futura norma é proposto um valor de 0,6.
- 3) A limitação da resistência ao corte das paredes de AA com base na resistência das unidades resultava ser inconsistente. De facto, a resistência ao corte das paredes de AA deve ser relacionada com a resistência à compressão da alvenaria, uma vez que a presença de armaduras permite uma redistribuição de tensões que envolve toda a parede de alvenaria, e não apenas a unidade individual. Assim, assumindo um mecanismo de treliça (considerando as armaduras horizontais e verticais), a limitação deve ser em termos do valor máximo da resistência ao corte que induz a rotura da escora comprimida da treliça. O valor limite da resistência ao corte para paredes de AA é agora definido como $0,3 f_d t d$, em que f_d é a resistência de cálculo à compressão da alvenaria ou do enchimento de betão, consoante o que for menor, t é a espessura da parede e d é o comprimento útil da parede. Esta fórmula está em linha com a abordagem da EN 1996-1-1 (2005) para vigas de AA.

4.2.2 Corte fora do plano

O comportamento fora do plano das paredes de AS é maioritariamente determinado pela sua flexão. As condições de apoio têm uma grande influência na orientação das tensões principais e no padrão de fendilhação resultante [23]. A ocorrência de corte fora do plano também pode ser largamente dependente das condições de fronteira. Muitos ensaios experimentais têm sido realizados para investigar o comportamento fora do plano de paredes de alvenaria (por exemplo, [23] e [24]), nomeadamente para avaliar a influência das paredes transversais (flanges) na resposta ao corte e no padrão de fendilhação dos painéis carregados. Efetivamente, as flanges aumentam a resistência à flexão fora do plano da parede e amplificam o efeito do deslizamento fora do plano quando comparado com o caso de uma parede simples (Figura 4). Griffith

et al. [23] referem que, em ensaios cíclicos fora do plano de paredes de alvenaria com flanges, foi observado o deslizamento entre fiadas sucessivas de painéis adjacentes, causando uma redução da secção transversal da parede. Na Figura 4 observa-se que uma parede com flanges apresenta uma maior extensão de fissuras de deslizamento comparativamente a uma parede simples, para além das linhas de cedência típicas devidas à flexão fora do plano num único painel.

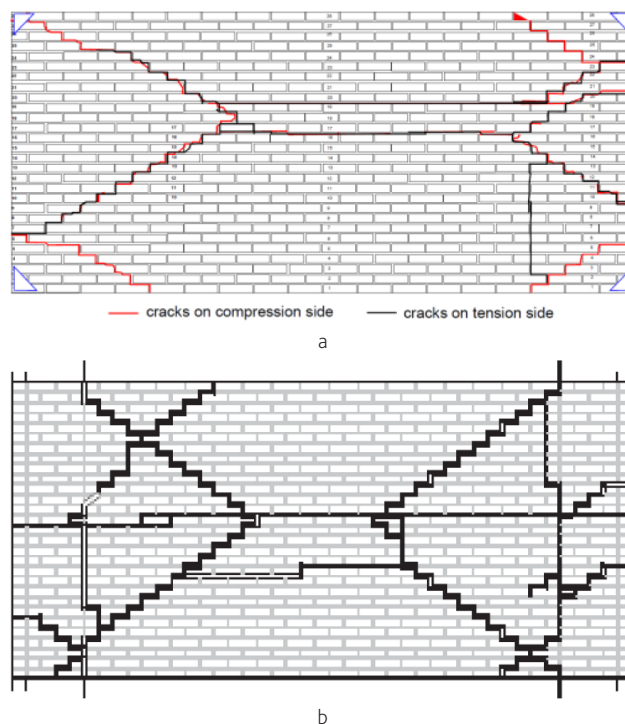


Figura 4 Padrões de fissuração em AS: (a) parede simples [24] e (b) parede com flanges [23]

Na EN 1996-1-1 não é feita qualquer diferenciação entre o corte no plano e fora do plano. Tal distinção é feita apenas no AN à norma alemã [25], no qual a resistência ao corte fora do plano devido à rotura por atrito é calculada com base na espessura comprimida da parede após considerar a excentricidade da carga axial, à semelhança do que é feito na verificação à encurvadura. Na futura EN 1996-1-1 é incluída uma regra de verificação da resistência ao corte fora do plano, semelhante aquela da resistência ao corte no plano, mas com papéis invertidos da espessura e do comprimento da parede. Assim, o valor de cálculo da resistência ao corte fora do plano de uma parede de alvenaria deve ser calculado com base na resistência ao corte inicial característica, f_{vk0} , e no valor característico do coeficiente de atrito da junta de assentamento ou da membrana de corte de capilaridade, μ_f .

4.3 Efeitos de segunda ordem

As tendências arquitetónicas valorizam paredes de alvenaria esbeltas para flexibilidade dos espaços, pelo que os efeitos de segunda ordem são um aspeto cada vez mais importante no projeto. A EN 1996-1-1 inclui uma secção específica para lidar com

os efeitos de segunda ordem, a qual apresenta um procedimento baseado na hipótese de que a estrutura tem os elementos estruturais convenientemente ligados entre si, de modo que o método de verificação de segurança considera a estrutura global para verificar se a instabilidade da mesma pode ser desprezada. A instabilidade de paredes individuais relacionada com os efeitos de segunda ordem é um tópico mais controverso no projeto de alvenaria, tanto no caso de estruturas de AS como de AA. Estes efeitos são particularmente importantes no que respeita ao comportamento fora do plano de paredes esbeltas. Apesar da sua importância, de acordo com Donà *et al.* [26], nas normas europeias (EN 1996-1-1 e EN 1998-1) estes efeitos não são explicitamente considerados, uma vez que os valores limite de esbelteza são determinados, essencialmente, para condições de apoio articulado em ambas as extremidades.

4.3.1 Paredes de AS

A encurvadura de uma parede está relacionada com uma redução da capacidade de carga axial devido a uma carga vertical excêntrica. A abordagem para a encurvadura na EN 1996-1-1 foi estudada por Bakeer e Jäger [27]. Estes autores afirmam que a abordagem, que se baseia numa fórmula exponencial empírica para o fator de redução da capacidade Φ , não é adequada para alvenaria menos rígida, utilizada em alguns países como, por exemplo, a Dinamarca. Isto deve-se ao facto dessa fórmula ter sido definida após considerar uma relação constante entre o módulo de elasticidade e a resistência característica à compressão, E/f_k , igual a 1000. Assim, ao calcular a capacidade de carga axial N_{rd} em função de f_k , existe um ponto da relação $N_{rd} - f_k$ após o qual os valores calculados são inconsistentes, uma vez que N_{rd} diminui à medida que f_k aumenta.

Bakeer [28], com base em estudos numéricos, propôs uma fórmula empírica para o N_{rd} de paredes de AS sujeitas à encurvadura, que é obtida assumindo um material perfeitamente plástico e faz uma distinção entre a rotura material e a rotura por instabilidade. Na futura EN 1996-1-1, com base em algumas simplificações dessa abordagem e em resultados experimentais recentes, foi incluída uma nova formulação. Os valores do fator de redução da capacidade a meia altura de uma parede, Φ_m , representados em função da esbelteza (razão entre a altura efetiva e a espessura, h_{ef}/t) e calculados utilizando as formulações da atual (EC6) e da futura (PT SC6.T1) EN 1996-1-1, são apresentados na Figura 5a para o caso com $E/f_k = 1000$, onde se observa que a nova proposta permite maior N_{rd} para pequenas excentricidades e, pelo contrário, é mais conservadora para grandes excentricidades.

O fator de redução Φ_m é para paredes sujeitas a carregamento principalmente vertical. Se a ação sísmica for tida em conta, é necessário considerar carregamento vertical e lateral combinado. Foram desenvolvidas diferentes abordagens para a estabilidade fora do plano de paredes de AS sujeitas a ações sísmicas, por exemplo, Griffith *et al.* [29]. Neste caso, o comportamento pós-fendilhação no mecanismo de flexão vertical fora do plano é dominado por grandes deslocamentos, onde os efeitos de segunda ordem desempenham um papel importante. Morandi *et al.* [30] propuseram, com base num estudo paramétrico que varia as características mecânicas e geométricas das paredes de AS numa gama ampla, um coeficiente

de redução de capacidade Φ_M para reduzir o momento resistente de primeira ordem.

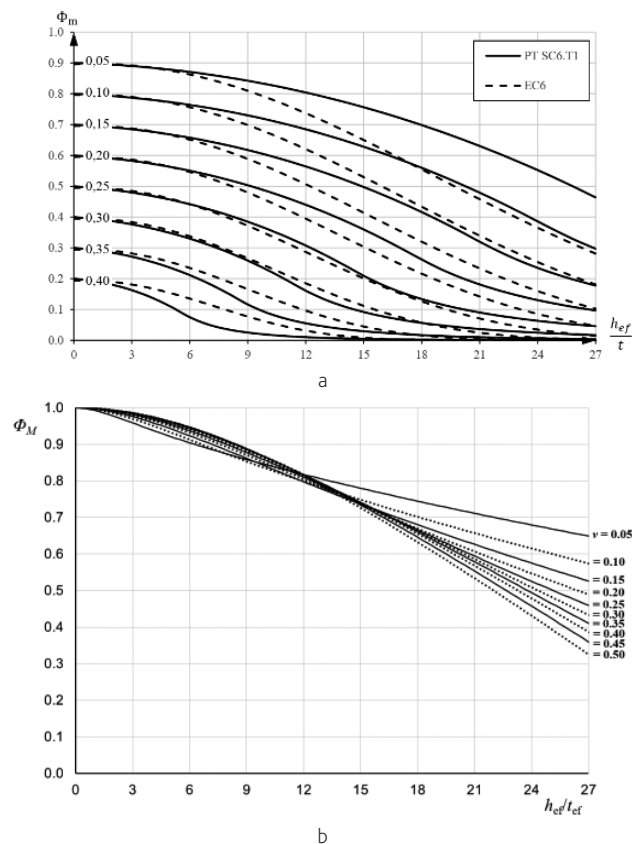


Figura 5 Φ versus h_{ef}/t para $E = 1000 f_k$, na atual (EC6) e futura (PT SC6.T1) EN 1996-1-1: (a) carregamento principalmente vertical e (b) carregamento vertical e lateral combinado

Esta última abordagem é adotada na futura EN 1996-1-1, onde foram introduzidos gráficos em que Φ_M é representado em função da esbelteza da parede (h_{ef}/t) para uma gama do rácio de carga axial $v (= N_{rd}/(A f_d))$, em que A é a área bruta da secção transversal horizontal da parede). O gráfico para o caso de $E/f_k = 1000$ é apresentado na Figura 5b. Pode-se observar que os efeitos de segunda ordem são particularmente evidentes para uma esbelteza superior a 12, enquanto a redução da capacidade pode ser de até 70%, em correspondência com o valor limite de h_{ef}/t igual a 27 para paredes de AS na EN 1996-1-1. Assim, quando o momento fletor atuante M_{ed} é calculado com base numa análise de primeira ordem, os efeitos de segunda ordem são tidos em conta através da definição do momento de resistência reduzido da parede, $\Phi_M M_{Rd}$.

4.3.2 Paredes de AA

A utilização de AA permite o dimensionamento de estruturas com esbeltezas mais elevadas. Alguns investigadores referem a inadequação do método na atual EN 1996-1-1 para considerar

os efeitos de segunda ordem no cálculo, por exemplo, no âmbito do projeto DISWall (<https://cordis.europa.eu/project/id/18120/reporting>, 2006-2008). De facto, de acordo com a atual norma, os membros de AA com uma esbelteza superior a 12 poderiam ser dimensionados de acordo com os princípios e regras de aplicação para AS. Neste caso, nem a sua maior resistência nem a sua capacidade de controlar o mecanismo de rotura, permitida pela presença de armaduras, são exploradas [26]. Quando a esbelteza é superior a 12, pode ser calculado um momento de cálculo adicional M_{ad} para ter em conta os efeitos de segunda ordem. Na atual EN 1996-1-1 é fornecida uma formulação direta para M_{ad} com base no método da curvatura nominal, em que se considera um valor fixo de curvatura ($1/r$) correspondente a uma rotura da secção em equilíbrio, ou seja, a alvenaria atinge a extensão de compressão última quando o aço atinge a sua extensão de cedência. Assim, a fórmula para o momento fletor de cálculo aplicado é a seguinte:

$$M_{Ed} = M_{1Ed} + M_{ad} = M_{1Ed} + N_{Ed} e_2 \quad (1)$$

em que M_{1Ed} é o valor de cálculo de primeira ordem do momento aplicado, N_{Ed} é o valor de cálculo da carga vertical e e_2 é a excentricidade de segunda ordem da carga vertical.

A forma como e_2 é calculada foi revista na futura EN 1996-1-1, pois que, uma análise de secção para paredes de AA confirma que os valores para ($1/r$) não são fixos, como indicado na atual norma, e são diferenciados para cada tipo de alvenaria de acordo com os valores de extensão no esmagamento [26]. Esta abordagem está harmonizada com a EN 1992-1-1 [4] para secções de BA. Além disso, a avaliação de secções de AA com uma esbelteza superior a 12 como se não fossem armadas, conforme prescrito na atual EN 1996-1-1, é muito conservadora face a investigações experimentais e numéricas (por exemplo, [22] e [31]).

Na futura EN 1996-1-1 é também incluída a possibilidade de obter ($1/r$) a partir de uma análise momento – curvatura ($M - 1/r$) mais geral da secção, permitindo assim uma avaliação mais precisa do comportamento real da secção sob os efeitos de segunda ordem. Neste caso, se M_{Rd} é o momento resistente da secção crítica (tipicamente na base) da parede no diagrama ($M - 1/r$), calculado para a carga axial de cálculo N_{Ed} , o momento de primeira ordem M_{1Ed} para essa secção, disponível para as ações de projeto, é a diferença máxima entre a ordenada M_{Rd} da curva ($M - 1/r$) e a ordenada de uma equação linear assumida que representa o efeito de segunda ordem [32], ver Figura 6.

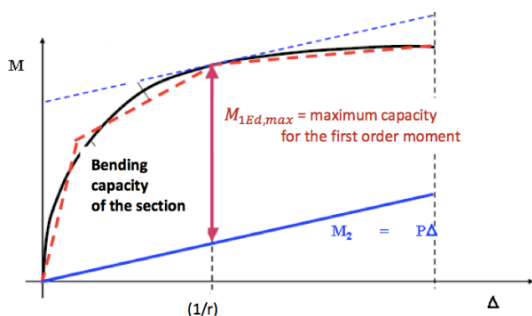


Figura 6 Diagrama momento – curvatura ($M - 1/r$) que ilustra a consideração dos efeitos de segunda ordem [32]

4.4 Alvenaria confinada

A AC tem limitada utilização na Europa. Nesta tipologia são utilizados elementos de confinamento verticais e horizontais, nomeadamente pilaretes e cintas, nos limites dos painéis de AS para conferir ductilidade e resistência adicional à tração, retardando assim a formação de fendas diagonais e contribuindo para a força lateral resistida pelo sistema de paredes. Apesar da AC ser já contemplada na atual EN 1996-1-1, as especificações para o dimensionamento dos membros de AC são demasiado gerais e/ou remetem para as cláusulas na norma para o cálculo de AS e/ou AA.

Existem muitos resultados de investigação e recomendações para suportar o projeto de estruturas de AC, particularmente nos países da América Latina, mas observa-se uma grande dispersão de regras, devido a contextos de construção muito diferentes, por exemplo [18] e [33]. Nas próximas subsecções apresentam-se as principais regras para projeto de AC na futura EN 1996-1-1, nomeadamente em termos da resistência a forças de corte e de flexão no plano.

4.4.1 Resistência ao corte

O mecanismo de rotura por corte de uma parede de AC é sobretudo caracterizado pela ação composta da alvenaria e dos elementos de confinamento, e pela fendilhação diagonal, com o mecanismo de rotura a envolver a alvenaria e os pilaretes, pelo que a sua resistência ao corte é a soma das duas contribuições (ver [33] e [34]). No entanto, a resistência máxima ao corte dos pilaretes de confinamento só pode ser atingida após fendilhação severa do painel de alvenaria. Desta forma, apenas parte da resistência dos pilaretes deve ser considerada para a resistência ao corte da parede. Uma abordagem conservadora consiste em assumir que os pilaretes estão integrados no painel de alvenaria, calculando assim uma área de secção transversal tendo em conta o comprimento total da parede [33]. Para esta condição, a hipótese de uma abordagem baseada no critério de Mohr-Coulomb para o cálculo da resistência ao corte da parede fornece uma estimativa adequada para fins de projeto ([33], [35] e [36]), dada por:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_d \quad (2)$$

em que f_{vk0} é a resistência característica inicial ao corte da alvenaria; e σ_d é a tensão de compressão de cálculo perpendicular ao corte no membro, no nível em consideração.

A resistência ao corte calculada com a Equação 2 (a mesma fórmula na atual EN 1996-1-1 para AS) versus a resistência ao corte experimental de paredes de AC, para um conjunto de dados recolhidos em [35], é representada na Figura 7, com um coeficiente R^2 igual a 0,83 que denota a sua precisão. Assim, a resistência ao corte de uma parede de AC na futura EN 1996-1-1 é calculada como se se tratasse de AS, mas considerando o comprimento total da parede para a definição da secção transversal.

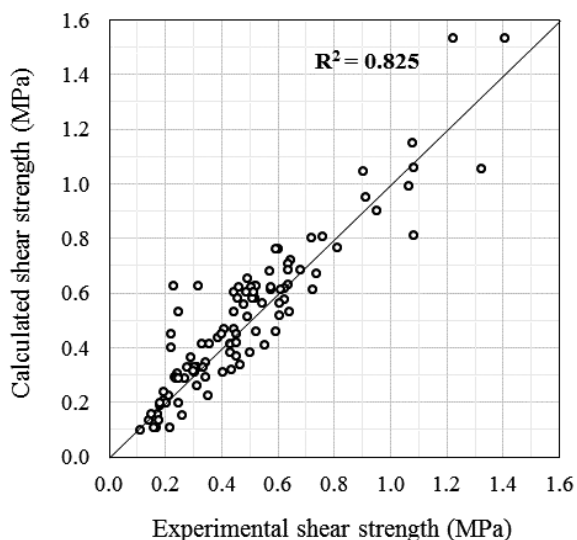


Figura 7 Resistência ao corte calculada versus experimental de paredes de AC [18]

4.4.2 Resistência à flexão

A rotura à flexão de paredes de AC não é um mecanismo comum de ocorrer, pelo que os estudos sobre o comportamento à flexão são limitados (por exemplo, [37] e [38]). De facto, para materiais de alvenaria com qualidade corrente, a rotura à flexão só deverá ser um problema para paredes esbeltas e com elementos de confinamento espaçados em intervalos relativamente curtos [21].

Na futura EN 1996-1-1 é considerada uma formulação para o momento resistente M_{Rd} baseada na teoria de flexão, adaptada de [21]. Assumindo a secção completa da parede constituída de um mesmo material, e uma distribuição retangular de tensões baseada na resistência à compressão de cálculo da alvenaria ou do betão, o que for menor, o equilíbrio de forças é conforme apresentado na Figura 8 e formulado nas Equações 3 e 4. Neste caso, assume-se a cedência do aço à tração e ignora-se a armadura à compressão.

$$N_{Ed} = F_c - F_s \Leftrightarrow x = \frac{N_{Ed} + A_s f_{yd}}{0,8 \eta_j f_d t} \quad (3)$$

$$M_{Rd,CM} = A_s f_{yd} (d - 0,4x) + N_{Ed} \left(\frac{L}{2} - 0,4x \right) \quad (4)$$

em que N_{Ed} é o valor de cálculo da carga vertical; F_c é a resultante das tensões de compressão na parede; F_s é a força de tração na armadura tensionada na cedência; x é a profundidade do eixo neutro na secção da parede; A_s é a área da armadura vertical, colocada simetricamente em ambas as extremidades; f_{yd} é a tensão de cedência de cálculo da armadura; f_d é a resistência à compressão de cálculo da alvenaria ou do betão, o que for menor; t é a espessura da parede; η_j é o fator que define o bloco retangular equivalente de tensões de compressão, assumido igual a 0,85; d é o comprimento útil da secção transversal da parede; L é o comprimento da parede; e σ_d é a tensão de compressão de cálculo na parede.

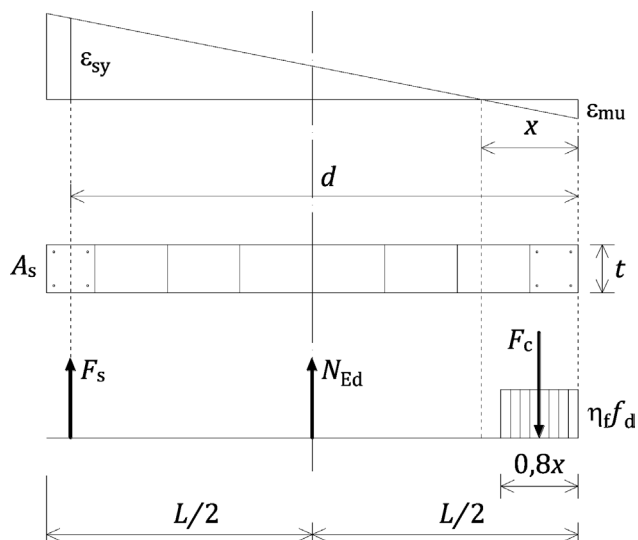


Figura 8 Distribuições de tensões e extensões assumidas para uma parede de AC em flexão

A formulação acima é similar ao cálculo para AA conforme na EN 1996-1-1, ver [39]. No entanto, com base nos resultados de um conjunto de ensaios selecionados na literatura, observa-se que o uso da Equação 4 evita uma sobrestimação significativa do momento resistente no plano obtido com a formulação para AA, face à resistência experimental [18]. Assim, uma vez que a Equação 4 fornece, em geral, uma estimativa da resistência à flexão do lado da segurança, a mesma foi adotada para AC na futura EN 1996-1-1. As formulações adotadas, bem como os requisitos de pormenorização da AC, são apresentados de forma detalhada em Marques e Lourenço [18].

5 Desenvolvimentos futuros e desafios para o meio técnico

A maioria das alterações e novas abordagens na futura EN 1996-1-1 basearam-se em estudos existentes na literatura, bem como na investigação e no conhecimento de todos os envolvidos na revisão da norma. Cada subtarefa identificada para a evolução da EN 1996-1-1 foi abordada, embora ainda sejam possíveis melhorias, particularmente no que respeita à facilidade de uso e à harmonização com outras normas.

Existem procedimentos na norma proposta que ainda são morosos e complexos, por exemplo, a verificação da resistência vertical de uma parede. Foram recebidas diversas propostas, de diferentes países, para serem implementadas na norma, as quais necessitam, no entanto, de ser validadas com base em resultados experimentais e em práticas estabelecidas.

A abordagem adotada para verificação dos estados limites de utilização é um dos aspetos que pode ser melhorado na EN 1996-1-1, uma vez que o procedimento atual se baseia em requisitos muito gerais. Embora a norma contenha prescrições relacionadas com a deformação e a fendilhação, não é possível efetuar uma análise aprofundada da prevenção da fendilhação nos estados limites de

utilização [40]. A EN 1996-1-1 inclui critérios de dimensionamento para controlo da resistência/deformação e juntas de dilatação, mas não inclui regras para limites de deformação, limites de tração e armaduras complementares. Uma referência interessante para a melhoria da norma neste tema é a normativa brasileira, nomeadamente a norma NBR 16868-1:2020 para projeto de alvenaria estrutural [41].

A harmonização das regras no Eurocódigo 6 com as disposições da EN 1998-1 [10] relativas à resistência sísmica pode ser melhorada, no sentido de estabelecer uma abordagem moderna de projeto baseada no desempenho. É também necessária alguma orientação para os profissionais na aplicação das regras de projeto, o que é exigido manuais complementares. Existem diversos documentos que podem auxiliar a aplicação do Eurocódigo 6, por exemplo disponíveis em [11]. As reações das partes interessadas à evolução da norma EN 1996 serão também um contributo importante para futuras revisões.

Nos países da UE, embora a maioria das partes dos Eurocódigos estejam publicadas na língua nacional, a aplicação da EN 1996-1-1 não é em geral obrigatória, uma vez que os regulamentos de projeto nacionais atuais ainda podem ser utilizados. No caso de Portugal, não existe regulamento nacional que permita o projeto de estruturas de alvenaria, uma vez que o Despacho Normativo n.º 21/2019 apenas considera projetos de estruturas de betão e de aço para edifícios.

A nível nacional, pelo facto de o projeto com alvenaria ser pouco disseminado no meio técnico, acresce que as soluções em termos de materiais e mão-de-obra qualificada são limitadas. Uma visão global da situação e potencial das alvenarias em Portugal perante o contexto internacional, nomeadamente com foco na possível introdução de conceitos de inovação no sector da construção, é apresentada em [42].

Agradecimentos

A síntese aqui apresentada baseia-se no trabalho para a tarefa SC6.T1 “Masonry - Revised version of EN 1996-1-1”, no âmbito do Mandato da CE “M/515 phase 1 tasks for the development of the 2nd generation of EN Eurocodes”, coordenado pelo NEN. Agradece-se a colaboração dos outros membros do PT nos trabalhos para a SC6.T1: Denis Camilleri, Francesca da Porto, John Roberts, Poul Dupont Christiansen, Wolfram Jäger. Reconhece-se em especial o suporte do Presidente do TC 250/SC 6, Rob van der Pluijm, e do Coordenador do TC 250/SC 6/WG 1, Barry Haseltine.

Agradecem-se também os comentários e sugestões dos membros dos comités nacionais e dos *mirror committees* do CEN para a EN 1996-1-1, que constituíram a base para a maioria das alterações e melhorias na norma.

Este trabalho foi em parte financiado pela FCT / MECI por fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE) com a referência UIDB / 04029/2020 (doi.org/10.54499/UIDB/04029/2020), e no âmbito do Laboratório Associado de Produção Avançada e Sistemas Inteligentes (ARISE) com a referência LA/P/0112/2020.

Referências

- [1] CEN – EN 1996-1-1:2005 – Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, 2005, Brussels.
- [2] Anwar, N.; Htut-Aung, T.; Najam, F. – “From prescription to resilience: Innovations in seismic design philosophy”, *Technology*, December 2016, p. 9-13.
- [3] van der Pluijm, R. – “Eurocode 6, Design of masonry structures”, personal communication in the workshop *Dissemination of information for training*, 2-3 April 2009, Brussels.
- [4] CEN – EN 1996-1-1:2022 – Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, 2022, Brussels.
- [5] CEN – EN 1992-1-1:2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, 2004, Brussels.
- [6] CEN – EN 1996-1-2:2006 – Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. European Committee for Standardization, 2006, Brussels.
- [7] CEN – EN 1996-2:2006 – Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 2: Design considerations, selection of materials and execution of masonry. European Committee for Standardization, 2006, Brussels.
- [8] CEN – EN 1996-3:2006 – Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 3: Simplified calculation methods for unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, 2006, Brussels.
- [9] Athanasopoulou et al. – *The implementation of the Eurocodes in the National Regulatory Framework*. Publications Office of the European Union, 2019, Luxembourg.
- [10] CEN – EN 1998-1:2004 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, 2004, Brussels.
- [11] Roberts, J. – Eurocode6.org, web site Eurocode 6: Design of Masonry Structures. Prof. John Roberts, London. URL: <https://www.eurocode6.org>
- [12] Fardis, M. – “Towards a second generation of European Standards on Eurocodes”, personal communication in the *4th EU Standardization Summit How standardization can support the transition to a cleaner and smarter economy*, 4 June 2015, Riga.
- [13] Graubner, C.A.; Koob, B. – “Analysis and comparison of the NDPs of various national annexes of Eurocode 6”, *Mauerwerk*, 2015, 19(6), p. 427-440. DOI: 10.1002/dama.201500681
- [14] Briceño, C.; Azenha, M.; Lourenço, P.B. – Systematic Report: Current situation of the influence of masonry mortar in the Eurocode 6 Part 1-1, Report 2019-DEC/E-15, University of Minho, 2019, Guimarães.
- [15] CEN – EN 772-1:2011 – Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength. European Committee for Standardization, 2011, Brussels.
- [16] Mann, W.; Muller, H. – “Failure of shear-stressed masonry - An enlarged theory, tests and application to shear walls” in *Proceedings of the British Ceramic Society*, 1982, Vol. 30, p. 223-235.
- [17] Jäger, W.; Schöpes, P. – D9.1 Proposals for an advanced design model of masonry under lateral loads for the implementation in Eurocode 6-1-1, ESECMaSE project, Deliverable 9.1, Technical University of Dresden, 2008.
- [18] Marques, R.; Lourenço, P.B. – “Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals”, *Construction and*

- Building Materials*, 2019, 217, p. 137-155.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.266
- [19] Mojsilović, N. – “Masonry elements with damp-proof course membrane: Assessment of shear strength parameters”, *Construction and Building Materials*, 2012, 35, p. 1002-1012.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.033
- [20] Martens, D.; Bertram, G. – “Shear strength of clay brick masonry including damp proof course” in *Proceedings of the 14th International Brick and Block Masonry Conference*, 2008, Sydney.
- [21] Tomažević, M. – *Earthquake-resistant design of masonry buildings*, Series on Innovation in Structures and Construction, Imperial College Press, 1999, London.
- [22] da Porto, F.; Mosele, F.; Modena, C. – “Cyclic out-of-plane behaviour of tall reinforced masonry walls under P-Δ effects”, *Engineering Structures*, 2011, 33(2), p. 287-297. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.10.004
- [23] Griffith *et al.* – “Cyclic testing of unreinforced masonry walls in two-way bending”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2007, 36(6), p. 801-821. DOI: 10.1002/eqe.654
- [24] van der Pluijm, R. – *Out-of-plane bending of masonry: behaviour and strength*, PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 1999, Eindhoven.
- [25] DIN – EN 1996-1-1/NA, National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. German Institute for Standardization, 2012, Berlin.
- [26] Donà, M.; Tecchio, G.; da Porto, F. – “Verification of second-order effects in slender reinforced masonry walls”, *Materials and Structures*, 2018, 51, p. 69. DOI: 10.1617/s11527-018-1196-x
- [27] Bakeer, T.; Jäger, W. – “Buckling of reinforced and unreinforced masonry walls - A unified solution for Eurocode 6” in *Proceedings of the 13th Canadian Masonry Symposium*, 2017, Halifax.
- [28] Bakeer, T. – “Empirical estimation of the load bearing capacity of masonry walls under buckling - Critical remarks and a new proposal for the Eurocode 6”, *Construction and Building Materials*, 2016, 113, p. 376-394. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.063
- [29] Griffith *et al.* – “Experimental investigation of URM walls in flexure”, *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(3), p. 423-432.
DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(423)
- [30] Morandi, P.; Magenes, G.; Griffith, M. – “Second order effects in out-of-plane strength of unreinforced masonry walls subjected to bending and compression”, *Australian Journal of Structural Engineering*, 2008, 8(2), p. 133-144. DOI: 10.1080/13287982.2008.11464993
- [31] Ferracuti, B.; Bacci, L.; Savoia, M. – “Out-of-plane behavior of slender reinforced masonry walls for tall single storey buildings: Design procedure” in *Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference*, 2016, Padua.
- [32] Donà, M.; Tecchio, G.; da Porto, F. – Report on II order effects in reinforced masonry walls, Università degli Studi di Padova, 2016, Padua.
- [33] Meli, R. *et al.* – *Seismic design guide for low-rise confined masonry buildings*, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2011, Oakland CA.
- [34] San Bartolomé, A.; Bernardo, J.; Peña, M. – “The effect of column depth on seismic behavior of confined masonry walls” in *Proceedings of the Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, 2010, Valdivia-Santiago.
- [35] Marques, R.; Lourenço, P.B. – “A model for pushover analysis of confined masonry structures: implementation and validation”. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2013, 11(6), p. 2133-2150.
DOI: 10.1007/s10518-013-9497-5
- [36] Pérez-Gavilán, J.J.; Flores, L.E.; Alcocer, S.M. – “An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratios”, *Earthquake Spectra*, 2015, 31(2), p. 945-968. DOI: 10.1193/090712EQS284M
- [37] Varela-Rivera *et al.* – “Flexural behavior of confined masonry walls subjected to in-plane lateral loads”, *Earthquake Spectra*, 2019, 35(1), p. 405-422. DOI: 10.1193/112017EQS239M
- [38] Bustos, J.L. *et al.* – “Estudio del comportamiento dinámico de un modelo de mampostería encadenada mediante un ensayo en mesa vibratoria” en *Anales de las XXIX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, 2000, Punta del Este, Uruguay.
- [39] da Porto, F.; Mosele, F.; Modena, C. – “In-plane cyclic behaviour of a new reinforced masonry system: Experimental results”, *Engineering Structures*, 2011, 33(9), p. 2584-2596.
DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.05.003
- [40] Sousa, H. *et al.* – *Defects in masonry walls, Guidance on cracking: Identification, prevention and repair*. CIB Commission W023 - Wall Structures, 2015, Rotterdam.
- [41] ABNT – NBR 16868-1:2020, Alvenaria estrutural - Parte 1: Projeto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020, São Paulo.
- [42] Marques, R. – “Situação e potencial das alvenarias em Portugal perante o contexto internacional” em *Atas do Congresso Construção*, Guimarães, 2022, p. 368-376.



2.^a geração do Eurocódigo 7 – Projeto geotécnico

2nd generation of Eurocode 7 – Geotechnical design

Laura Caldeira
Luís Lamas

Resumo

Este artigo aborda a organização da segunda geração do Eurocódigo 7, destacando as principais alterações das Partes 1 e 2 do EN 1997. Inicia-se com uma visão geral da estrutura do Eurocódigo 7, seguindo-se uma análise dos aspetos mais relevantes da EN 1990 com reflexo neste Eurocódigo. Posteriormente, indicam-se os novos aspetos mais relevantes incluídos na Parte 1 da EN 1997, abordando-se as classes de complexidade geotécnica, as categorias geotécnicas, a utilização de modelos numéricos e a forma de consideração das pressões intersticiais da água no dimensionamento geotécnico. Resumem-se, também, os principais conteúdos da Parte 2 e conclui-se com os aspetos inovadores relativos à Mecânica das Rochas.


Abstract

This article addresses the organization of the second generation of Eurocode 7, highlighting the main changes to Parts 1 and 2 of EN 1997. It begins with an overview of the structure of Eurocode 7, followed by an analysis of the most relevant aspects of the EN 1990 reflected in this Eurocode. Subsequently, the most relevant new aspects included in Part 1 of EN 1997 are discussed, addressing geotechnical complexity classes, geotechnical categories, the use of numerical models and how pore water pressures are considered in geotechnical design. The main contents of Part 2 are also summarized. The article concludes with the innovative aspects relating to Rock Mechanics.


Palavras-chave: Projeto geotécnico / Mecânica das rochas / Categorias geotécnicas / Modelos numéricos / Modelo do terreno

Keywords: Geotechnical design / Rock mechanics / Geotechnical categories / Numerical modelling / Ground model

Laura Caldeira

Presidente da SC 07 da CT 115
Investigadora-Coordenadora
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0002-9164-2118
laurac@lnec.pt

Luís Lamas

Membro da SC 07 da CT 115
Investigador-Coordenador
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0001-9438-9288
llamas@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CALDEIRA, L. [et al.] – 2.ª geração do Eurocódigo 7 – Projeto geotécnico. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 91-98. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-010>

1 Introdução

Os principais objetivos a atingir com a evolução dos Eurocódigos foram a incorporação de áreas ainda não contempladas de forma abrangente na primeira geração, a revisão das existentes de modo a refletir o estado da arte do projeto de engenharia através da introdução de novos tópicos e desenvolvimentos, a simplificação do seu articulado de modo a facilitar a sua utilização e a harmonização entre as suas diversas partes e globalmente. Este esforço de harmonização incluiu, também, a redução do número de parâmetros de determinação nacional (NDP, *Nationally Determined Parameters*).

Em particular, o Eurocódigo 7 (EN 1997) [1], [2], relativo ao projeto geotécnico, foi reformulado de modo a garantir a sua consistência com os outros Eurocódigos e, em particular com a EN 1990 [3], [4], que contém as bases para o projeto estrutural e geotécnico, a dar indicações sobre a seleção de valores característicos dos parâmetros geotécnicos e das pressões da água, bem como sobre a utilização de métodos numéricos no dimensionamento geotécnico, e a abranger a mecânica das rochas de forma equivalente à mecânica dos solos e o comportamento dinâmico das estruturas geotécnicas.

Complementarmente, a secção da 1.ª geração da EN 1997 [1], [2], intitulada “*Bases do projeto geotécnico*” foi transferida para a EN 1990 de 2024, bem como as definições associadas ao terreno e às estruturas geotécnicas (Figura 1). Por outro lado, foram eliminadas as abordagens de cálculo da EN 1997 [1], sendo proposto na EN 1990 [3], [4] um processo de verificação dos estados limite aplicável a qualquer verificação de segurança. Foi, também, introduzido o conceito de valor de cálculo de resistência baseado na aplicação de coeficientes parciais à resistência dos materiais ou à resistência dos elementos estruturais.

Apresenta-se, seguidamente, a organização da segunda geração da EN 1997 [5], [6], [7], a evolução e principais alterações gerais na EN 1997 e, por fim, a evolução e principais aspetos mais relevantes da EN 1990 [8], [9], [10] com reflexo na EN 1997, e as principais alterações das Partes 1 [5] e 2 [6] do Eurocódigo 7. A Parte 3 [7] deste Eurocódigo será objeto de um artigo complementar.

2 Organização do Eurocódigo 7

Esta geração do código foi organizada em 3 partes:

- Parte 1 – Regras gerais;
- Parte 2 – Propriedades do terreno;
- Parte 3 – Estruturas geotécnicas.

A Parte 1 [5] inclui as regras gerais que afetam todo o projeto geotécnico e os aspetos comuns a todas as estruturas geotécnicas tratadas na Parte 3 [7]. A Parte 2 [6] aborda os temas relativos a métodos de caracterização laboratorial e in situ do terreno visando a obtenção das propriedades com interesse para o dimensionamento, bem como os modelos geológicos e geotécnicos. A Parte 3 aborda as estruturas geotécnicas mais relevantes.

Os Quadros 1 a 3 apresentam as secções de cada uma das partes deste Eurocódigo e os seus anexos. Os conteúdos das secções existentes na anterior geração da EN 1997 foram extensamente alterados e melhorados, bem como harmonizados com o previsto na EN 1990 [3], [4].

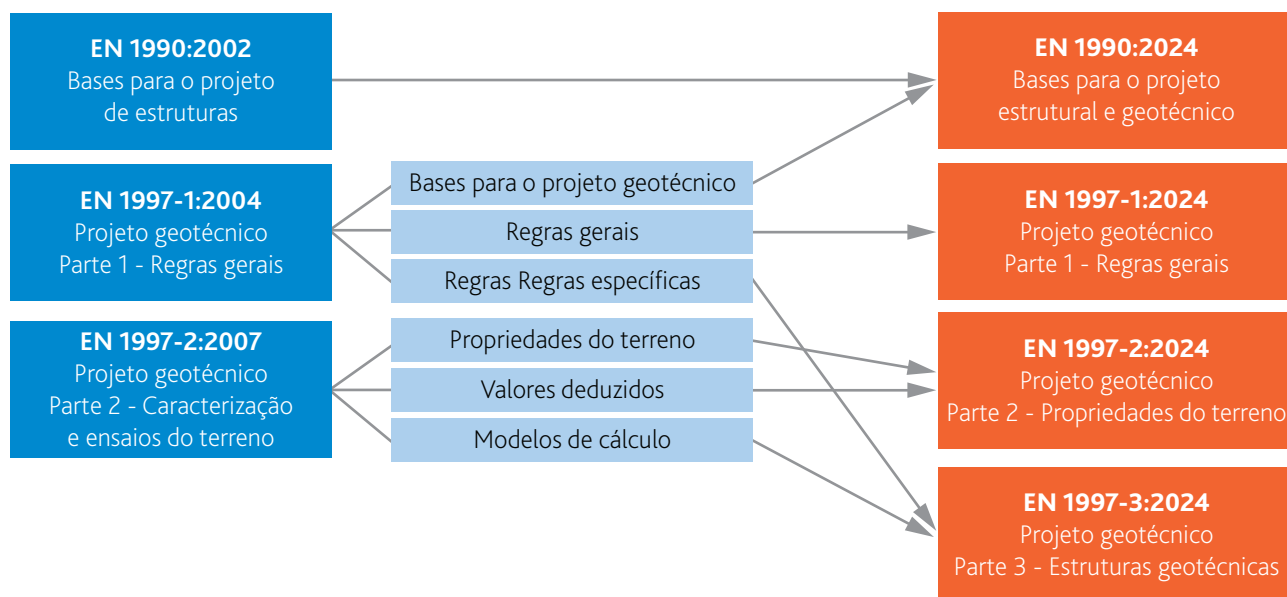


Figura 1 Organização da segunda geração do Eurocódigo 7 e sua relação com a EN 1990 e a EN 1997 de primeira geração

Quadro 1 Secções e anexos da Parte 1 da EN 1997 da 2.ª geração [5]

Secções	Anexos (informativos)
1. Campo de aplicação	A. Procedimento para determinação dos valores característicos
2. Referências normativas	B. Conteúdo dos relatórios
3. Termos, definições e símbolos	C. Orientações sobre a seleção da Classe de Complexidade Geotécnica
4. Bases de projeto	
5. Materiais	
6. Água do terreno	
7. Análise geotécnica	
8. Estados limite últimos	
9. Estados limite de utilização	
10. Implementação do projeto	
11. Ensaios	
12. Relatórios	

Quadro 2 Secções e anexos da Parte 2 da EN 1997 da 2.ª geração [6]

Secções	Anexos (informativos)
1. Campo de aplicação	A. Relatório de caracterização no terreno
2. Referências normativas	B. Adequação e aplicabilidade dos métodos de ensaio
3. Termos, definições e símbolos	C. Estudo documental e inspeção do local
4. Modelo do terreno e valores deduzidos	D. Informações a obter a partir da caracterização do terreno
5. Caracterização do terreno	E. Métodos de determinação da densidade relativo e das propriedades de resistência
6. Descrição e classificação do terreno	F. Métodos de determinação da rigidez e das propriedades de consolidação dos solos
7. Propriedades de estado, físicas e químicas	G. Métodos indiretos para a determinação das propriedades cíclicas, dinâmicas e sísmicas dos solos
8. Resistência	H. Espaçamento e número de locais de caracterização
9. Rigidez, compressibilidade e consolidação	
10. Propriedades cíclicas, dinâmicas e sísmicas	
11. Propriedades da água do terreno e geohidráulicas	
12. Propriedades térmicas do terreno	
13. Relatórios	

Quadro 3 Secções e anexos da Parte 3 da EN 1997 da 2.ª geração [7]

Secções	Anexos (informativos)
1. Campo de aplicação	A. Taludes, escavações e aterros
2. Referências normativas	B. Fundações superficiais
3. Termos, definições e símbolos	C. Fundações por estacas
4. Taludes, escavações e aterros	D. Estruturas de suporte
5. Fundações superficiais	E. Ancoragens
6. Fundações por estacas	F. Estruturas de aterro reforçadas
7. Estruturas de suporte	G. Estruturas pregadas em solos
8. Ancoragens	H. Pregagens e suporte na superfície de maciços rochosos
9. Estruturas de aterro reforçadas	I. Melhoramento do terreno
10. Estruturas pregadas em solos	J. Medidas de controlo da água do terreno
11. Pregagens e suporte na superfície de maciços rochosos	K. Projeto de geoestruturas termoativas
12. Melhoramento do terreno	
13. Medidas de controlo da água do terreno	

Na Parte 3 [7] são abordados novos temas, como os grupos de estacas e os ensoleiramentos em estacas, as estruturas de aterro reforçadas, as estruturas pregadas em solos, as pregagens e os suportes na superfície em maciços rochosos, o melhoramento de terreno através de colunas de brita ou de areia, injeções, *deep mixing*, inclusões rígidas e medidas de controlo da água do terreno.

O dimensionamento de túneis e de outras estruturas subterrâneas não é abrangido pela EN 1997, tendo sido, no entanto, constituído um grupo *ad hoc* para a preparação de um projeto com uma proposta de conteúdos para especificações técnicas ou novas partes ou secções em coordenação com as subcomissões existentes da CEN TC 250.

3 Aspectos mais relevantes da EN 1990 com reflexo na EN 1997

O Eurocódigo 7 [1] foi desenvolvido de forma a garantir a conformidade das principais definições com aquelas presentes na EN 1990 [8], [9], [10], que estabelece a filosofia geral dos Eurocódigos, em particular no que diz respeito à garantia de fiabilidade, a qual é função das classes de consequências, das classes de complexidade geotécnica e das categorias geotécnicas.

Na EN 1990 foram definidos 4 casos de verificação (VC1 a VC4) para os diferentes estados limite últimos (ELU) que envolvam a rotura do terreno. O VC1 é utilizado principalmente para a verificação da resistência estrutural, mas também é utilizado no dimensionamento geotécnico. No VC2, a recorrer para a verificação do equilíbrio estático ou do levantamento global, os coeficientes parciais das ações podem ser aplicados às ações permanentes e variáveis, ou apenas às ações variáveis. O VC3 e o VC4 são utilizados no dimensionamento geotécnico e factorizam, respetivamente, as ações variáveis desfavoráveis (VC3) ou o efeito das ações (VC4).

A verificação dos ELU é realizada por aplicação do método dos coeficientes parciais e comparando, como na 1.ª geração, o valor de cálculo dos efeitos das ações com o valor de cálculo das resistências, exceto para ELU relativos a deformação excessiva. Para a determinação do valor de cálculo dos efeitos das ações, os

coeficientes parciais respetivos podem ser aplicados às ações ou aos efeitos das ações. Para a determinação do valor de cálculo das resistências, os coeficientes parciais são aplicados aos valores característicos das propriedades dos materiais (abordagem com factorização dos materiais, MFA) ou diretamente às resistências (abordagem com factorização das resistências, RFA).

Na segunda geração, a EN 1990 [3], [4] define quatro classes de consequências, CC1, de baixas consequências, a CC4, a classe de consequências mais elevada relacionada com obras de risco excepcional não totalmente abrangidas pelos Eurocódigos, sendo necessário considerar requisitos adicionais. São incluídos exemplos de estruturas geotécnicas de cada uma das classes, os quais podem ser redefinidos a nível nacional, dado tratarem-se de NDP. Na classe CC4 foram classificadas as infraestruturas críticas, as estruturas geotécnicas cuja integridade é de vital importância para a Proteção Civil, e áreas com significativo risco de deslizamento. São exemplos de estruturas geotécnicas da classe CC3 (descrita como de consequências elevadas) as estruturas de suporte e fundações de edifícios públicos de grande exposição, os taludes, escavações e estruturas de suporte de grande exposição, os grandes aterros rodo e ferroviários e as fundações de pontes fundamentais para o socorro em situações de emergência, as estruturas geotécnicas que asseguram a navegação em portos e construções subterrâneas com grande ocupação. As consequências associadas à classe CC2 são descritas como normais.

A classificação das consequências de rotura afeta os valores dos coeficientes parciais associados à verificação dos EL através da introdução de coeficientes de consequência, k_F , aplicado às ações, k_M , aplicado às propriedades dos materiais, e k_R aplicado às resistências, bem como os requisitos relativos ao controlo da qualidade.

4 Evolução e principais alterações na Parte 1 da EN 1997

4.1 Classes de Complexidade Geotécnica

Para ter em conta as condições do terreno e os seus efeitos nos parâmetros de dimensionamento, a Parte 1 do EN 1997 [5] introduziu

Quadro 4 Seleção das Classes de Complexidade Geotécnica

Classe de Complexidade Geotécnica	Complexidade	Descrição
GCC 3	Elevada	Incerteza considerável das condições do terreno, ou condições do terreno muito variáveis ou difíceis, ou significativa sensibilidade às condições da água no terreno ou à superfície, ou complexidade significativa da interação terreno-estrutura
GCC 2	Normal	Quando as condições indicadas para as classes GCC3 e GCC1 não são aplicáveis
GCC 1	Baixa	Incerteza insignificante das condições do terreno e condições do terreno uniformes e reduzida sensibilidade às condições da água no terreno ou à superfície e reduzida complexidade da interação terreno-estrutura

as Classes de Complexidade Geotécnica (GCC) baseadas no Modelo do Terreno, a ser desenvolvido de acordo com a Parte 2 da EN 1997 [6], que constam do Quadro 4. Estas classes podem ser redefinidas a nível nacional.

4.2 Categorias Geotécnicas

As estruturas geotécnicas são classificadas em Categorias Geotécnicas (GC), as quais combinam as Classes de Complexidade Geotécnica (GCC) com as Classes de Consequências (CC) de acordo com o Quadro 5. Este quadro pode ser alterado a nível nacional ou proposto um sistema alternativo de atribuição da Categoria Geotécnica da estrutura.

A Categoria Geotécnica não afeta diretamente o valor dos coeficientes parciais, mas reflete-se em vários aspetos do processo de dimensionamento, por forma a garantir que os níveis de fiabilidade requeridos pela EN 1990 são atingidos, sendo usada para especificar o âmbito e os níveis mínimos das seguintes medidas: i) medidas para atingir uma representação apropriada dos parâmetros para o dimensionamento; ii) medidas para obter a adequação dos modelos de cálculo utilizados e da interpretação dos seus resultados; iii) medidas para prevenir erros no dimensionamento e na execução, e erros humanos grosseiros; iv) medidas para obter uma adequada implementação do projeto, de acordo com procedimentos nele especificados.

Quadro 5 Categorias Geotécnicas

Classes de Consequências	Classes de complexidade geotécnica		
	GCC1	GCC 2	GCC 3
CC3	GC2	GC3	GC3
CC2	GC2	GC2	GC3
CC1	GC1	GC2	GC2

4.3 Dimensionamento geotécnico

O processo de dimensionamento, de acordo com as novas gerações da EN 1990 e da EN 1997, implica:

- a atribuição de uma Categoria Geotécnica à estrutura com vista à seleção dos requisitos de projeto e de construção aplicáveis;

- o estabelecimento do modelo do terreno, a partir das condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas do local determinadas a partir de prospeção geotécnica realizada para o efeito;
- o dimensionamento, garantindo que nenhum estado limite é excedido em qualquer das situações de projeto passíveis de ocorrer durante a vida útil da estrutura;
- o desenvolvimento de planos de inspeção, de observação e de manutenção, durante a execução e o período de vida útil da obra, e, quando aplicado o Método Observacional, a conceção de ações de contingência.

4.4 Utilização de modelos numéricos

A segunda geração da Parte 1 da EN 1997 apresenta uma nova subsecção relativa à utilização de métodos numéricos na verificação dos ELU em estruturas geotécnicas, na qual se recomenda a realização simultânea de duas análises numéricas:

- a primeira mediante a aplicação de coeficientes parciais aos dados de entrada dos modelos numéricos, designadamente às ações (γ_f relativo ao VC3, com valores unitários para as ações permanentes) e às propriedades dos materiais (conjunto M2);
- a segunda com os valores representativos das propriedades dos materiais (coeficientes parciais unitários - conjunto M1), o valor representativo da ação dominante (em geral, o peso próprio) e os valores representativos das ações variáveis afetados pela razão entre os coeficientes parciais previstos para estas ações no VC1 ($\gamma_{Q,1}/\gamma_{G,1}$) (como previsto no VC4); aos resultados das análises numéricas relativos aos elementos estruturais serão aplicados os coeficientes parciais relativos aos efeitos das ações (γ_E relativo ao VC4).

O dimensionamento será realizado com base nos resultados mais desfavoráveis destas duas análises numéricas. Em geral, os estados limite associados à rotura do terreno são condicionados pela primeira análise e os associados à rotura dos elementos estruturais pela segunda análise.

Em alternativa, admite-se nesta norma a realização de apenas uma análise numérica com os valores representativos das ações e das propriedades dos materiais, aplicando os coeficientes parciais aos efeitos das ações correspondentes ao VC4 e os coeficientes parciais de resistência previstos na Parte 3 da EN 1997 para as diferentes estruturas geotécnicas.

Indica-se, complementarmente, que a verificação explícita de mecanismos específicos de rotura (como o deslizamento, o derrubamento, a estabilidade global e a insuficiência de capacidade resistente ao carregamento) pode ser omitida sempre que sejam usados modelos numéricos que implicitamente determinem o mecanismo de rotura mais crítico. Para verificação de que os valores de cálculo da resistência do terreno não são excedidos recomenda-se a utilização nas análises numéricas de procedimentos de redução da resistência. As resistências geotécnicas podem ser calculadas através de modelos numéricos que obriguem as estruturas a romperem através de mecanismos particulares.

4.5 Água no terreno

As ações da água do terreno e as respetivas pressões intersticiais são calculadas a partir da posição do nível da água acima do terreno, do nível da água no terreno ou de níveis piezométricos, os quais devem ser estabelecidos para cada situação de projeto. Em geral, os níveis da água no terreno variam ao longo do tempo, pelo que é difícil escolher o nível da água adequado para cada uma das situações de projeto relevantes.

A segunda geração da Parte 1 da EN 1997, para ultrapassar estas dificuldades, define os valores representativos das pressões intersticiais da água no terreno com base em probabilidades anuais de excedência, quando existem dados suficientes para a sua determinação, ou através de estimativas cautelosas dos valores mais adversos passíveis de ocorrer para a situação de projeto considerada.

Os valores representativos das pressões intersticiais podem ser definidos por um valor permanente (sendo proposta uma probabilidade anual de excedência de 2%, ou seja, com período de retorno de 50 anos, mas podendo ser alterada a nível nacional), ou por uma combinação de um valor permanente igual ao valor médio das pressões intersticiais e de um valor variável representativo da variação da pressão intersticial em torno do valor médio. Para a parcela variável da pressão intersticial são definidos valores característicos, de combinação, frequentes e quasi-permanentes associados a diferentes períodos de retorno.

Os valores de cálculo das pressões intersticiais da água são determinados por avaliação direta (valor nominal), por aplicação de um desvio ao valor representativo ou aplicando um coeficiente parcial ao valor representativo das pressões intersticiais ou aos seus efeitos. Os dois primeiros métodos de avaliação são, em geral, adequados para a avaliação das pressões efetivas no cálculo da resistência ao corte do terreno e o terceiro método para o cálculo dos esforços em elementos estruturais.

Em consequência destas novas definições, a verificação dos ELU de levantamento global e de levantamento hidráulico foram objeto de novas formulações nesta segunda geração da EN 1997.

5 Evolução e principais alterações na Parte 2 da EN 1997

A primeira geração da Parte 2 da EN 1997, intitulada "Caracterização e Ensaio do Terreno" [2], estava organizada em termos de ensaios e prospeção geotécnica e conflituava com o desenvolvimento de

normas específicas realizado no âmbito do CEN e da ISO, não sendo, por isso, muito utilizada no dimensionamento geotécnico.

A nova versão desta parte, intitulada "Propriedades do Terreno" vai ao encontro do pretendido pelos projetistas, tendo a sua estrutura e os seus conteúdos sido completamente alterados. O principal resultado da caracterização do terreno é a definição do Modelo do Terreno, o qual contém as condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas, e inclui os valores deduzidos das propriedades do terreno para todas as unidades geotécnicas presentes na zona de influência da estrutura e necessárias para a conceção do projeto e o seu dimensionamento.

A extensão mínima desta caracterização depende da Categoria Geotécnica (CG) da estrutura, podendo ser reduzida ao estudo de gabinete e à inspeção do local para estruturas da CG1, mas sendo necessária elaboração de um programa específico de caracterização geotécnica, que contemple ensaios de campo e de laboratório, para estruturas das CG2 e CG3.

O desenvolvimento do Modelo do Terreno inicia-se com um estudo de gabinete da informação previamente disponível sobre a geologia do local, a sismicidade, os mapas de risco de cheias e de deslizamento, e em relatórios existentes sobre o local. Prossegue-se com uma inspeção ao local para identificação dos riscos e para a conceção de um programa de prospeção preliminar a realizar na zona de influência.

Posteriormente, este modelo é progressivamente enriquecido com os resultados da caracterização geotécnica e dos ensaios do programa preliminar, permitindo a definição das unidades geotécnicas e do regime da água do terreno, a avaliação preliminar das propriedades do terreno mais relevantes e uma primeira estimativa dos valores deduzidos destas propriedades.

No final, o Modelo do Terreno, conterá os resultados dos ensaios de laboratório e de campo e de observação do programa de prospeção mais completo desenvolvido na fase de projeto, bem como os valores deduzidos de todas as propriedades relevantes das unidades geotécnicas reconhecidas na zona de influência e a variabilidade e a incerteza das condições e propriedades geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas.

Desta parte da EN 1997 consta, ainda, um conjunto de orientações para o planeamento destas atividades (como o número, posição e espaçamento dos locais de prospeção, amostragem e número de ensaios de laboratório), bem como de técnicas a utilizar nesta caracterização geotécnica, relativas a sondagens, a ensaios de campo e de laboratório, e a instrumentação.

Todos os resultados utilizados para o desenvolvimento deste Modelo do Terreno devem constar do Relatório de Caracterização do Terreno (Ground Investigation Report - GIR), o qual pode incluir textos, esquemas, mapas, planos, secções, modelos tridimensionais, modelos digitais e folhas de cálculo, entre outros. Este relatório permitirá ao projetista desenvolver os Modelos do Projeto Geotécnico necessários para cada uma das situações de projeto, com as combinações das ações, os estados limite relevantes associados e os valores representativos das propriedades do terreno, bem como a sua variação espacial, para todas as unidades geotécnicas presentes na zona de influência, tal como previsto na 2.ª geração da Parte 1 da EN 1997.

6 Aspectos inovadores relativos à Mecânica das Rochas

Embora o projeto de estruturas geotécnicas em maciços rochosos estivesse incluído no campo de aplicação do Eurocódigo 7 da primeira geração, não tinha o tratamento necessário para a sua efetiva aplicação. Por essa razão, um dos objetivos da revisão do Eurocódigo 7 consistiu na melhoria dos conteúdos relativos à sua aplicação a problemas de engenharia das rochas, de modo a serem abordados de forma equivalente aos problemas em solos.

Assim, os conteúdos do Eurocódigo 7 da segunda geração, relativos a engenharia das rochas, foram consideravelmente revistos e aumentados, nomeadamente nos seguintes aspetos:

- definições corretas de rocha, maciços rochosos e descontinuidades, bem como a consideração da natureza descontínua dos maciços rochosos;
- reconhecimento de que:
 - as propriedades geométricas dos maciços rochosos (por exemplo, o espaçamento e a orientação das descontinuidades) podem ser consideradas de forma probabilística;
 - nos maciços rochosos, as propriedades do terreno devem considerar as propriedades geométricas das descontinuidades quando estas afetam o comportamento do terreno;
 - podem ser utilizados métodos baseados na fiabilidade em situações de projeto não abrangidas pelo método dos coeficientes parciais, devido à natureza específica das ações e dos cenários de projeto, bem como em condições do terreno, como é o caso dos maciços rochosos, fortemente afetadas por descontinuidades e por propriedades geométricas;
 - as abordagens informadas sobre o risco podem ser aplicadas em situações de projeto em que as incertezas ou as consequências estão para além dos limites comuns;
- utilização de sistemas de classificação para determinar parâmetros de resistência e de deformabilidade de maciços rochosos;
- propriedades de estado, físicas e químicas relevantes para as rochas, incluindo ensaios laboratoriais e de campo, bem como as respetivas normas de ensaio;
- relevância do estado de tensão *in situ* em maciços rochosos e métodos para a sua determinação;
- critérios de rotura específicos para rochas, maciços rochosos e descontinuidades, como os de *Hoek-Brown* e *Barton-Bandis*, bem como de metodologias para determinação dos seus parâmetros;
- consideração da anisotropia da resistência do material rochoso;
- aspetos específicos da deformabilidade das rochas e dos maciços rochosos;
- mecanismos de rotura relevantes para maciços os rochosos, nomeadamente os aplicáveis ao derrubamento de blocos de rocha;
- valores de coeficientes parciais das propriedades do terreno específicos para rochas, maciços rochosos e descontinuidades;
- maior atenção conferida ao método observacional e às regras

prescritivas para a verificação da segurança de estruturas geotécnicas em maciços rochosos;

- consideração do efeito da escavação com recurso a explosivos;
- taludes e fundações superficiais e por estacas em maciços rochosos;
- ancoragens, pregagens e suportes superficiais em maciços rochosos;
- medidas de controlo das águas do terreno, incluindo injeções e sistemas de drenagem.

7 Considerações finais

Apresentaram-se sucintamente os aspetos principais da organização, do conteúdo e das alterações referentes à segunda geração do Eurocódigo 7 para o projeto de estruturas geotécnicas. Ao longo de todo o processo de revisão do Eurocódigo 7 procurou-se melhorar o enquadramento do projeto geotécnico nas regras gerais adotadas nos Eurocódigos Estruturais. O reconhecimento das especificidades de diversos aspetos das bases do projeto geotécnico originou a transferência de conteúdos para a EN 1990, sendo de destacar a alteração do seu título para “Bases do projeto estrutural e geotécnico”.

Foram abordadas principalmente as Partes 1 e 2 do Eurocódigo 7, que foram já formalmente aprovadas pelo CEN. A Parte 3 encontra-se, ainda, em fase de voto final, prevendo-se a sua aprovação formal no outono de 2024.

Foi dado relevo aos aspetos relativos aos maciços rochosos, em virtude do salto qualitativo dado na abordagem deste tipo de terreno, que era incipiente na primeira geração do Eurocódigo 7.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os membros da Subcomissão 7 da CT 115 que têm participado ativamente no processo de revisão de todas as partes da segunda geração do Eurocódigo 7.

Referências

- [1] EN 1997-1:2004 – Eurocode 7 – Geotechnical design - Part 1: General rules, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004.
- [2] EN 1997-2:2007 – Eurocode 7 – Geotechnical design - Part 2: Ground investigation and testing, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2007.
- [3] EN 1990:2023 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [4] EN 1990:2023/prA1 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design - Part 1: New structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [5] FprEN 1997-1:2024 – Eurocode 7 – Geotechnical design - Part 1: General rules. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels, 2024.
- [6] FprEN 1997-2:2024 – Eurocode 7 – Geotechnical design - Part 2: Ground properties. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels, 2024.

- [7] FprEN 1997-3:2024 – Eurocode 7 – Geotechnical design - Part 3: Geotechnical structures. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels, 2024.
- [8] EN 1990:2002 – Eurocode – Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2002.
- [9] EN 1990:2002/A1:2005 – Eurocode – Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2005.
- [10] EN 1990:2002/A1:2005/AC:2008 – Eurocode - Basis of structural design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2008.



2.^a geração do Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos

2nd generation of Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance

Rita Bento

Resumo

Este artigo aborda a organização da segunda geração do Eurocódigo 8, destacando as mudanças gerais na EN 1998 e as principais alterações em cada parte do código. Apresenta-se a abrir uma visão geral da estrutura do Eurocódigo 8, seguindo-se uma análise da evolução e melhorias. Posteriormente, examinam-se as mudanças específicas em cada parte do EN 1998, abordando requisitos e métodos de projeto, mas também de avaliação sísmica de estruturas. A abordagem oferece uma compreensão concisa das atualizações e melhorias na segunda geração do Eurocódigo 8, essenciais para engenheiros e outros profissionais de projeto em áreas sísmicas.

Abstract

This article addresses the organization of the second generation of Eurocode 8, highlighting the general changes introduced by EN 1998 and the main changes in each part of the code. It opens with an overview of the Eurocode 8 structure, followed by an analysis of the evolution and enhancements. Subsequently, it examines the specific changes in each part of EN 1998, covering requirements and methods for seismic design but also the assessment of structures. This approach provides a concise understanding of the updates and improvements in the second generation of Eurocode 8, crucial for engineers and design professionals in seismic areas.

Palavras-chave: Projeto sísmico / Avaliação sísmica / Reforço sísmico / Edifícios / Pontes / Outras estruturas

Keywords: Seismic design / Seismic assessment / Seismic retrofit / Buildings / Bridges / Other structures

Rita Bento

Presidente da SC 08 da CT 115
Professora Catedrática
IST, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
 0000-0002-6503-0644
rita.bento@tecnico.ulisboa.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

BENTO, R. – 2.^a geração do Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 99-108.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-011>

1 Introdução

A segunda geração dos Eurocódigos em geral, e do Eurocódigo 8 em particular, teve como objetivo simplificar as versões da primeira geração, com uma significativa ênfase em facilitar a sua utilização, evitando procedimentos alternativos e garantindo a convergência e harmonização entre as suas várias partes, mas também entre os próprios Eurocódigos. Tal esforço incluiu a redução dos parâmetros de determinação nacional (NDP, *Nationally Determined Parameters*) e a harmonização da definição da perigosidade sísmica nas fronteiras. Uma novidade importante é a inclusão de novos tópicos e desenvolvimentos de investigação e prática que, entretanto, foram emergindo ao longo dos anos. O público-alvo principal são os engenheiros projetistas, com uma aplicação prática prevista em cerca de 80% dos casos comuns.

A visão geral, a evolução, as alterações principais e inovações adotadas na segunda geração do Eurocódigo 8 estão disponíveis em <https://ec8webinars.org>, que documenta a série de webinars desenvolvidos sobre a segunda geração do Eurocódigo 8, entre março de 2022 e abril de 2024. Esta série de webinars foi organizada pela Associação Europeia de Engenharia Sísmica (EAEE), e coordenada pela autora através do seu Grupo de Trabalho 12.

Apresenta-se seguidamente a organização da segunda geração do Eurocódigo 8, a evolução e principais alterações gerais na EN 1998 e, por fim, a evolução e principais alterações nas diferentes partes do Eurocódigo 8.

2 Organização do Eurocódigo 8

Esta geração do código foi organizada tendo em conta as diretrizes para o desenvolvimento de todos os Eurocódigos, as quais incluíam a premissa de evitar repetições. A geração anterior, desenvolvida com o objetivo de proporcionar uma solução eficaz para cada tipo de estrutura, apresentava, por essa razão, diversas redundâncias. Assim, no caso do Eurocódigo 8, tornou-se necessário repensar a sua organização, considerando que a definição da ação sísmica as regras gerais de projeto e análise são as mesmas para todos os tipos de estruturas.

Assim sendo, a antiga Parte 1 [1], que abordava a ação sísmica e as regras para edifícios, foi dividida em Parte 1-1 [2] e Parte 1-2 [3], mantendo todas as regras gerais na primeira delas. A organização implementada está esquematicamente representada na Figura 1, que permite identificar três níveis:

Nível 1 constituído pelas Partes 1-1 (ação sísmica e regras gerais) e 5 [4] (geotecnia), utilizadas pelas outras partes;

Nível 2 abrange os diferentes tipos de novas estruturas;

Nível 3 aborda as estruturas existentes e remete para os outros níveis.

Adicionalmente, as antigas Partes 4 [5] e 6 [6] viram-se privadas de todas as regras gerais aí duplicadas, não se justificando, devido ao seu volume, mantê-las como partes separadas, em particular a antiga Parte 6 que cobria mastros e chaminés. Todos esses tipos de construções foram agrupados na Parte 4 [7] da segunda geração.

Apesar da referida reorganização, a segunda geração do Eurocódigo 8 manteve 6 partes.

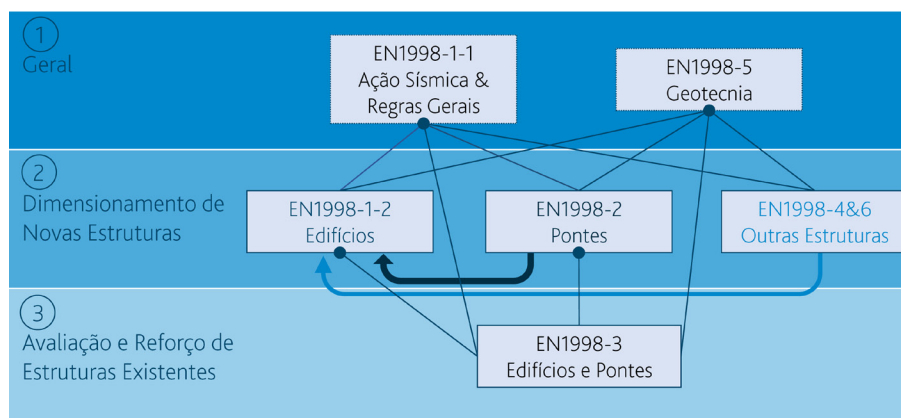


Figura 1 Organização da segunda geração do Eurocódigo 8 (adaptada de [18])

3 Evolução e principais alterações na EN 1998

A evolução mais significativa da segunda geração do Eurocódigo 8, resulta do avanço dos conhecimentos ao longo dos últimos anos e da necessidade de incluir todos os materiais contemplados nos restantes Eurocódigos. Listam-se seguidamente os tópicos dignos de menção, seja por serem novos ou por terem sido amplamente desenvolvidos nesta geração:

- Verificação do Estado Limite Totalmente Operacional (OP);
- Desenvolvimento da Abordagem Baseada em Deslocamentos (DBA - *Displacement Based Analysis*);
- Mapas europeus da perigosidade sísmica;
- Interação solo-estrutura, resposta não linear de fundações e estruturas subterrâneas;
- Elementos não estruturais (por exemplo, modelação dos painéis de enchimento);
- Edifícios altos;
- Edifícios com lajes fungiformes;
- Estruturas de transição;
- Estruturas de alumínio (edifícios);
- Estruturas de alvenaria;
- Estruturas equipadas com sistemas de dissipação de energia;
- Pontes (estruturas existentes), pontes integradas, pontes atirantadas;
- Estruturas de madeira (pontes e estruturas existentes);
- Mecanismos locais e diafragmas flexíveis em edifícios de alvenaria (estruturas existentes).

3.1 Consistência com a EN 1990

O Eurocódigo 8 foi desenvolvido de forma a garantir a conformidade das principais definições com aqueles presentes na EN 1990 [8], que estabelece a filosofia geral dos Eurocódigos, em particular no que

diz respeito aos Estados Limites, às classes de consequência, e à avaliação de estruturas existentes.

3.1.1 Estados limites

A definição dos Estados Limites (EL) na segunda geração de Eurocódigos Estruturais foi harmonizada e revista, passando a ser utilizadas em todos os Eurocódigos e, conseqüentemente, em todas as partes do Eurocódigo 8 (Figura 2). Listam-se abaixo as considerações mais relevantes para o EL último (ULS – *Ultimate Limit State*):

- Colapso iminente (NC) – definido como um estado em que a estrutura está gravemente danificada, com grandes deslocamentos permanentes, mas mantém a sua capacidade para a carga vertical; a maioria das componentes não estruturais, quando presentes, colapsaram;
- Danos severos (SD) – um estado em que a estrutura está significativamente danificada, possivelmente com deslocamentos permanentes moderados, mas mantém a sua capacidade à carga vertical; os componentes não estruturais, quando presentes, estão danificados. Supõe-se que a estrutura seja reparável, ainda que em alguns casos, não seja economicamente viável repará-la.

A verificação do EL NC é necessária para a avaliação de estruturas existentes, e o EL SD para o projeto de estruturas novas.

Em relação aos EL de serviço (SLS – *Service Limit State*), postulou-se o seguinte:

- Danos Limitados (DL) – é definido como um estado em que a estrutura está apenas ligeiramente danificada e é economicamente viável repará-la, com deslocamentos permanentes negligenciáveis, capacidade inalterada para resistir a futuros sismos e elementos estruturais mantendo a sua plena resistência com uma redução limitada na rigidez;
- Totalmente Operacional (OP) – Este estado limite adicional (OP) foi considerado de forma a garantir o funcionamento de determinadas estruturas críticas, como hospitais ou edifícios de Proteção Civil.

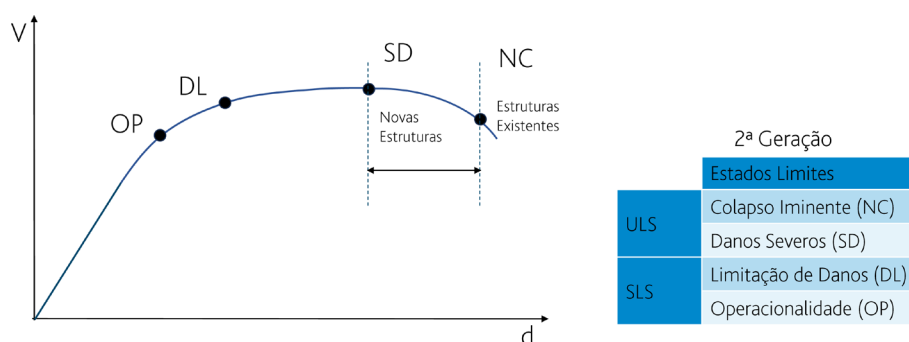


Figura 2 Estados Limites da segunda geração

3.1.2 Classes de consequência

A primeira geração definia quatro classes de importância às quais eram associados fatores corretivos da ação sísmica de projeto. Na segunda geração a EN 1990 define classes de consequências de CC1 a CC4, sendo a última relacionada com obras de risco excepcional não abrangidas pelos Eurocódigos. Como o Eurocódigo 8 é regulamentar em certos países europeus, onde as classes de importância são precisamente definidas em textos regulamentares, considerou-se que alterações regulamentares poderiam revelar-se difíceis de efetuar para modificar a descrição das classes. No entanto, como na EN 1990 é permitido subdividir as classes de consequências, decidiu-se que a CC3, seria dividida em classe CC3a, para corresponder à antiga classe de importância III, e CC3b para a antiga classe IV. Corresponde, portanto, apenas a uma modificação de terminologia, sem alteração de conteúdo, nem possibilidade de escolha para os membros.

O fator de importância associado às classes de importância também foi modificado. Foi substituído pelo fator de desempenho ($\gamma_{EL,CC}$), um multiplicador da ação sísmica, independentemente desta, e com duas componentes que não são necessariamente multiplicativas. Assim, os seus valores são os expressos na Tabela 1, com duas entradas: as classes de consequência e o nível de ação sísmica associado a cada EL. Esta tabela, sendo uma escolha essencial de segurança, constitui um NDP que cada Estado Membro pode definir.

Tabela 1 Fator de desempenho $\gamma_{EL,CC}$ correspondente a uma classe de consequência e a um EL

Fator de desempenho				
Estados limites (EL)	Classes de consequências (CC)			
	CC1	CC2	CC3a	CC3b
NC	1,2	1,5	1,8	2,2
SD	0,8	1	1,2	1,5
LS	0,4	0,5	0,5	0,6

3.1.3 Avaliação de estruturas existentes

O TC250 decidiu abranger a avaliação de estruturas existentes em todas as situações de projeto, resultando na criação da Parte 2 da

EN 1990 [9]. Essa nova parte, que estabelece uma filosofia geral para a avaliação, serve como base para futuros desenvolvimentos em todos os Eurocódigos, conforme necessário. No entanto, o Eurocódigo 8, desde o seu início, inclui uma Parte 3 [10] dedicada à avaliação e reforço de estruturas existentes. Dada a especificidade da situação sísmica, os conceitos desta parte podem diferir daqueles recomendados na EN 1990-2 [9]. Foi, por isso, necessário assegurar a existência de ligações entre as duas abordagens, permitindo que o projetista efetue todas as verificações necessárias em zonas sísmicas, seja para situações de projeto sísmico ou não sísmico. Nesse sentido foi proposto um fator parcial corrigido no lado da resistência, independente do local, compatível com o enquadramento do Eurocódigo 8. Como vantagem adicional, o formato proposto coincide com o apresentado na EN 1990 [9] e na EN 1992 [11] da segunda geração para a avaliação de estruturas existentes em situações de projeto não sísmico. Apesar de persistirem diferenças, poder-se-á melhorar a coerência entre as duas abordagens posteriormente.

4 Evolução e principais alterações na EN 1998-1-1

4.1 Requisitos de desempenho e critérios de conformidade

Os objetivos gerais de desempenho estabelecidos para o projeto de estruturas em zonas sísmicas, considerando um grau adequado de fiabilidade, são apresentados na Parte 1-1 [12], e são praticamente os já existentes na primeira geração:

- Proteger vidas humanas;
- Limitar danos;
- Manter operacionais instalações importantes.

Estes são complementados nas diferentes partes para considerar a especificidade dos tipos estruturais.

Refere-se na introdução que a ação sísmica é uma ação aleatória e que os métodos de análises no EN 1998 recorrem frequentemente a comportamentos não lineares que são mais difíceis de modelar e definir, o que acrescenta complexidade à natureza aleatória da abordagem proposta, que deve permanecer economicamente sustentável. Portanto, no EN 1998 adota-se uma probabilidade de rotura muito baixa, no entanto, superior à aceite nos outros

Eurocódigos. Consequentemente, pode ocorrer (ainda que com baixa probabilidade) que um movimento sísmico no local considerado possa produzir efeitos mais severos do que os descritos pelos EL.

Para proporcionar a cada país a possibilidade de escolha homogénea de segurança para um tipo de estrutura, foi introduzido, primeiro, o índice de ação sísmica:

$$S_{\delta} = \delta F_{\alpha} F_T S_{\alpha,475} \quad (1)$$

O parâmetro de segurança δ é um NDP, dependente da classe de consequência da estrutura, CC, e é definido nas diferentes partes do EN 1998, em função do tipo de estrutura; a ação sísmica depende de F_{α} representando o fator de amplificação do sítio de período curto, de F_T , o fator de amplificação topográfico, e de $S_{\alpha,475}$, a aceleração espectral máxima de resposta (amortecimento de 5%) correspondente ao troço de aceleração constante do espectro de resposta elástica horizontal para um período de retorno de 475 anos (Figura 4). Em segundo lugar, são definidas classes de ação sísmica com base nos intervalos de variação do índice de ação sísmica, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 Intervalos de variação de S_{δ} para definir classes de ação sísmica

Classe de ação sísmica	Variação do índice da ação sísmica
Muito baixa	$S_{\delta} < 1,30 \text{ m/s}^2$
Baixa	$1,30 \text{ m/s}^2 \leq S_{\delta} \leq 3,25 \text{ m/s}^2$
Média	$3,25 \text{ m/s}^2 \leq S_{\delta} < 6,50 \text{ m/s}^2$
Alta	$S_{\delta} \geq 6,50 \text{ m/s}^2$

Em muitos aspetos o conceito de classe de ação sísmica substituiu o conceito de níveis de ação sísmica. Na primeira geração a distinção entre os diferentes níveis de intensidade é definida a partir de NDP (Figura 3, esquerda), e está atribuída uma determinada classe de importância (i.e., classe de consequência) associada a cada intensidade. Na segunda geração do Eurocódigo 8, os diferentes níveis de intensidade são definidos pelo regulamento (já não são NDP) e com a introdução do parâmetro δ é possível ter a mesma classe de consequência em diferentes níveis de intensidade (Figura 3, direita). Desta forma é possível definir o tipo de disposições que se

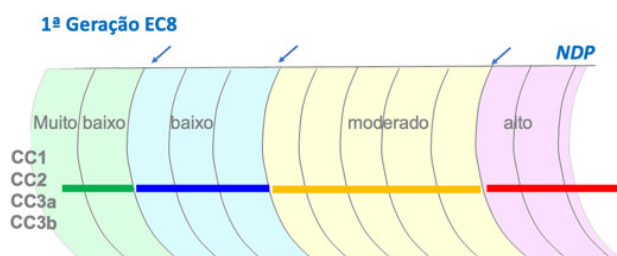


Figura 3 Relação entre classes de ação sísmica (intensidade de ação sísmica) e classes de consequência (classes de importância) na primeira e segunda geração (adaptada de [19])

pretende que sejam aplicadas a uma determinada estrutura, função da classe de consequência e da classe de ação sísmica (i.e., é possível dimensionar uma estrutura CC1 para diferentes classes de ação sísmica).

4.2 Ação sísmica e condições do terreno

A ação sísmica continua a ser representada a partir do espectro de resposta de pseudo-acelerações absolutas. A grande diferença é que o espectro de resposta deixou de estar ancorado apenas a um parâmetro – a aceleração de pico do solo – e passou a estar ancorado a dois parâmetros – a S_{α} que é o valor do espectro num troço horizontal, que abrange determinada gama de períodos espectrais, e S_{β} , o valor do espectro correspondente a um período espectral de 1 s (Figura 4).

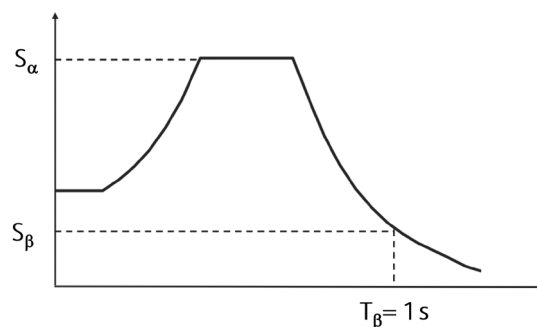
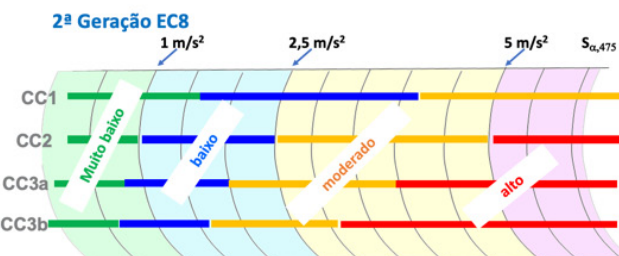


Figura 4 Configuração de espectro de resposta da segunda geração do Eurocódigo 8 (adaptada de [19])

É solicitado pela EN 1998-1-1 que as ações sísmicas sejam especificadas selecionando períodos de retorno adequados, $T_{LS,CC}$ dependendo do estado limite, EL (LS, *Limit State*), que não deve ser excedido sob a ação sísmica para uma estrutura de classe de consequência CC. Por definição, o período de retorno de referência T_{ref} é igual a $T_{SD,2'}$, o período de retorno associado ao estado limite SD para estruturas CC2.

A EN 1998-1-1 introduz mapas de perigosidade sísmica num anexo informativo (Anexo A), numa escala reduzida, para um período de retorno de 475 anos. Estes mapas fornecem apenas informação, dando uma boa ideia da distribuição de sismos na Europa, mas a definição de mapas nacionais permanece da responsabilidade dos



Membros Nacionais.

Ainda na Parte 1-1 são definidas as condições para definir um local como estável, enquanto os locais instáveis são abordados na Parte 5. Na Parte 1-1 são fornecidos critérios para determinar a necessidade de estudos específicos do local, considerando a classe de consequência da estrutura, a magnitude máxima do sismo e a distância à fonte; ao contrário da primeira geração, esses estudos são permitidos para todos os locais, com orientação fornecida no Anexo C.

Na revisão da primeira geração do Eurocódigo 8, foi prioritário eliminar a ambiguidade na categorização do local. Embora a velocidade de onda de corte, v_s , seja um bom indicador, na segunda geração foram adicionados dois parâmetros para abranger melhor os diferentes perfis do terreno: H_{800} , a profundidade da rocha matriz com v_s de pelo menos 800 m/s, e $v_{s,H}$, a velocidade média até H_{800} . Com base nestes critérios, o tipo de terreno foi definido de A a F (Tabela 3). Podem ser adicionadas categorias adicionais para melhor distinguir as características sísmicas regionais ou urbanas. São fornecidas formas alternativas de categorização do terreno no Anexo B, caso $v_{s,H}$ e/ou H_{800} não estejam definidos.

Tabela 3 Categorização do local

Profundidade	Tipo de terreno	Rijo	Médio	Mole
	V_{sH} [m/s]	800-400	400-250	250-150
Muito superficial	$H_{800} \leq 5$ m	A	A	E
Superficial	$5 \text{ m} \leq H_{800} \leq 30$ m	B	E	E
Intermédio	$30 \text{ m} \leq H_{800} \leq 100$ m	B	C	D
Profundo	$H_{800} > 100$ m	B	F	F

4.3 Classes de ductilidade

Na primeira geração dos Eurocódigos estão previstas três classes de ductilidade (DC – *Ductility class*): DCL (*Low*), DCM (*Medium*) e DCH (*High*). A segunda geração do Eurocódigo 8 mantém três classes de ductilidade, mas as classes foram redefinidas:

- A DC1 é uma extensão da DCL, em que o comportamento é quase elástico, considerando apenas o sobredimensionamento e desprezando a capacidade de deformação inelástica e a capacidade de dissipação de energia. No entanto, é necessário controlar os deslocamentos entre pisos. Com esta extensão dos limites, um grande número de estruturas pode ser construído em DC1 em áreas de sismicidade moderada. Esta é, essencialmente, a categoria de estruturas não dissipativas.
- A DC2 é concebida para abranger a maioria das estruturas comuns, em áreas de sismicidade moderada. O sobredimensionamento local (na deformação) é imposto pelos critérios de dimensionamento de capacidade e deformação plástica. O comportamento global é controlado pela limitação de deslocamentos e efeitos de segunda ordem, mas não é

imposto nenhum critério como "vigas fracas - pilares fortes". O uso da DC2 é limitado para certos tipos de estruturas.

- A DC3 acrescenta à DC2 o controlo do mecanismo plástico global, com o critério de pilares fortes. As regras situam-se entre a DCM e a DCH, dependendo do caso. Não há limitações para o uso da DC3.

A diferença em relação aos anteriores DC de primeira geração é que há uma diferença maior entre DC2 e DC3 do que existia entre DCM e DCH. Na segunda geração, o dimensionamento por capacidade resistente (*capacity design*), com controlo do mecanismo global, só é exigido na DC3.

4.4 Coeficiente de comportamento

Os coeficientes de comportamento, q , são dados em termos do produto dos coeficientes de sobredimensionamento, q_s , redundância, q_R , e ductilidade, q_D , equação (1) e Figura 5.

$$q = q_s q_R q_D \quad (1)$$

O coeficiente q_s é o coeficiente de sobredimensionamento, fixado em 1,5. O q_R ilustra a redundância da estrutura e é igual à razão α_u/α_1 da primeira geração. Finalmente, q_D representa a exigência de ductilidade, que depende do DC em questão, e é definido para o EL de Danos Significativos (SD). Esta decomposição tem a vantagem de regras mais precisas, uma vez que podem ser relacionadas separadamente com q_R e q_D , e o significado físico torna-se mais claro. Para a DC1, q reduz-se a q_s . Uma correção do coeficiente de comportamento é efetuada quando se considera a interação solo-estrutura, uma vez que a exigência de ductilidade é modificada na estrutura nesse caso.

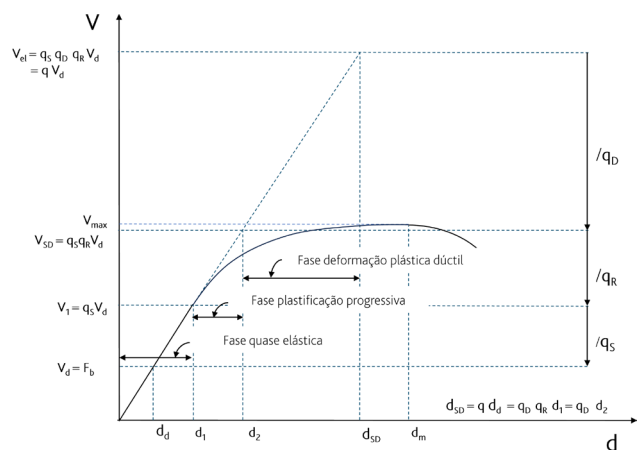


Figura 5 Identificação dos diferentes coeficientes do coeficiente de comportamento

4.5 Modelação e métodos de análise

A EN 1998 apresenta duas abordagens alternativas para projeto e avaliação, a tradicional – baseada em um espectro de resposta reduzido, elástico dividido pelo fator de comportamento q , e

verificação em termos de forças internas, agora denominada Abordagem Baseada em Forças (FBA – *Force Based Analysis*), e a nova Abordagem Baseada em Deslocamento (DBA – *Displacement Based Analysis*), onde a ação é especificada em termos do espectro de resposta elástico, o método de análise de referência é o não linear, e as verificações são realizadas em termos de deformações inelásticas para modos de colapso dúcteis e forças para modos de rotura frágeis.

A abordagem baseada em força contempla uma análise elástica linear (método de força lateral ou método do espectro de resposta) com a consideração da sobrerresistência e da resposta não linear através do fator de comportamento q . Estas análises podem ser usadas para verificar o estado limite de danos severos (SD), bem como para a verificação dos estados limite de danos limitados DL e operacional OP, usando $q = 1$.

A DBA foi introduzida experimentalmente como a abordagem de referência para avaliação de estruturas existentes na Parte 3 [10] da primeira geração. O facto de ter sido adotada na Parte 1-1 [2] e ser apresentada como uma alternativa viável também para projeto de novas estruturas é possivelmente a atualização mais importante de toda a EN 1998 da segunda geração.

As características principais das duas abordagens estão definidas na Tabela 4. Os deslocamentos em FBA são obtidos diretamente da análise e multiplicados pelo coeficiente de comportamento de deslocamentos, q_{disp} . Segundo a DBA os deslocamentos são determinados segundo a relação R- μ -T proposta em [12]. A EN 1998-1-1 propõe ainda, como alternativa, que os deslocamentos sejam determinados a partir de análises dinâmicas não lineares no domínio do tempo de um sistema de um grau de liberdade (1 GL).

Adicionalmente, em estruturas melhoradas com sistemas de dissipação de energia, é também proposta uma abordagem baseada em energia.

Tabela 4 Características principais de FBA e DBA

Abordagem baseada em forças (FBA)	Abordagem baseada em deslocamentos (DBA)
<ul style="list-style-type: none"> • Considera aroximadamente a sobrerresistência e a resposta não linear através de um fator de comportamento q • Pode ser utilizado para verificação do estado limite de SD • Pode ser utilizado para a verificação dos estados limites de DL e OP, utilizando $q = 1$ • Deslocamentos não obtidos a partir da análise sísmica, mas multiplicado por q_{disp} 	<ul style="list-style-type: none"> • implementado através de uma análise estática não linear (<i>pushover</i>) • Considera explicitamente o comportamento não-linear da estrutura • Os deslocamentos são diretamente obtidos da análise com base em: <ul style="list-style-type: none"> • Relação R – μ – T • Análise de história de resposta não linear de modelo 1 GL (Anexo E)

As regras de modelação na segunda geração são principalmente descritivas. De uma forma geral, é de destacar que: (i) as propriedades dos elementos estruturais devem ser baseadas nos valores médios das propriedades dos materiais; (ii) os elementos não estruturais

que possam influenciar a resposta sísmica devem ser considerados no modelo para análise sísmica; (iii) a influência de estruturas adjacentes deve ser considerada no modelo.

Regras adicionais para análise linear: a rigidez elástica deve ser igual à rigidez efetiva secante que corresponde aos limites elásticos do elemento estrutural; a interação solo-estrutura (SSI, *Soil Structure Interaction*) deve ser levada em conta, no caso de efeito adverso (EN 1998-5).

Regras adicionais para análise não linear: no mínimo deve ser usada uma relação força-deformação bilinear (também elasto-plástica) ao nível do elemento; relações força-deformação trilineares podem ser utilizadas; em relação à capacidade de deformação, a degradação cíclica deve ser considerada; a deterioração da resistência deve ser incluída se esperada; para a flexão, deve-se considerar as forças axiais e o esforço transversal para a relação força-deformação; entre outros.

4.6 Verificações de segurança

Para a verificação de segurança tem de se garantir que os efeitos das ações na situação de projeto ou avaliação sísmica, E_d , não excedem a resistência correspondente dos elementos estruturais, R_d :

$$E_d \leq R_d \quad (2)$$

A Abordagem Baseada em Forças (FBA) pode ser usada para a verificação para os estados limites OP e DL (com $q = 1$) e SD. Com a Abordagem Baseada em Deslocamentos (DBA), a verificação é feita para todos os estados limites, incluindo o colapso iminente (NC). Em geral a verificação de segurança é feita membro a membro, verificação local, com exceção de estruturas de alvenaria e também apropriado para estruturas de betão armado/aço com paredes de enchimento de alvenaria quando estas dominam o comportamento, onde a verificação de segurança global é permitida.

Todas as verificações relevantes do Eurocódigo 8 para o projeto sísmico de novas estruturas são exigidas apenas para o estado limite de Danos Significativo, SD. Satisfazer estas condições implica que as condições de DL ou NC também são satisfeitas. Para as estruturas existentes a verificação de segurança deve ser feita, pelo menos, para o Colapso Iminente, NC. As verificações são realizadas em termos de deformações inelásticas para modos de colapso dúcteis e forças para os modos de rotura frágeis.

5 Evolução e principais alterações na EN 1998-1-2

A Parte 1-2 do Eurocódigo 8 [13], é um documento muito longo, de aproximadamente 400 páginas, que contém disposições específicas relevantes para edifícios. Em comparação com a primeira geração, introduzem-se novas abordagens e aspetos construtivos e revêm-se os existentes em profundidade. Entre as novas ou quase totalmente novas características, pode-se referir: dimensionamento baseado em deslocamento, para o qual são fornecidas regras completas e dados para todos os materiais; novas definições de classes de ductilidade e os requisitos associados para edifícios; dimensionamento de zonas de transmissão de forças (zonas onde os componentes verticais

da estrutura primária são interrompidos para dar lugar a espaços abertos, parques de estacionamento ou recuos); uma secção sobre elementos não estruturais, paredes de enchimento de alvenaria, revestimentos e divisórias; edifícios com isolamento de base; edifícios com sistemas de dissipação de energia; regras para o aumento da fase plástica de forças axiais em pilares; edifícios altos, edifícios de betão armado com lajes fungiformes; estruturas pré-fabricadas em betão; sistemas de aço leves; tirantes restritos à encurvadura; regras abrangentes para estruturas de madeira; estruturas de alumínio; anexos detalhados sobre acelerações de piso para elementos não estruturais; edifícios com sistemas de dissipação de energia; ligações de aço incluindo alguns tipos pré-qualificados; estruturas de aço leves; juntas compostas; e outros detalhes.

Além destas novas ou quase totalmente novas características, muitos "detalhes" locais foram revistos, com o intuito de garantir segurança, precisão, simplicidade e economia.

6 Evolução e principais alterações na EN 1998-2

A segunda geração da Parte 2 do Eurocódigo 8 [15] é um documento mais conciso do que o seu antecessor, resultado da eliminação já referida de repetições presentes na versão anterior. As principais alterações incluem o alinhamento das classes de consequências das pontes com a EN 1990, os estados limites e a ação sísmica associada; novas classes de ductilidade aplicáveis às pontes; a aplicação de uma abordagem baseada em deslocamento nas pontes; novos métodos de análise para movimentos de solo que variam espacialmente; novas cláusulas referentes a pontes suspensas por cabos, pontes com pré-esforço extradorsal, com encontros integrais e com estacas integrais; e a introdução de um novo anexo sobre pontes de madeira.

7 Evolução e principais alterações na EN 1998-3

A Parte 3 do Eurocódigo 8, tanto na primeira como na segunda geração [16], aborda a avaliação e reabilitação de edifícios existentes, mas na segunda geração passou a incluir também as Pontes. Na primeira geração a maioria da informação relevante vem nos Anexos informativos. A segunda geração é um documento com cerca de 200 páginas, constituído por doze cláusulas em que cinco são novas e incluem a informação relevante para as estruturas de betão armado, estruturas de aço e mistas, de madeira, de alvenaria e pontes. Tem ainda cinco anexos informativos, abordando a análise preliminar, informações adicionais para estruturas de betão armado, madeira e alvenaria, sendo que o último anexo apresenta fluxogramas relacionados com a aplicação da EN 1998-3.

As principais alterações incluem: a extensão do regulamento para pontes, o alinhamento de terminologia e procedimentos relacionados com a EN 1990 e com a EN 1998-1-1; a adição dos "elementos não críticos" (para além dos "elementos secundários" da Parte 1-1) que podem ser desprezados na modelação e verificação e sofrer danos significativos desde que não coloquem em perigo os elementos primários e possam ser reparados localmente (por exemplo, paredes traseiras do encontro, etc.); a verificação de

segurança global adicionada juntamente com as verificações convencionais locais, a nível de membros (útil para edifícios de alvenaria, e também apropriado para estruturas de betão armado/aço com paredes de enchimento de alvenaria quando estas dominam o comportamento); as alterações em relação aos níveis de conhecimento; os valores médios utilizados para materiais existentes e adicionados e podem ser diferentes em diferentes áreas da estrutura e são recomendados valores médios e desvio padrão de diferentes materiais (varões de aço, madeira, e alvenaria); grande desenvolvimento para estruturas de madeira de alvenaria [17]; entre outros.

A Figura 6 apresenta os passos relevantes para a avaliação sísmica e reforço sísmico de edifícios e pontes existentes de acordo com a segunda geração do EN 1998.

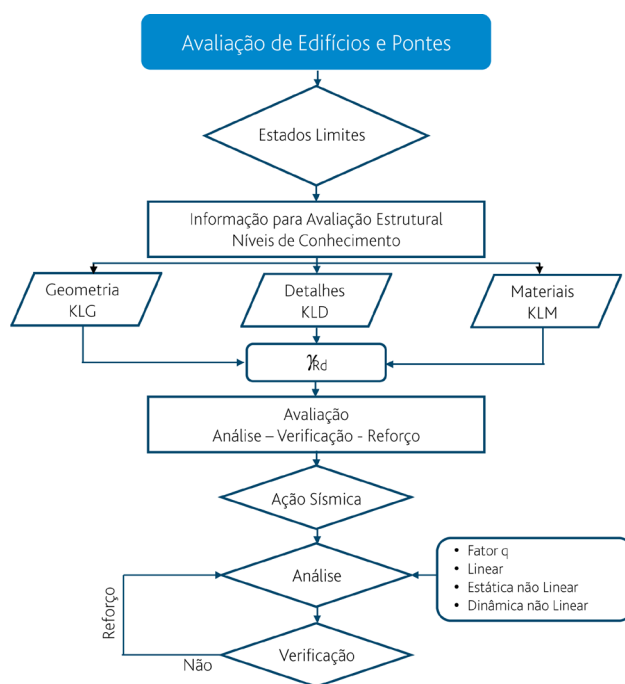


Figura 6 Fluxograma com o procedimento para avaliação e reabilitação sísmica de edifícios e pontes (adaptada de [15])

O Nível de Conhecimento (KL, *Knowledge Level*) previsto na primeira geração da Parte 3 do EN 1998, tem demonstrado repetidamente que a quantidade de informação necessária, ou que pode ser razoavelmente recolhida na maioria das situações práticas, não é uniforme (na estrutura e nas categorias de informação de Geometria, Pormenorização e Materiais) e, por isso foi substituído por três KL específicos para cada categoria: KLG (Geometria), KLD (Detalhes/Pormenorização) e KLM (Materiais), com a distinção adicional de um KLM diferente para cada material de construção. Além disso, foi também introduzida a possibilidade de definir um KLD ou KLM diferente em diferentes partes da estrutura, desde que seja realizada uma análise preliminar, não obrigatória, para identificar partes da estrutura de maior importância. Estas mudanças introduzem maior flexibilidade no processo de avaliação

desnecessárias, tornando a fase de aquisição de conhecimento mais eficiente em termos de custos. Outras mudanças envolvem a nomenclatura dos três níveis discretos de conhecimento que podem ser alcançados em cada categoria de informação. Anteriormente, eram denominados, em ordem crescente de conhecimento, como Limitado, Normal e Completo. Agora, são designados: Mínimo, Médio e Alto. Os novos nomes destacam o facto de que, mesmo com máximo esforço, o conhecimento alcançado não é completo. Isso também é refletido nos coeficientes parciais de resistência γ_{Rd} usados nas verificações, cuja avaliação considera sempre um nível não nulo de incerteza estatística nos parâmetros que influenciam o modelo de resistência através de um valor não unitário de γ_{Rd} associado ao KL Alto.

8 Evolução e principais alterações na EN 1998-4

A EN 1998-4 da segunda geração do Eurocódigo, que abrange aspetos de projeto sísmico para silos, tanques, tubagens acima do solo e enterradas, componentes acessórios em instalações industriais, e torres, mastros e chaminés. Este documento revisto consolida e resume o conteúdo anteriormente encontrado na EN 1998-4 e na EN 1998-6 da primeira geração. Em particular, a revisão permitiu a consistência com os cálculos e princípios de dimensionamento previstos nas disposições gerais atualizadas nas Partes 1-1, 1-2 e 5, e os princípios de dimensionamento apresentados nos Eurocódigos 2 e 3. As melhorias no documento incluem a eliminação de redundâncias e inconsistências e a inclusão de novos anexos informativos práticos.

9 Evolução e principais alterações na EN 1998-5

A EN 1998-5 complementa o EN 1997 considerando a ação sísmica. A revisão da Parte 5 do Eurocódigo 8 é feita tendo propósitos múltiplos: reduzir o conservadorismo existente com a abordagem baseada em forças, revendo os fatores de material; desenvolver a abordagem a estacas e estruturas de contenção; e desenvolver a interação solo-estrutura. Além disso, foram incluídos dois tópicos adicionais na Parte 5: ações sísmicas em estruturas subterrâneas e introdução de abordagens baseadas em deslocamento. As alterações mais significativas são:

- Base de projeto: introdução de sistemas geotécnicos (sistema em que uma estrutura geotécnica interage com outras estruturas ou estruturas geotécnicas) e estruturas geotécnicas (estrutura que inclui solo ou um elemento estrutural que depende do solo para resistência) com os critérios de desempenho associados e classes de consequências;
- Métodos de análise e verificações para a abordagem baseada em força e a abordagem baseada em deslocamento;
- Definição da ação sísmica para as estruturas e sistemas geotécnicos e ligação com os deslocamentos permanentes aceitáveis;
- Características do solo e fatores parciais;

- Efeitos das ações nas fundações, incluindo consideração da interação solo-estrutura, e verificações de estabilidade para fundações diretas e fundações em estacas.

10 Considerações finais

O presente artigo apresenta a segunda geração do EN 1998 à comunidade técnica e científica nacional, destacando as alterações mais relevantes introduzidas nesta versão. As principais melhorias incluem a eliminação de redundâncias, a correção de inconsistências, a introdução de abordagens de cálculo práticas simplificadas, a introdução de novas metodologias para o projeto e avaliação sísmica de estruturas, e contempla novos materiais e tipos de estruturas não consideradas na primeira geração. É importante referir que este documento foi preparado numa fase em que nenhuma das partes do Eurocódigo 8 é ainda um documento final; em particular, é de esperar que as Partes 1-2, 3 e 4, venham ainda a sofrer alterações significativas, pois só recentemente foram recebidos os comentários dos Membros Nacionais, resultantes da fase de inquérito.

Agradecimentos

A autora agradece a todos os membros da Subcomissão 8 da CT 115 que têm participado ativamente no processo de revisão de todas as partes da segunda geração do Eurocódigo 8 e agradece ainda a Rui Carrilho Gomes (IST) e João Bilé Serra (LNEC) pela cuidadosa revisão da Parte 5 desta geração do código.

Referências

- [1] NP EN 1998-1:2010 – Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifício, Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [2] prEN1998-1-1:2024 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 1-1: General rules and seismic action. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [3] prEN1998-1-2_2022_ENQ – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1-2: Buildings, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2022.
- [4] NP EN 1998-5:2010 – Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 5: Fundações, estruturas de suporte e aspectos geotécnicos, Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [5] EN 1998-4:2006 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipeline, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2006.
- [6] EN 1998-6:2005 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 6: Towers, masts and chimneys, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2005.
- [7] prEN 1998-4:2022 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines, towers, masts and chimneys, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2022.
- [8] prEN1990-1:2024 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [9] prEN1990-2:2024 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design, Part 2: Assessment of Existing Structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.

- [9] prEN1990-2:2024 – Eurocode – Basis of structural and geotechnical design, Part 2: Assessment of Existing Structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [10] EN 1998-3:2005 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Brussels: European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [11] FprEN 1992-1-1: 2023 – Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [12] Fajfar, P. – “A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design”, *Earthquake Spectra*. 2000;16(3), 573-592. doi:10.1193/1.1586128.
- [13] prEN 1998-1-2:2022 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1-2: Buildings, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2022.
- [14] prEN 1998-1-2:2024 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1-2: Buildings, CEN/TC 250/SC 8 N 1322, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2024.
- [15] prEN 1998-3:2022 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings and bridges. Brussels: European Committee for Standardization, Brussels, 2022.
- [16] FprEN 1998-2:2023 – Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges. Brussels: European Committee for Standardization, Brussels, 2023.
- [17] Bento, R. – “Avaliação da Segurança Sísmica de Edifícios de Alvenaria. Aspectos Gerais da aplicação da segunda geração do Eurocódigo 8 – Parte 3”, *Keynote, Sísmica 2024*, Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Universidade do Minho, Guimarães, 2024.
- [18] Bisch, P. – “Organization and concepts of EN1998”, EC8 Webinars, Second Generation of Eurocode 8, Webinar series, EAEE, 2022.
- [19] Labbé, P. – “General rules and seismic action 2 - Seismic action”, EC8 Webinars, Second Generation of Eurocode 8, Webinar series, EAEE, 2022.



2.^a geração do Eurocódigo 9 – Projeto de estruturas de alumínio

2nd generation of Eurocode 9 – Design of aluminium structures

Luís Reis

Rui F. Martins

Joaquim Pinho-da-Cruz

Francisco Toco Emílio

João Carlos Viegas


Resumo

A segunda geração dos Eurocódigos Estruturais está em conclusão e, entre eles, o Eurocódigo 9, que se aplica a estruturas de alumínio, tem a importância de poder facilitar um uso estrutural mais amplo desse material. Neste artigo são analisadas as principais diferenças entre a primeira e a segunda geração deste Eurocódigo.


Abstract

The second generation of Structural Eurocodes is nearing completion and, among them, Eurocode 9, which applies to aluminum structures, has the importance of being able to facilitate a wider structural use of this material. This article analyzes the main differences between the first and second generations of this Eurocode.


Luís Reis

Membro da SC 09 da CT 115
Professor Associado
IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
 0000-0001-9848-9569
luis.g.reis@tecnico.ulisboa.pt

Rui F. Martins

Membro da SC 09 da CT 115
Professor Associado
UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
Monte de Caparica, Portugal
 0000-0001-8155-0079
rfspm@fct.unl.pt


Joaquim Pinho-da-Cruz

Membro da SC 09 da CT 115
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
 0000-0002-7046-4690
jpc@ua.pt

Francisco Toco Emílio

Membro da SC 09 da CT 115
Investigador-Coordenador (aposentado)
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
franciscotocoemilio@gmail.com

João Carlos Viegas

Presidente da SC 09 da CT 115
Investigador-Coordenador
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0003-0264-163X
jviegas@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

REIS, L. [et al.] – 2.ª geração do Eurocódigo 9 – Projeto de estruturas de alumínio. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 109-114. <https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-012>

1 Introdução

O alumínio e o aço são os únicos materiais metálicos aos quais são dedicados Eurocódigos. O alumínio tem um conjunto de características que motivam o seu interesse na utilização em estruturas, por exemplo: a sua massa volúmica é quase três vezes inferior à do aço; algumas ligas de alumínio podem ter a tensão limite de proporcionalidade a 0,2% igual ou superior à tensão de cedência do aço macio; a oxidação do alumínio, embora possa alterar o seu aspeto, sendo normalmente superficial, não degrada significativamente a secção resistente, apresentando, neste contexto, uma resistência à corrosão superior à do aço. Por outro lado, tem um módulo de elasticidade três vezes inferior ao do aço, o seu coeficiente de dilatação térmica linear é cerca de duas vezes superior ao do aço e o seu preço é da ordem de quatro vezes superior ao do aço. Estas características tornam o alumínio um material com muito interesse para ser utilizado quando o peso da estrutura ou a sua resistência à oxidação forem características estruturalmente relevantes. A noção de que só é possível generalizar a utilização de um material que tenha regras de projeto claras e completas, que permitam a sua utilização em segurança, conduziu ao desenvolvimento deste Eurocódigo.

A primeira geração de Eurocódigos foi publicada entre 2002 e 2007. O desenvolvimento da segunda geração dos Eurocódigos, que foram elaborados ao abrigo do Mandato M/515 [1] conferido ao CEN pela Comissão Europeia e pela Associação Europeia de Comércio Livre, aproxima-se da sua conclusão e, nalguns casos (como é o do Eurocódigo 9), já está concluído. A experiência ganha na aplicação da primeira geração de Eurocódigos aconselhou a introdução de alterações que visaram reduzir o número de parâmetros de escolha nacional, no sentido de facilitar a internacionalização (no contexto europeu) da atividade de projeto de estruturas. Para além disso, a investigação, entretanto desenvolvida, conduziu a algumas alterações técnicas nestas normas.

Este artigo tem por objetivo apresentar as alterações que ocorreram nesta segunda geração do Eurocódigo 9 [2-6] quando comparado com a sua primeira geração e clarificar o seu conteúdo técnico. A parte 2, relativa à verificação da resistência ao fogo, é detalhada em artigo separado que aborda em conjunto os vários materiais incluídos nos Eurocódigos.

2 Organização do Eurocódigo 9

O Eurocódigo 9 é constituído por cinco normas com os seguintes títulos:

- EN 1999-1-1 – Eurocódigo 9: Projeto de estruturas de alumínio – Parte 1-1: Regras gerais [2]
- EN 1999-1-2 – Eurocódigo 9: Projeto de estruturas de alumínio – Parte 1-2: Verificação da resistência ao fogo [3]
- EN 1999-1-3 – Eurocódigo 9: Projeto de estruturas de alumínio – Parte 1-3: Estruturas sujeitas à fadiga [4]
- EN 1999-1-4 – Eurocódigo 9: Projeto de estruturas de alumínio – Parte 1-4: Chapas enformadas a frio [5]
- EN 1999-1-5 – Eurocódigo 9: Projeto de estruturas de alumínio – Parte 1-5: Cascas [6]

3 Evolução e principais alterações na EN 1999-1-1

De um modo geral, as matérias tratadas, os conteúdos e os títulos das secções e subsecções desta parte da norma estão em correspondência em ambas as versões da Norma. Foram, contudo, adicionadas algumas secções ou subsecções explicitando novas condições e/ou verificações a efetuar e foram também suprimidas algumas (poucas) secções [2]. Foi acrescentado um conjunto de anexos e melhoradas algumas figuras.

Ao longo do texto da nova versão da Norma, os conteúdos foram significativamente melhorados, designadamente pela introdução daquelas novas condições a verificar e de alterações no formulário a utilizar nos cálculos, tendo os métodos de cálculo sido simplificados o mais possível. Houve assuntos transferidos entre secções ou com abertura de uma nova secção, também eles acompanhados de um maior desenvolvimento e/ou aprofundamento e novo formulário.

As principais mudanças em relação à edição anterior estão listadas a seguir:

- Redução do número de hipóteses para parâmetros determinados a nível nacional (que passou de 28 para 23, tendo sido acrescentados novos anexos);
- Introdução de um novo material, a liga EN-AW 5383;
- Revisão e melhoria das curvas de encurvadura, considerando a introdução de uma nova classe de encurvadura do material (Classe B) intermédia às duas classes previamente consideradas, o que conduziu a três classes de encurvadura A, B e C;
- Adição do caso de carregamento fora do plano sobre chapas reforçadas;
- Novos tipos de ligações: soldaduras por fricção, ligações com parafusos de cabeça embebida em canal e ranhuras para parafusos;
- Melhoria e disposições adicionais para o caso de ligações com secções equivalentes em T e cálculo de forças de alavanca;
- Clarificação da distinção entre encurvadura de membros com soldaduras longitudinais e membros com soldaduras transversais;
- Novas disposições relativas à consideração de imperfeições em arco de $L/500$ para os casos em que a imperfeição em arco inicial dos elementos de $L/1000$ não é cumprida (Anexo V);
- Novo anexo para determinar a extensão da HAZ (zona afetada pelo calor) a partir de ensaios de dureza (Anexo Q);
- Novo anexo relativo aos pinos soldados ligados com soldadura por arco com ignição por ponta (Anexo R);
- Novo anexo sobre pontes (Anexo S);
- Novo anexo relativo às estruturas em treliça usadas em coberturas (Anexo T);
- Novo anexo relativo às vigas compostas de alumínio-betão (Anexo U).

Foram considerados vários casos de juntas especiais como, por exemplo, ligações com parafusos de cabeça embebida em canal. Salienta-se, em particular, que foram adicionados elementos

relativos ao projeto de soldaduras por fricção (neste processo a soldadura é produzida por uma ferramenta rotativa que plastifica o material em ambos os lados da soldadura, que será normalmente longa e plana; dado que as temperaturas estão abaixo do ponto de fusão, podem ser evitados problemas de soldadura que podem ocorrer com os processos MIG¹ ou TIG²) e ao cálculo da resistência na zona afetada pelo calor.

No cálculo de estruturas soldadas que utilizem ligas endurecidas por deformação ou ligas endurecidas por precipitação através de envelhecimento artificial, deve ser tomada em consideração a redução das propriedades resistentes que ocorre na proximidade das soldaduras. O novo Anexo Q, de caráter informativo, fornece informações sobre como determinar a extensão das zonas afetadas pelo calor a partir de ensaios de dureza. O procedimento consiste em medir a dureza num conjunto de pontos na área da soldadura (geralmente no início e final da soldadura) e é criado um perfil de dureza transversalmente à soldadura (Figura 1). Toma-se como referência a dureza do material de base suficientemente longe da soldadura e admite-se que a zona afetada pelo calor está enquadrada pelos pontos em que a dureza é inferior a 90% da do material de base.

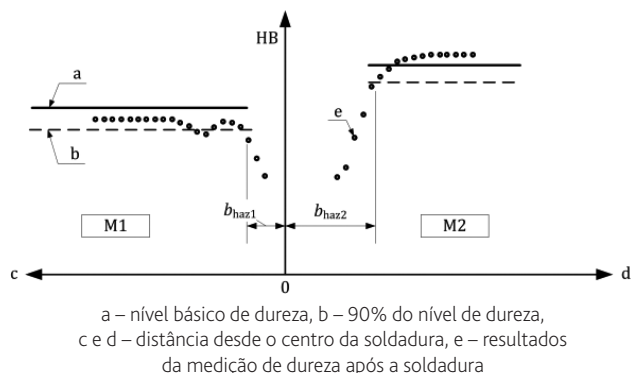


Figura 1 Esquema conceitual da determinação da HAZ através de ensaios de dureza (origem: EN 1999-1-1 [2])

O cálculo de forças resultantes do efeito de alavanca foi objeto de uma nova secção, sendo estabelecidas regras gerais para avaliação de resistência tendo em conta estas forças. Foi também adicionada a secção relativa à verificação da alma de colunas sujeitas a tração e compressão transversais.

Os Anexos M e P (anteriormente L e M), relativos a classificação das juntas e às juntas coladas, respetivamente, são idênticos nas duas versões da Norma, apenas com ligeiras alterações de forma e algum conteúdo adicionado.

Justifica-se a inclusão do novo Anexo U, relativo às vigas compostas de alumínio-betão, face às vantagens deste tipo de elementos, que são, principalmente, o baixo peso e a manutenção reduzida. As recomendações básicas dadas na EN 1994-1-1 [7] aplicam-se também às secções das vigas compostas de alumínio-betão desde que sejam tidos em conta os aspetos particulares das ligas de

1 Metal Inert Gas

2 Tungsten Inert Gas

alumínio e da sua tecnologia, conforme salientado no Anexo U. Os problemas distintivos destes sistemas compostos são:

- A possibilidade de aplicação da teoria convencional do betão armado;
- Os pressupostos de verificação das secções planas até ao colapso;
- Os efeitos da viscosidade do betão;
- O comportamento do sistema de ligação mecânica entre a viga e a laje de betão e a sua influência na resposta à flexão e ao corte da estrutura.

No caso das vigas de alumínio-betão são relevantes as seguintes particularidades a que este anexo procura dar resposta:

- O comportamento não linear dos materiais afeta a resposta estrutural das vigas devido às características específicas e à ductilidade disponível das ligas de alumínio, bem como devido ao baixo valor da relação entre módulos de elasticidade (2 a 3 para betão-alumínio enquanto é de 7 a 10 no caso dos sistemas mistos aço-betão).
- No que diz respeito aos sistemas de ligação, são propostas algumas soluções específicas, explorando características mecânicas e tecnológicas das ligas de alumínio.
- O problema da interação química entre os materiais em contacto deve ser avaliado sempre que exista exposição a um ambiente agressivo ou quando ocorrer a presença de cloretos que possam afetar o material da viga.
- Os estados de tensão gerados por variações térmicas, devido aos diferentes valores dos coeficientes de expansão térmica e aos estados de tensão devidos à retração e viscosidade do betão, devem ser avaliados com modelos apropriados.

4 Evolução e principais alterações na EN 1999-1-3

O objetivo desta secção é apresentar as principais alterações técnicas efetuadas na revisão da EN 1999-1-3:2007. A versão revista foi posteriormente publicada, em março de 2023, como EN 1999-1-3 Eurocode 9: *Design of aluminium structures - Part 1-3: Structures susceptible to fatigue* [4].

Em geral, as principais mudanças em relação à edição anterior estão listadas a seguir:

- Uma reorganização do texto e da sua coerência com a EN 1999-1-1 [2] e os outros Eurocódigos;
- Melhorias nas figuras;
- Atualização do quadro J.9 com pormenores construtivos para as soldaduras com cordão de ângulo e para as soldaduras com penetração parcial;
- Melhoria dos pormenores construtivos do quadro J.13;
- Melhoria nos pormenores construtivos do quadro J.15 – Ligações aparafusadas;
- Inclusão da Soldadura por Fricção Linear (FSW – *Friction Stir Welding*) no âmbito de aplicação;

- Inclusão de pormenores construtivos para membros fabricados com Soldadura por Fricção Linear (novo quadro J.17).

Em concreto, as principais alterações relativamente à edição de 2007 encontram-se identificadas na Quadro 1.

5 Evolução e principais alterações na EN 1999-1-4

As principais alterações em relação à edição anterior são listadas a seguir:

- Reorganização do texto e da sua coerência com a EN 1999-1-1 [2] e os outros Eurocódigos;
- Novas disposições gerais para perfis enformados a frio (ou seja, não apenas chapas perfiladas);
- Novas disposições relativas ao sistema de sobreposição de chapas, com sobreposição simples ou dupla;
- Novas disposições relativas a chapas de perfil trapezoidal, com sobreposição lateral;
- Clarificação do comportamento de diafragmas na extremidade de edifícios;
- Melhoria da redação e atualizações editoriais.

O número de parâmetros determinados a nível nacional foi reduzido de sete para quatro.

Em especial, esta nova versão da norma inclui os perfis dos tipos a e c apresentados na Figura 2 para os quais é válido o procedimento para cálculo da encurvadura por torção ou por flexão-torção previsto na parte EN 1999-1-1 [2], enquanto para os perfis do tipo b a encurvadura por distorção pode ser analisada com recurso a métodos numéricos (elementos finitos, por exemplo).

No caso de chapas de perfil trapezoidal, as novas disposições referem-se aos modos de ligação a adotar e destinam-se também a refletir a contribuição dos diferentes modos de sobreposição no comportamento mecânico desses conjuntos.

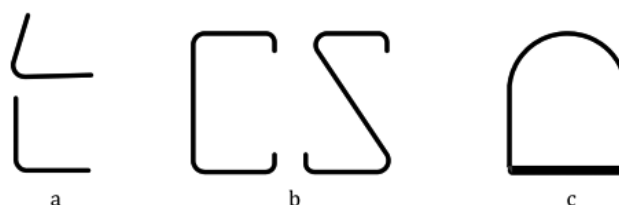


Figura 2 Exemplos de secções de perfis enformados a frio (a e b) e de uma secção transversal de um componente enformado a frio (origem: EN 1999-1-4 [5])

6 Evolução e principais alterações na EN 1999-1-5

Listam-se a seguir as principais alterações em relação à edição anterior:

- Reorganização do texto e a sua coerência com a EN 1999-1-1 [2] e os outros Eurocódigos;

Quadro 1 Alterações à norma EN 1999-1-3: 2007 vs. 2023

N.º	Secção	Em 2007	Em 2023
1	D.3.1.1 Elementos-Viga	A análise das tensões induzidas por empeno é impossível quando se consideram estruturas abertas de paredes finas.	A análise das tensões induzidas por empeno é impossível quando se consideram membros de secção aberta ou membros de secção oca propensos ao empeno, a menos que se utilizem elementos viga adequados, com 7 graus de liberdade, incluindo o empenamento.
2	Quadro J.11, Figura J.7, Quadro J.14		Na legenda do Quadro J.11, da Figura J.7, da Quadro J.14 onde se lia vigas, deve ler-se membros.
3	Quadro J.9	Na versão anterior da EN 1999-1-3 [8] não havia distinção entre cordões de soldadura de ângulo com transferência de carga e soldaduras com penetração parcial e com transferência de carga.	O Quadro J.9 inclui agora categorias de detalhe para as soldaduras com cordão de ângulo e para as soldaduras com penetração parcial.
4	Quadro J.13	Na legenda do Quadro J.13 mencionavam-se apenas as vigas.	Na legenda do Quadro J.13 mencionam-se agora "membros" em vez de vigas. Simultaneamente, ocorreu a inclusão de um pormenor construtivo adicional para cordões de ângulo com fendas a partir do pé do cordão.
7	Quadro J.15 Ligações soldadas	–	Clarificação dos pormenores construtivos e extensão do Quadro J.15.
8	7.4.2 (1) Cálculo das tensões nas soldaduras	–	Melhoria da figura 7.3 e da fórmula de cálculo da soma das tensões atuantes na garganta do cordão.
9	Categoria de detalhe para membros com soldadura por fricção linear	–	Novos quadros e uma nova figura no Anexo J. Orientações para avaliação de fadiga de estruturas de liga de alumínio contendo juntas feitas por FSW.
10	Quadro J.9, Detalhes 9.4 e 9.5	Na EN 1999-1-3 [8], detalhe tipo 9.4 e 9.5 "Arredondamento unilateral ou penetração parcial de cordões", supõe-se que não haja deformação fora do plano da placa. Um caso típico é uma seção oca retangular que é fixada a uma extremidade de uma placa. Se o rácio b/t da flange é pequeno esta deformação é pequena, mas para uma placa delgada o momento de flexão devido à excentricidade da solda pode resultar em tensão de flexão, o que pode reduzir a resistência à fadiga.	Foi adicionada uma largura efetiva da flange na avaliação da resistência à fadiga.
11	Anexo K fórmula (k.1)	Erro de impressão da fórmula.	Fórmula foi corrigida.
12	Anexo L, cláusula L.5.2	As categorias de serviço aparecem denominadas SC1 e SC2 na EN 1999-1-1 [2] ou EN 1090-3 [9].	Correção feita para estruturas soldadas e não soldadas.
13	Anexos B, C, D, E, F, G, I, J, L	–	Foi adicionada informação sobre o âmbito e campo de aplicação de cada anexo.
14	Anexo J, Figura J.6 e Quadro J.12	Falta uma curva na Categoria de detalhe 32-3,4.	Categoria de detalhe adicionada na Figura J.6 e Quadro J.12. Foram também corrigidos os valores do Quadro J.10.
15	5(3)	A soldadura por fricção linear não aparece na lista de dispositivos de ligação.	Foi adicionada a soldadura por fricção linear na lista de dispositivos de ligação.

- Atualização do Anexo A relativo às fórmulas de encurvadura para garrafas, cones e esferas;
- Nova formulação, mais exata, para os fatores de redução de imperfeição indicados no Anexo A, relativa aos reservatórios reforçados e não reforçados sob carga axial, pressão circunferencial e corte, incluindo o caso de compressão axial com pressão interna coexistente;
- Melhor ajustamento das curvas de encurvadura aos dados disponíveis de referência, tendo igualmente em conta a já referida adição de uma nova classe de materiais na EN 1999, que conduziu a três classes de encurvadura A, B e C;
- Melhoria na coerência com o correspondente documento do EC3 (EN 1993-1-6 [10]);
- Melhoria da redação e atualizações editoriais.

Os parâmetros determinados a nível nacional, que na primeira geração desta parte eram dois, foram eliminados nesta geração, sendo apenas permitida a escolha nacional relativamente à aplicação do Anexo B.

7 Considerações finais

A nova geração do Eurocódigo 9 incorpora não só as correções necessárias, mas também desenvolvimentos técnicos que advêm de uma aplicação mais frequente de tecnologias que, à data da primeira geração, eram emergentes, mas de aplicação ainda algo limitada, como é o caso da soldadura por fricção. Noutras situações, a aplicação prática do Eurocódigo ditou a necessidade de este incorporar formulações mais rigorosas para a previsão do comportamento estrutural (por exemplo, os aspetos relacionados com a revisão das curvas de encurvadura) ou um maior rigor na avaliação das características do material (por exemplo, a determinação experimental da zona termicamente afetada pela execução da soldadura). A intenção de serem reduzidas as barreiras técnicas nacionais na atividade de projeto de estruturas, nomeadamente através da redução dos parâmetros determinados a nível nacional, teve algum sucesso no Eurocódigo 9, embora estes continuem a existir, tendo o seu número sido reduzido de 71 para 59.

A utilização no meio técnico nacional do alumínio na arquitetura tem-se enquadrado sobretudo no âmbito da caixilharia exterior, incluindo as fachadas leves. O futuro desafio consiste em estender a aplicação do alumínio a estruturas em que as suas características se revelem potencialmente mais vantajosas do que as do aço. É aqui que a existência de um código de projeto coerente e completo constitui um passo fundamental conferindo segurança e credibilidade ao desenvolvimento de projeto de estruturas de alumínio. A semelhança existente na constituição entre os Eurocódigos 3 (estruturas de aço) e 9 poderá facilitar a transição dos projetistas para a utilização do alumínio, potenciando a sua aplicação mais ampla.

Agradecimentos

Luís Reis agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o apoio financeiro concedido através do projeto LAETA Base Funding (DOI: 10.54499/UIDB/50022/2020).

Rui F. Martins agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, I.P.) o apoio financeiro concedido através dos projetos UIDB/00667/2020 e UIDP/00667/2020.

J. Pinho-da-Cruz agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o apoio dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020, DOI 10.54499/UIDB/00481/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/00481/2020>) e DOI 10.54499/UIDP/00481/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDP/00481/2020>).

Referências

- [1] M/515, 2012 – Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of Structural Eurocodes. Ref. Ares (2012)1516834 - 18/12/2012. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General, 2012.
- [2] EN 1999-1-1:2023 - Eurocode 9 – Design of aluminium structures - Part 1-1: General rules, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [3] EN 1999-1-2:2023 - Eurocode 9 – Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [4] EN 1999-1-3:2023 - Eurocode 9 – Design of aluminium structures - Part 1-3: Structures susceptible to fatigue, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [5] EN 1999-1-4:2023 - Eurocode 9 – Design of aluminium structures - Part 1-4: Cold-formed structural sheeting, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [6] EN 1999-1-5:2023 - Eurocode 9 – Design of aluminium structures - Part 1-5: Shell structures, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2023.
- [7] EN 1994-1-1: 2004 - Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures -Part 1-1: General rules and rules for buildings. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004.
- [8] EN 1999-1-3:2007 – Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-3: Structures susceptible to fatigue, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2007.
- [9] EN 1090-3:2019 – Execution of steel structures and aluminium structures - Part 3: Technical requirements for aluminium structures. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2019.
- [10] EN 1993-1-6: 2007 - Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2007.



O novo Eurocódigo 10 – Projeto de estruturas de vidro

The new Eurocode 10 – Design of glass structures

Armando Pinto

Resumo

A utilização do vidro na construção tem sofrido um profundo desenvolvimento ao longo das últimas décadas, passando de elemento simples de fechamento de vãos em caixilhos de reduzida dimensão para, em muitas obras, ocupar toda a envolvente exterior de construções, realizar pavimentos, guardas, revestimentos e compartimentação interior, assegurando a transparência nas obras, luz natural e bem-estar. Na primeira geração de Eurocódigos Estruturais, para as estruturas de vidro, foram definidas apenas algumas ações a que estas estruturas devem satisfazer, mas não as regras para o projeto, continuando a prevalecer as regras nacionais. Nesta segunda geração de Eurocódigos, tendo por base as regras existentes nos diversos países europeus, foi desenvolvido o “Eurocódigo 10 – Vidro Estrutural”, que harmoniza o projeto dessas estruturas, tendo em conta os estados limite de utilização e último, o estado limite pós-rotura do vidro e durante a rotura.

Neste artigo, apresentam-se de forma resumida as regras atualmente utilizadas em Portugal para o projeto de estruturas de vidro e os princípios gerais das regras de projeto do Eurocódigo 10, enfatizando as principais evoluções expectáveis para as estruturas de vidro no mercado português.

Palavras-chave: Vidro estrutural / Eurocódigos / Segurança / Projeto


Abstract

The use of glass in construction has undergone large development over the last few decades, going from a simple element in small windows to, in many cases, to fill the entire exterior envelope of buildings, creating floors, guards, claddings and interior divisions, ensuring transparency in the works, natural light and well-being. In the first generation of Structural Eurocodes, for glass structures, only some actions were defined that these structures must comply with, but not the rules for the design, with national rules continuing to prevail. In this second generation of Eurocodes, based on the rules existing in different European countries, “Eurocode 10 – Structural Glass” was developed, which harmonizes the design of these structures, taking into account the serviceability and ultimate limit states, the limit state after-glass fracture and during fracture.

In this article, will briefly be presented the rules currently used in Portugal for the design of glass structures and the general principles of the Eurocode 10 design rules, emphasizing the main expected developments for glass structures in the Portuguese market.

Keywords: Structural glass / Eurocode / Safety / Design

Armando Pinto

Presidente da SC 11 da CT 115
Investigador Principal
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal
 0000-0002-0633-9940
apinto@lnec.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

PINTO, A. – O novo Eurocódigo 10 – Projeto de estruturas de vidro. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 115-124.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-013>

1 Introdução

A utilização do vidro na construção tem sofrido um profundo desenvolvimento ao longo das últimas décadas, passando de elemento simples de fechamento de vãos em caixilhos de reduzida dimensão (Figura 1) para, em muitas obras, ocupar toda envolvente exterior de construções (Figura 1), realizar pavimentos, guardas, revestimentos e compartimentação interior, assegurando a transparência nas obras, luz natural e bem-estar. Atendendo à expressiva dimensão das estruturas de vidro na envolvente das construções estas têm de satisfazer diversas exigências nomeadamente: transmissão de luz, sol e vista, isolamento térmico e sonoro, estanquidade e segurança. Este aumento da área envidraçada e das exigências aplicáveis, conduziu ao desenvolvimento de vidros tecnologicamente avançados, com capas de isolamento térmico e proteção solar para assegurar a eficiência energética e a mitigação e adaptação às alterações climáticas, películas de laminado de segurança e de isolamento sonoro, sendo possível conceber envolventes totalmente envidraçadas em edifícios confortáveis e sustentáveis. Assim, as estruturas de vidro tornaram-se um dos elementos preponderantes no orçamento de uma obra nova ou de uma renovação, sendo a otimização das soluções importante para a sustentabilidade. A procura de envolventes envidraçadas e cada vez mais transparentes, tem conduzido também à utilização do vidro não só como elemento de preenchimento de fachadas, pavimentos e coberturas, mas também com a função viga/pilar de estruturas de vidro. Para os desenhos mais recentes de uma arquitetura mais orgânica, a utilização de vidro curvo torna-se frequente.

A conceção e projetos de estruturas de vidro assenta essencialmente em regras nacionais, vocacionadas para a utilização de vidro em caixilharia, deixando as aplicações mais inovadoras do vidro para estudos de homologação e avaliação técnica [1], [2].

Neste artigo, apresenta-se de forma resumida as regras atualmente utilizadas em Portugal para o projeto de estruturas de vidro e os princípios gerais das regras de projeto do Eurocódigo 10, que abrange um leque mais alargado de soluções de fixação de vidro e de utilizações de vidro.



Figura 1 Exemplos de utilização de vidro

2 Organização do Eurocódigo 10

O Eurocódigo 10, relativo ao projeto de estruturas de vidro, foi desenvolvido pela “Subcomissão 11 – Vidro Estrutural” do CEN/TC

250, encontrando-se dividido em três partes:

- Eurocódigo 10 – Projeto de estruturas de vidro – Parte 1: Regras gerais [3];
- Eurocódigo 10 – Projeto de estruturas de vidro – Parte 2: Componentes de vidro carregados fora do plano [4];
- Eurocódigo 10 – Projeto de estruturas de vidro – Parte 3: Componentes de vidro carregados no plano [5].

Além das três partes citadas, a Subcomissão 11 elaborou uma Especificação Técnica para a seleção do tipo de vidro para reduzir o risco de lesões humanas [6].

A SC 11 do CEN/TC 250 prevê a publicação do Eurocódigo 10 em 2026, a preparação dos respetivos anexos nacionais até setembro de 2027 e a revogação das regras nacionais em 2028. Os três projetos de norma atrás referidos, elaborados pela Subcomissão 11, encontram-se aprovados.

O Eurocódigo 10 foi desenvolvido tendo por base um trabalho inicialmente realizado pelo *Joint Research Centre* [7], de levantamento das regras de projeto de estruturas de vidro (Figura 1), de forma a permitir a harmonização das regras a nível europeu e a

utilizar o conhecimento mais atual. Na conceção do Eurocódigo 10, esteve subjacente que:

- o vidro é um material frágil “perfeito”, sem ductilidade;
- uma chapa de vidro pode partir a qualquer momento;
- uma chapa de vidro pode partir sem causa aparente;
- o projeto de estruturas de vidro é um projeto de robustez.

A parte 1 do Eurocódigo 10, estabelece os princípios de segurança a considerar no projeto de estruturas de vidro, descreve a campo de aplicação, os tipos de vidro abrangidos e respetivas normas e propriedades relevantes (Quadro 1). A parte 2 do Eurocódigo 10 estabelece as regras para o projeto de estruturas de vidro com ações perpendiculares ao plano do vidro, enquanto a parte 3 estabelece as regras de projeto para estruturas de vidro sujeitas a ações no plano do vidro, nomeadamente devido a juntas mecânicas, ações transmitidas por outros componentes da estrutura ou ações aplicadas nas arestas dos vidros. A Especificação Técnica que ainda não faz parte do Eurocódigo 10, mas que se prevê que venha a ser a parte 4 deste Eurocódigo, permite a seleção do tipo de vidro para prevenir lesões humanas, nomeadamente para reduzir o

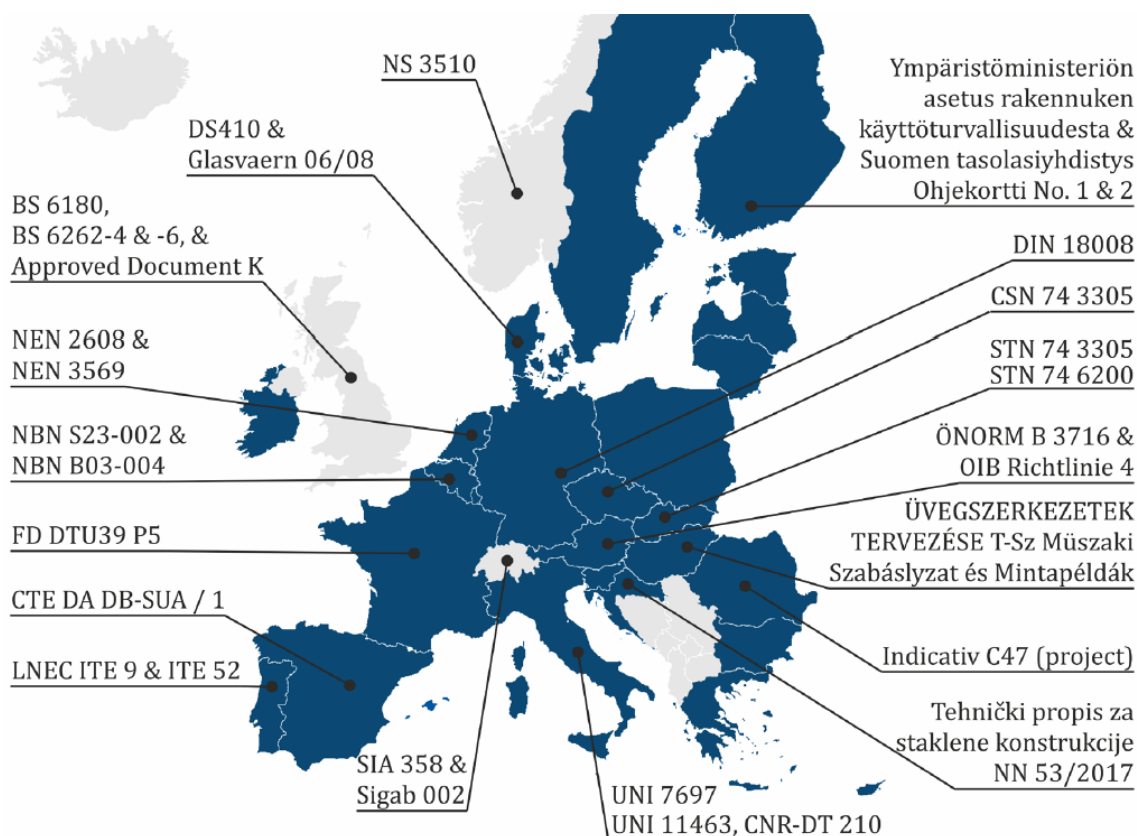
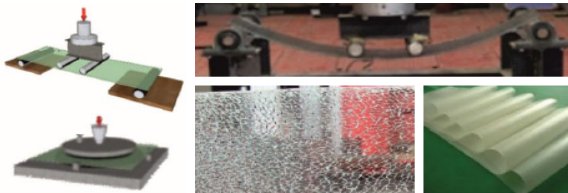
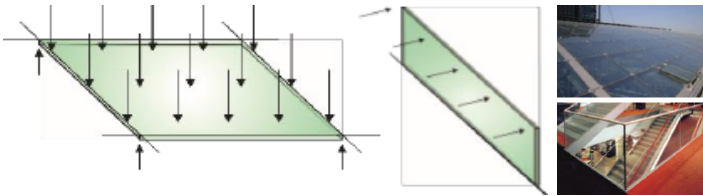
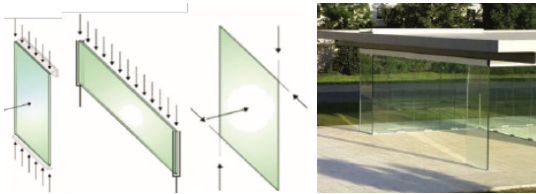
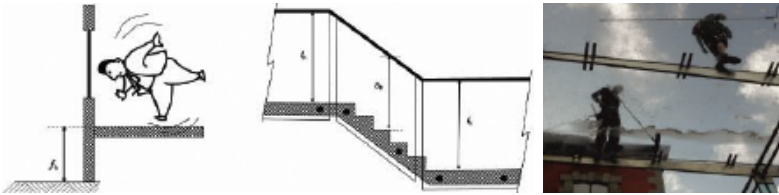


Figura 2 Regras nacionais de projeto identificadas no estudo base do Eurocódigo 10¹

¹ Reprinted with authorisation of CEN, copyright ©CEN, rue de la Science 23, 1040 Brussels, Belgium

Quadro 1 Resumo da abrangência das Partes do Eurocódigo 10²

Parte 1 – Regras gerais	<ul style="list-style-type: none"> • Aspectos de segurança, robustez e princípios do projeto • Normas de produto, tipos de vidro • Características de resistência do vidro e outras propriedades 	
Parte 2 – Componentes de vidro carregados fora do plano	<ul style="list-style-type: none"> • Vidro com ações perpendiculares • Vidro sem ações de outras partes da estrutura • Cálculo do vidro laminado e vidro duplo 	
Parte 3 – Componentes de vidro carregados no plano	<ul style="list-style-type: none"> • Vidro com ações axiais nas arestas • Vidros sujeitos a ações de outras partes da estrutura • Juntas mecânicas 	
"Parte 4 – Seleção do vidro"	<ul style="list-style-type: none"> • Relacionado com o risco de ferimento humano • Guia de especificação 	

risco de ferimentos causados por fragmentos de vidro e prevenir o atravessamento do vidro, em caso de impacto. A parte 2 do Eurocódigo vem atualizar e completar a norma EN 16612 [8], [9], nomeadamente contemplando as classes de consequência CC1, CC2 e CC3.

3 Situação atual

O projeto de estruturas e elementos de vidro em Portugal, teve uma forte influência das normas francesas [10], por via do Manual do Vidro [11], onde se acautelavam aspectos de segurança face à ação do vento, impacto, choque térmico e de segurança face a risco de ferimentos. Com a publicação do Regulamento de Segurança e Ações [12], na avaliação da resistência dos vidros passaram a ser adotadas as ações definidas nesse regulamento, continuando a estimar-se as propriedades de resistência mecânica do vidro derivadas das normas francesas [10]. Tendo em conta que a resistência mecânica do vidro é condicionada pelas suas condições de apoio e tipo de utilização, em Portugal, ao longo do tempo foram publicadas Especificações Técnicas do LNEC relacionadas com o uso e segurança do vidro [13],

[14]. Na ITE 52 [14], o projeto de estruturas de vidro contempla os seguintes tipos de requisitos:

- segurança contra choques - visualização do vidro transparente;
- redução do risco de queda em altura;
- redução do risco de ferimentos causados por fragmentos de vidro e resistência residual do vidro;
- segurança no acesso para limpeza dos envidraçados;
- proteção elementar de bens;
- resistência ao vento;
- resistência ao choque térmico.

O dimensionamento do vidro para resistir à ação do vento [14], tem por base o comportamento linear elástico de placas com pequenas deformações comparadas com a sua espessura. Esta abordagem para avaliar a resistência dos vidros é conservativa, pois as deformações do vidro são normalmente superiores, alterando a sua geometria e desenvolvem-se tensões de membrana que deveriam ser avaliadas com modelos não-lineares. Para a ação do vento, numa fase inicial foi considerada a ação do vento decorrente do RSA [12] e mais recentemente é adotada a ação definida na parte 1.4 do Eurocódigo 1[15], que em algumas situações agrava de forma

² Reprinted with authorisation of CEN, copyright ©CEN, rue de la Science 23, 1040 Brussels, Belgium

significativa a ação do vento a considerar no projeto de estruturas de vidro. Para as características de resistência mecânica do vidro recozido, temperado, temoendurecido, laminado e duplo, são considerados valores de cálculo (R_d) de cerca de metade do valor característico da tensão de rotura à flexão do vidro (R_k) [14]. O dimensionamento é realizado para o estado limite último de rotura do vidro e para o estado limite de utilização (flecha do vidro). As flechas limite para a deformação do vidro foram estabelecidas [14] para prevenir a degradação da selagem dos vidros duplos e para prevenir deformações excessivas do vidro que possam causar preocupação nos ocupantes dos espaços, como sucede noutros países [7].

Para o projeto de estruturas de vidro, além das especificações anteriores, existem especificações para selecionar as características de desempenho de caixilharia exterior (janelas, portas e fachadas-cortina) [16], [17], [18] e para as condições de fixação do vidro em caixilhos [19], que têm sido também utilizadas no projeto de estruturas de vidro.

As regras de projeto atrás enunciadas, para avaliar a resistência à ação do vento, aplicam-se a vidros fixos mecanicamente e simplesmente apoiados em mais de um lado. Para vidros com fixações pontuais, vidros encastrados num lado, vidros colados e outras soluções consideradas inovadoras, são aplicáveis regras específicas definidas no âmbito da homologação ou avaliação técnica dos sistemas, contendo a ITE 52 [14] especificações que devem ser observadas ao nível da segurança, tipo de vidros e avaliação da resistência residual.

4 Eurocódigo 10

O Eurocódigo 10, estabelece as regras para o projeto de estruturas de vidro, abrangendo um conjunto de soluções e aplicações mais amplo do que o atualmente existente e utilizado em Portugal. A parte 1 do Eurocódigo 10 define as regras de projeto de estruturas de vidro, montagens e componentes, tendo em conta requisitos:

- resistência;
- capacidade de serviço;
- características de rotura e consequências das falhas nos componentes de vidro em relação à segurança humana;
- robustez e redundância nas estruturas de vidro.

O projeto de estruturas de vidro é realizado para prevenir a respetiva rotura e deformação excessiva, mas também para a condição em que o vidro pode partir devido ao seu comportamento frágil e para o período subsequente até à respetiva substituição, prevenindo danos humanos e materiais relacionados com a queda de fragmentos de vidro partido e com as aberturas na estrutura de vidro.

Para o projeto da estrutura de vidro deve ser selecionada a classe de consequência (CC1 a CC3) aceitável relacionada com a perda de vidas humanas, ferimentos e consequências económicas, sociais ou ambientais, de acordo com o especificado na EN 1990 [20]. Tendo em conta esta necessidade de robustez e redundância nas estruturas de vidro, no projeto deve começar-se por selecionar também o tipo de vidro, em função do tipo de rotura aceitável para o uso previsto, de acordo com as regras especificadas na Especificação Técnica do Eurocódigo 10 [6]. Com base nestes princípios, deve então proceder-

se ao dimensionamento da estrutura de vidro, considerando:

- estado limite de utilização (SLS);
- estado limite último (ULS);
- estado limite de fratura (FLS), durante um evento de fratura do vidro;
- estado limite pós-rotura (PFLS), em que o vidro já se encontra fraturado.

A avaliação da conformidade dos estados limite, pode ser realizada por cálculo ou por ensaio. A verificação de SLS encontra-se normalmente associada à verificação de deformações aceitáveis, para o funcionamento da estrutura de vidro, para prevenir a degradação da estrutura e seus componentes e para não se refletir em insegurança nos utilizadores. A verificação do ULS, encontra-se normalmente relacionada com a verificação de que a capacidade resistente da estrutura é superior aos esforços atuantes. O projeto para os estados limite relacionados com a rotura do vidro (FLS e PFLS) proporcionam os meios para alcançar robustez e redundância na estrutura de vidro, pois devido ao comportamento frágil do vidro existe sempre o risco de rotura deste. Os estados limites FLS e PFLS reportam-se a uma condição de projeto de acidente. O estado limite FLS, destina-se a reduzir os danos durante o evento de rotura do vidro, prevenindo a queda de fragmentos de vidro partido perigosos e o atravessamento do vidro, considerando a ação de choque e a ação estática. O estado limite PFLS considera ação estática e ação dinâmica a verificar, durante um período de tempo limitado, que permita a identificação do vidro partido e tomar as medidas preventivas necessárias a mitigar eventuais danos. Nestes estados limites acidentais (FLS e PFLS), pode considerar-se a rotura de uma chapa de vidro ou de todo o vidro (vidro duplo, vidro laminado).

Tendo em conta os diferentes estados limites a adotar no projeto de estruturas de vidro, além da classe de consequência (CC), no Eurocódigo 10 é introduzido o conceito de “cenários de estado limite” (LSS – *Limit State Scenarios*), que deverá ser definido por cada Estado Membro no Anexo Nacional à norma, Quadro 2.

Quadro 2 Cenários de estado limite (LSS)

Condição de projeto	LSS-0	LSS-1	LSS-2	LSS-3
Vidro não fraturado	SLS ULS	SLS ULS	SLS ULS	SLS ULS
Situação de fratura do vidro (rotura segura do vidro)		FLS		FLS
Situação pós-fratura do vidro (resistência residual do vidro partido)			PFLS	PFLS

As ações e a combinação das ações a considerar no projeto (E_d) são as definidas na EN 1990 [21] e no Eurocódigo 1. Contudo, no dimensionamento dos vidros duplos e com caixa de ar/gás, em conjunto com outras ações, devem ser consideradas as diferenças de pressão relacionadas com a variação de temperatura e de altitude/pressão atmosférica definidas no Anexo C, da Parte 2 do Eurocódigo 10, que segue a metodologia da norma EN 16612 [8]. A verificação do risco de choque térmico é realizada considerando as diferenças

de temperatura na massa de vidro e não se consideram as restantes ações.

A parte 1 do Eurocódigo 10 define os valores característicos da resistência à flexão do vidro, com base nas respetivas normas de produto, encontrando-se um resumo dos respetivos valores no Quadro 3. Esta norma também define as características para a película de laminado, colagem dos vidros duplos, calços e vedantes.

Quadro 3 Valores característicos da resistência à flexão do vidro ($f_{b,k}$ em MPa)

Tipo de vidro	Recozido ($f_{g,k}$)	Temperado e temperado com Heat Soak ($f_{b,k}$)	Termoendurecido ($f_{b,k}$)	Quimicamente reforçado ($f_{b,k}$)
Norma	EN 572	EN 12150-1 e EN 14179-1	EN 1863-1	EN 12337-1
Float	45	120	70	150
Impresso	17-33	90	55	100
Aramado	27	–	–	–
Esmaltado	–	75	45	–

A análise da estrutura de vidro, cálculo de tensões, forças e deformações, deve ser realizada utilizando um modelo linear para o comportamento da chapa de vidro, podendo, para outros materiais (laminado, cola, vedantes, calços, etc), ser utilizados modelos não-lineares. Os efeitos não-lineares na estrutura de vidro (ex. efeito de membrana no cálculo de placas) têm de ser considerados se forem desfavoráveis, podendo ser utilizados se forem favoráveis. No projeto, devem ser considerados os efeitos locais e de concentração de tensões, por exemplo nas fixações mecânicas pontuais e entalhes no vidro.

Na avaliação de estruturas com vidros laminados, devido ao efeito viscoelástico da película, na parte 2 do Eurocódigo 10 encontra-se prevista uma aproximação conservativa, que consiste em desprezar a ligação proporcionada pelo laminado (Figura 3a) ou então em considerar a ligação perfeita no laminado (Figura 3c) – adotando-se sempre a solução mais desfavorável. Por outro lado, o Eurocódigo 10 prevê também a possibilidade de realizar a simulação do efeito viscoelástico do laminado, de forma analítica ou utilizando modelos numéricos (ver Anexo A prEN 19100-2 [4], Figura 3, b).

Na avaliação do estado limite último, deve ser verificado para cada seção que o valor do efeito da ação de projeto (E_d) não é superior ao valor da capacidade resistente de projeto do vidro (R_d), equação (1), em que E_d corresponde ao valor da tensão principal na superfície do vidro (σ_{princ,E_d}), ou esforço ($N_{E_d}, V_{E_d}, M_{E_d}$).

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

Na avaliação da resistência mecânica do vidro (R_d) devem ser considerados os fatores parciais (Quadro 4) para a resistência do vidro e seus componentes (γ_M) bem como para as pré-tensões superficiais induzidas no tratamento do vidro (γ_p), em função da

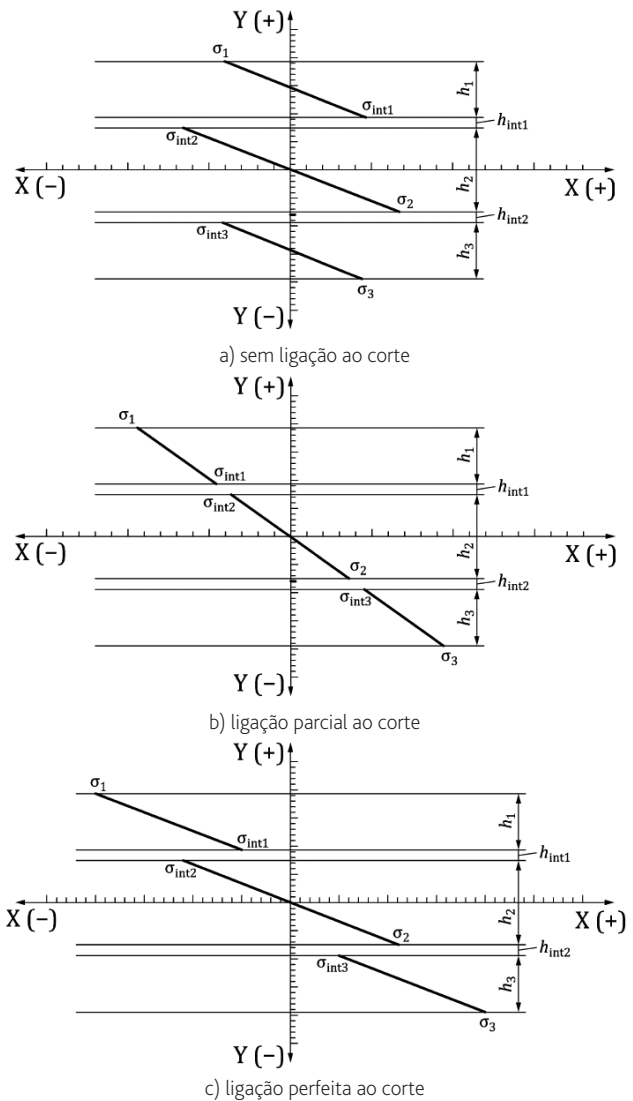


Figura 3 Aproximações para a modelação aos esforços de corte na película de laminado e distribuição das tensões de flexão no vidro

classe de consequência aplicável, o que se reflete numa evolução face às regras atuais.

O valor da capacidade resistente de projeto do vidro (R_d), pode ser a resistência à flexão de projeto do vidro ($f_{g,d}$) ou os esforços resistentes ($N_{R,d}, F_{R,d}, M_{R,d}$). A resistência à flexão de projeto do vidro ($f_{g,d}$) é dada pela equação (2), podendo o Anexo Nacional adotar outro valor, considerando o efeito do tratamento dos bordos do vidro, a variação da resistência do vidro recozido com a duração da aplicação da ação, entre outros fatores.

$$f_{g,d} = \gamma_A \cdot \lambda_1 \cdot k_e \cdot k_{mod} \cdot \frac{k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_M} + k_p \cdot k_{e,p} \cdot \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{k_i \cdot \gamma_p} \quad (2)$$

Em que:

- $f_{g,d}$ resistência à flexão de projeto do vidro;
- $f_{g,k}$ resistência à flexão característica do vidro recozido (ver Quadro 2);
- $f_{b,k}$ resistência à flexão característica do vidro após tratamento para reforço da resistência mecânica (ver Quadro 2);
- γ_M coeficiente parcial do material (Quadro 4);
- γ_p coeficiente parcial relacionado com as tensões superficiais (Quadro 4);
- λ_A coeficiente da área do vidro, toma o valor 1, para vidros até 18 m²;
- λ_l coeficiente da largura do vidro, toma o valor 1, para vidro com a maior dimensão até 6 m;
- k_e fator de acabamento da aresta ou do furo, toma o valor 1 para vidro recozido com arestas lisas ou polidas e 0,8 nos restantes casos;
- k_{sp} fator do perfil da superfície (tem valores entre 0,36 e 1,0);
- k_{mod} fator de modificação (ver Quadro 5 para vidro recozido e 1 para todos os outros)
- k_p fator relacionado com o processo de aplicação da pré-tensão superficial (1,0 para tratamento térmico horizontal; 0,6 para tratamento térmico vertical);
- $k_{e,p}$ fator de pré-esforço no furo ou aresta (para vidro temperado e termoendurecido com arestas tratadas: 1,0 para ações perpendiculares ao vidro e 0,8 para ações no plano do vidro);
- k_i é o fator de interferência, considera o efeito benéfico entre as distribuições das resistências do vidro puro e a pré-tensão superficial (para a CC2, tem os valores 0,8 para vidro termoendurecido e temperado).

Quadro 4 Fatores parciais de resistência dos materiais γ_M e γ_p

Condição de projeto	Fator parcial	Classe de consequência		
		CC1	CC2	CC3
Permanente e transiente (combinação fundamental)	Material γ_M	1,6	1,8	2,0
	Pré-tensão superficial γ_p	1,1	1,2	1,3
Acidental	Material γ_M	1,0	1,1	1,2
	Pré-tensão superficial γ_p	1,0	1,0	1,0

Para um vidro com arestas tratadas sujeito à ação do vento (10 min), numa estrutura de classe de consequência CC2, é estimada uma resistência à flexão de projeto do vidro recozido ($f_{g,d}$) de 18 MPa, para o vidro termoendurecido de 44 MPa e para o vidro temperado de 96 MPa. Utilizando o modelo não-linear para avaliar as solicitações num vidro simples, com dimensões de 1,5 m x 2,0 m, para uma pressão de dimensionamento de 2000 Pa ao nível do SLS, a que corresponde um estado limite último de 3000 Pa, o Eurocódigo 10 com resistência à flexão de projeto do vidro de 18 MPa conduz a

uma estrutura de vidro com 6 mm de espessura, enquanto as regras nacionais em vigor são mais conservativas e requerem um vidro com uma espessura de 10 mm.

A avaliação do estado limite de utilização (SLS), envolve a avaliação da deformação da estrutura de vidro, encontrando-se previstas no Eurocódigo 10 classes de deformação em função da combinação de ações e do seu impacto na segurança da estrutura, Quadro 6. Nas partes 2 e 3 do Eurocódigo 10 são apresentadas propostas de limites para a flecha da estrutura de vidro e respetivos apoios, em função da classe de deformação. Por exemplo, para ações perpendiculares ao plano do vidro (ex. ação do vento) é preconizado o limite de flecha para vidro simplesmente apoiado nos 4 lados de 1/50 da menor largura do vidro, Quadro 7. Considerando a classe de deformação “2-SLS” do Eurocódigo 10, para o exemplo de cálculo apresentado anteriormente e para a diferença de pressão de 2000 Pa e vidro de 6 mm de espessura é estimada uma deformação máxima de 20 mm (flecha de 1/74), evidenciando assim a conformidade da espessura do vidro recozido para as condições de projeto SLS e ULS. Este exemplo mostra que para o vidro recozido a condição crítica de projeto é o ULS, enquanto para o vidro termoendurecido e temperado a condição limite de projeto pode ser o SLS, como sucede atualmente nas regras nacionais.

Quadro 5 Fator de modificação para vidro recozido (k_{mod})

Tipo	Duração da ação	Ação	k_{mod}	
Permanente	Permanente	Peso próprio, diferença de altitude caixa vidro duplo	0,29	
		Neve (3 a 4 semanas)	0,43	
		Ação vertical (1 semana)	0,45	
		Variação de temperatura ou da pressão atmosférica (8 h)	0,58	
Variável	Curta	Carga durante a manutenção (30 min)	0,69	
		Vento (10 min)	0,74	
		Guarda – multidões (5 min)	0,77	
		Guarda – utilização normal (30 s)	0,89	
	Muito curta	Muito curta	Guarda – utilização normal (30 s)	1,00
			Dinâmica	Impacto (100 ms)

Quadro 6 Classes de deformação [3]

Classe de deformação	Combinação de ações	Descrição	Exemplo
1-SLS	Frequente	Deformação ou deslocamento com relevância apenas estética	Deformação de cobertura, em que é assegurada a drenagem e sem efeitos negativos na selagem dos vidros duplos
2-SLS	Característica	Deformação ou deslocamento que afeta a integridade, funcionalidade ou durabilidade do vidro	Deformação de cobertura causando estagnação de água, que afeta durabilidade da selagem do vidro duplo
3-ULS	Fundamental	Deformação ou deslocamento que afetam a segurança	Piso de vidro ou parapeito desencaixa do suporte, deformação que leva a contato com materiais rígidos

Quadro 7 Valores típicos para os limites da flecha do vidro classe “2-SLS” [4]

Tipo de solução	Condições de apoio	Limite da flecha na aresta livre	Limite da flecha a meio do vidro
Vidro Simples e laminado	Apoio contínuo nos 4 lados	–	$L/50^a$
	Apoio contínuo em 2 ou 3 lados	$L/100^b$	–
	Apoios descontínuo em 2 ou 3 lados	$L/100^b$	$L/50^a$
	Fixação pontual	$L/100^b$	$L/50^a$
Pavimento	Apoio contínuo 4 lados	–	$L/200^a$
	Apoio contínuo 2 lados	–	$L/200^a$
Guarda	Encastrado continuamente em baixo	Deformação máxima 50 mm, a 1 m do pavimento	–
Vidro duplo	Apoio contínuo 4 lados	–	$L/50^a$
	Apoios contínuo 2 e 3 lados	$L/150^b$	–
	Fixação pontual	$L/150^b$	–

a lado menor
b lado sem apoio

Face à sensibilidade do vidro às rajadas e turbulência do vento, no anexo B (informativo) da parte 2 do Eurocódigo 10, encontra-se prevista uma metodologia para verificar as frequências próprias do vidro para as rajadas de vento e respetivos critérios.

Para assegurar o adequado apoio e fixação do vidro, o Eurocódigo 10 especifica também critérios para a entrega mínima na gola do vidro que devem ser respeitados, à semelhança do já preconizado nas regras nacionais [19].

No projeto de estruturas de vidro, para reduzir os esforços no vidro preconiza-se a independência deste face à subestrutura de apoio e a existência de folgas para compensar as dilatações térmicas entre o vidro e a estrutura [19]. Os possíveis movimentos da estrutura (ação do vento, peso próprio, sismos, fluência, etc.) devem ser tidos em conta nas condições de fronteira de apoio do vidro, encontrando-se previsto na norma EN 13830 uma metodologia para o efeito [22].

Na parte 3 do Eurocódigo, encontram-se previstas as condições de projeto de estruturas de vidro submetidas a ações no plano do vidro. Nesta parte do Eurocódigo, são introduzidas regras adicionais para a avaliação da instabilidade da estrutura de vidro, nomeadamente quando esta funciona como viga ou pilar, situação frequente em algumas soluções arquitetónicas mais recentes (ex. Figura 4, vigas de vidro laminado).

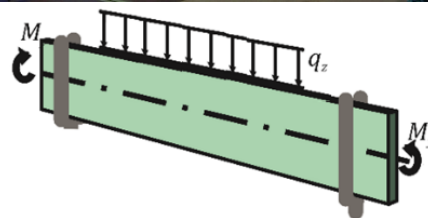


Figura 4 Ensaio de uma solução de viga de vidro sujeita à ação do vento

O Eurocódigo 10, nas suas três primeiras partes, tem condições de projeto para estruturas de vidro apoiadas em contínuo, vidros fixos pontualmente e vidros encastrados em apenas um dos lados e vidros fixos pontualmente, para os estados limite SLS, ULS, FLS, PFLS, bem como preconiza alguns tipos de vidro e redundância para assegurar a robustez da estrutura. É prevista a avaliação da estrutura de vidro

por cálculo utilizando principalmente o método dos elementos finitos e por ensaio.

A futura parte 4 do Eurocódigo 10, trata da seleção do tipo de vidro, em função da redução do risco de lesões humanas, relacionadas com:

- risco de lesão, no caso de colisão com o vidro (ex. divisória);
- risco de queda através do vidro (ex. guarda);
- risco de queda acidental de fragmentos de vidro sobre as pessoas que não causaram a rotura do vidro.

Esta parte do Eurocódigo ainda se encontra em desenvolvimento, devido às diversas regras nacionais em vigor condicionarem a harmonização necessária ao desenvolvimento da norma. As características de desempenho consideradas nesta parte 4, estão de certa forma alinhadas com as regras atualmente adotadas em Portugal [14], permitindo no anexo nacional os ajustamentos e evoluções pertinentes.

O Eurocódigo 10 não contempla regras específicas para o projeto de estruturas de vidro face à segurança contra arrombamento, vandalismo, balas, explosões, fogo e sismo, pese embora devam ser tidas em consideração as regras previstas nos restantes Eurocódigos relativas à ação do fogo, do sismo e outras ações acidentais.

5 Considerações finais e principais desafios para o meio técnico nacional

A aprovação, publicação e entrada em vigor do Eurocódigo 10 para o projeto de estruturas de vidro, disponibiliza ao meio técnico nacional um conjunto de regras estruturadas e que pondera as diversas ações e classes de consequências existentes na construção. Com o Eurocódigo 10, fica reforçado o projeto de estruturas de vidro para satisfazer os estados limite de utilização (SLS) e último (ULS), mas também para garantir segurança no caso de rotura de vidro por via dos estados limite de fratura (FLS) e pós-fratura (PFLS), que de certa forma são uma inovação face ao atual contexto regulamentar e se vão refletir no tipo de vidro e fixação a adotar. O Eurocódigo 10, vem também disponibilizar regras para estruturas de vidro do tipo viga e pilar.

O Eurocódigo 10 vai permitir a utilização de métodos de cálculo mais atuais e fiáveis no projeto, o que deverá ser objeto de apreciação pelo meio técnico nacional e permitir desenvolver o Anexo Nacional de cada uma das diferentes partes do Eurocódigo. Apresentou-se um exemplo, em que, pelas regras em vigor em Portugal seria necessário um vidro de 10 mm de espessura, enquanto utilizando os critérios do Eurocódigo 10 seria suficiente uma espessura de 6 mm, evidenciando o potencial de otimização proporcionado pelas metodologias de cálculo mais fiáveis para o efeito das ações e para a capacidade resistente do vidro.

O Eurocódigo 10 traz também um conjunto de condições de fronteira e requisitos que devem ser analisados e ponderados aquando da preparação do Anexo Nacional, nomeadamente o efeito da diferença de pressão na caixa de ar dos vidros duplos, o efeito do vidro laminado e as frequências próprias do vidro, considerando condições de projeto para a generalidade das condições de apoio e

fixação dos vidros.

Com a adoção, em 2027, da segunda geração de Eurocódigos Estruturais e com a publicação do Eurocódigo relativo a estruturas de vidro, considera-se que importa assegurar a necessária compatibilidade entre o nível da ação imposta e a capacidade resistente dos elementos, tendo em conta nomeadamente a vida útil das estruturas e o período médio de retorno a considerar na quantificação das ações, para que o período de transição entre as regras existentes e a implementação no futuro Eurocódigo 10 seja o mais harmonioso possível.

Por fim, existindo o desafio da reabilitação urbana e da renovação energética dos edifícios, preservando valores patrimoniais, sempre que possível, considera-se que na preparação do Anexo Nacional de cada uma das partes deste Eurocódigo é importante ter em conta as especificidades da reabilitação de estruturas de vidro.

Referências

- [1] RGEU – «Regulamento Geral das Edificações Urbanas». INCM. Lei n.º 38382 de 7 de agosto e posteriores alterações, Lisboa, 1951.
- [2] RPC – «REGULAMENTO (UE) N.º 305/2011 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 9 de Março de 2011 que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Directiva 89/106/CEE do Conselho». Jornal Oficial da União Europeia, Brussels, 2011.
- [3] prEN 19100-1 – «Eurocode 10 — Design of glass structures – Part 1: General rules». CEN/TC 250 N 3672, Bruxelas, 2023.
- [4] prEN 19100-2 – «Eurocode 10 — Design of glass structures – Part 2: Outof- plane loaded glass components». CEN/TC 250 N 3673, Bruxelas, 2023.
- [5] prEN 19100-3 – «Eurocode 10 — Design of glass structures — Part 3: Inplane loaded glass components», XX. CEN/TC 250 N 3674, Bruxelas, 2023.
- [6] prCEN/TS 19100-4 – «Design of glass structures – Part 4: Glass selection relating to the risk of human injury – Guidance for specification». CEN/TC 250 N 3423, Bruxelas, 2023.
- [7] Feldmann, M.; Kasper, R. – «Guidance for European Structural Design of Glass Components», *Report EUR 26439 EN*. JRC, 2014.
- [8] EN 16612 – «Glass in building - Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation». CEN, Bruxelas, 2019.
- [9] Feldmann, M. *et al.* – «The new CEN/TS 19100: Design of glass structures», *Glass Structures & Engineering*, vol. 8, n. 3, pp. 317-337, Out. 2023, doi: 10.1007/s40940-023-00219-y.
- [10] NF DTU 39 – «Travaux de vitrerie-miroiterie». CSTB, Paris, 1977.
- [11] Covina – «Manual do Vidro». Covina, Santa Iria da Azóia, 1986.
- [12] RSA – «Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes». INCM, Decreto Lei n.º235/1993., Lisboa, 1983.
- [13] Oliveira Braz, J.O. – «Tecnologia da aplicação da chapa de vidro em edifícios.» LNEC. ITE 9., Lisboa, 1980.
- [14] Pinto, A. – *Componentes de edifícios. Aspectos de segurança e resistência mecânica do vidro*. Lisboa: LNEC. ITE 52., 2008.
- [15] NP EN 1991-1-4 – «Eurocódigo 1: Ações em estruturas. Parte 1-4: Ações gerais – Ações do vento», 2009.
- [16] Mimoso, J.M. – «Ensaio de janelas. Sua escolha face à utilização.» LNEC. ITE 21, Lisboa, 1988.

- [17] Viegas, J.C.; de Oliveira Braz, A.J. – «Qualificação de componentes de edifícios. Selecção de janelas em função da exposição». LNEC. ITE 36., Lisboa, 1994.
- [18] Viegas, J.C. – «Componentes de edifícios. Selecção de caixilaria e seu dimensionamento mecânico». LNEC. ITE 51, Lisboa, 2006.
- [19] Pinto, A.; Fernando, O. – «Janelas e portas pedonais exteriores. Guia para a marcação CE (EN 14351-1:2006+A1:2010)». LNEC. ITE 56, Lisboa, 2010.
- [20] EN 1990 – «Eurocode - Basis of structural and geotechnical design - Part 1: New structures». CEN, Bruxelas, 2023.
- [21] NP EN 1990:2009/ /A1:2019 – «Eurocódigo – Bases para o projeto de estruturas». IPQ, Caparica, 2019.
- [22] EN 13830 – «Curtain walling - Product standard». CEN, Brussels, 2015.



2.^a geração das Partes 1-2 (verificação da resistência ao fogo) dos Eurocódigos Estruturais

2nd generation of Parts 1-2 (structural fire design) of the Structural Eurocodes

Paulo Vila Real

Resumo

Com a conclusão em 2007 da publicação das 58 partes que constituem os 10 Eurocódigos Estruturais, imponha-se mantê-los atualizados. O Comité Europeu de Normalização (CEN) lançou um programa de trabalho financiado pela Comissão Europeia, tendo em vista a revisão dos Eurocódigos existentes. Este programa, que também pretendeu tornar mais fácil a utilização dos Eurocódigos, reduzir o número de Parâmetros Determinados a Nível Nacional (NDPs) e harmonizá-los entre os vários países aderentes, deverá estar concluído em 2027. Neste artigo será feita uma descrição das alterações introduzidas nas Partes 1-2 relativas à verificação da resistência ao fogo conducentes à implementação da segunda geração dos Eurocódigos Estruturais.

Abstract

In 2007, the publication of the 10 Structural Eurocodes was concluded, which consists of 58 parts. However, it is essential to keep these codes updated. To achieve this, the European Committee for Standardization (CEN) has initiated a work program, funded by the European Commission, to review and revise the existing Eurocodes. This program, which also aims to make the use of Eurocodes easier, reduce the number of Nationally Determined Parameters (NDPs), and harmonize them among the different acceding countries, is expected to be completed in 2027. This article will describe the changes introduced in the current versions of Parts 1-2 related to structural fire design to implement the second generation of the Structural Eurocodes.

Palavras-chave: Verificação da resistência ao fogo das estruturas / Partes 1-2 / Eurocódigos / Segurança contra incêndios

Keywords: Structural fire design / Parts 1-2 / Eurocodes / Fire safety

Paulo Vila Real

Coordenador do GT 05 - Fogo da CT 115
Membro Conselheiro da Ordem dos Engenheiros
Prof. Catedrático
RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
ID 0000-002-7221-410X
pvreal@ua.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

VILA REAL, P. – 2.ª geração das Partes 1-2 (verificação da resistência ao fogo) dos Eurocódigos Estruturais. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 125-138.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-014>

1 Introdução

O Comité Europeu de Normalização (CEN) lançou, através do Mandato M/515 EN [1], um programa de trabalho financiado pela Comissão Europeia, tendo em vista a revisão dos Eurocódigos existentes e o desenvolvimento da segunda geração dos Eurocódigos Estruturais. A Comissão Técnica 250 do CEN (CEN/TC250), que tem a responsabilidade de desenvolver e manter atualizados os Eurocódigos Estruturais, aprovou aquele programa de trabalhos cujos aspetos essenciais definidos na resposta àquele mandato [2] foram os seguintes: 1) reduzir do número de Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDPs) nos Eurocódigos existentes; 2) melhorar a “facilidade de utilização” dos Eurocódigos atuais através da i) clarificação, quando necessário; ii) simplificação de regras de cálculo; iii) limitação, quando possível, da inclusão de regras de cálculo alternativas e; iv) não inclusão ou remoção das regras de reduzida utilização prática em projeto.

Em paralelo e complementarmente ao Mandato M/515 decorreu o período de revisão sistemática dos Eurocódigos em que os Estados-Membros foram convidados a responder às seguintes questões: 1. Há alguma secção que requeira correções técnicas ou editoriais?; 2. Que secções beneficiariam de uma clarificação?; 3. Que novos tópicos devem ser incluídos no Eurocódigo em causa?; 4. Onde pode o Eurocódigo em causa ser reduzido?; 5. Há alguma secção cuja aplicação conduz a construções antieconómicas? e; 6. Há alguma secção cuja aplicação necessita de um esforço de cálculo exagerado? As respostas a estas questões e os comentários adicionais foram enviadas pelos Estados-Membros à CEN/TC250 para serem eventualmente incluídos na segunda geração dos Eurocódigos Estruturais.

Neste artigo será feita uma descrição dos desenvolvimentos introduzidos nas partes relativas à verificação da resistência ao fogo da nova geração dos Eurocódigos Estruturais. Procurar-se-á destacar as alterações de maior relevância em cada Eurocódigo.

2 A segunda geração das Partes 1-2 dos Eurocódigos Estruturais

Todos os Eurocódigos Estruturais, com exceção do Eurocódigo (Bases para o projeto de estruturas), do Eurocódigo 7 (Projeto geotécnico) e do Eurocódigo 8 (Projeto de estruturas para resistência aos sismos), possuem a Parte 1-2, dedicada exclusivamente à verificação da resistência ao fogo das estruturas. As ações em estruturas expostas ao fogo estão definidas na Parte 1-2 do Eurocódigo 1 e as restantes Partes 1-2 dos outros Eurocódigos contêm as regras de dimensionamento e verificação da segurança em situação de incêndio para os diferentes materiais estruturais.

Em virtude da inter-relação entre algumas partes dos Eurocódigos, a resposta ao Mandato M/515 [2] definiu 4 fases de desenvolvimento da segunda geração dos Eurocódigos Estruturais. Dadas as repercussões que a EN 1991-1-2 [3] tem nas restantes partes dos Eurocódigos relativas à verificação da resistência ao fogo, foi criado um Grupo de Trabalho (SC1.T1) na fase 1 para tratar da sua evolução, de modo a estar concluída antes das outras partes iniciarem o seu processo de revisão.

Na fase 1 foi também criado o Grupo Horizontal Fogo (HG-FT1) para harmonizar as Partes 1-2 de todos os Eurocódigos Estruturais. O trabalho deste Grupo Horizontal culminou, com a proposta de uma estrutura comum a ser utilizada por todas as Partes 1-2 dos Eurocódigos. Assim, foi preparada uma proposta de índice harmonizado para todas as Partes 1-2 dos Eurocódigos Estruturais relativos aos vários materiais (EN 199x-1-2) que se apresenta em seguida [4]:

Secção 1 Objetivo

- 1.1 Objetivo da EN 199x
- 1.2 Objetivo da EN 199x-1-2
- 1.3 Pressupostos
- 1.4 Distinção entre Princípios e Regras de Aplicação

Secção 2 Referências normativas

Secção 3 Termos, definições e símbolos

- 3.1 Termos e definições
- 3.2 Símbolos e abreviaturas

Secção 4 Bases para o projeto

- 4.1 Generalidades
- 4.2 Curvas de incêndio nominais
- 4.3 Curvas de incêndio definidas com base física
- 4.4 Ações
- 4.5 Valores de cálculo das propriedades dos materiais
- 4.6 Métodos de verificação
- 4.7 Análise por elementos
- 4.8 Análise global da estrutura
- 4.9 Análise estrutural global

Secção 5 Propriedades dos materiais

- 5.1 Generalidades
- 5.2 Propriedades térmicas
 - 5.2.1 Material a
 - 5.2.1.1 Generalidades
 - 5.2.1.2 Emissividade
 - 5.2.1.3 Condutibilidade térmica
 - 5.2.1.4 Calor específico
 - 5.2.1.5 Massa volúmica
 - 5.2.2 Material b
 - 5.2.3 Material c

- 5.3 Propriedades mecânicas
 - 5.3.1 Material a
 - 5.3.1.1 Generalidades
 - 5.3.1.2 Extensão térmica
 - 5.3.1.3 ...
 - 5.3.2 Material b
 - 5.3.3 Material c
- 5.4 ...

Secção 6 Valores tabelados

- 6.1 Generalidades
- 6.2 ...

Secção 7 Modelos de cálculo simplificados

- 7.1 Generalidades
- 7.2 ...

Secção 8 Modelos de cálculo avançados

- 8.1 Generalidades
- 8.2 Análise térmica
- 8.3 Análise mecânica
- 8.4 Validação dos modelos de cálculo avançados

Secção 9 Disposições construtivas

- 9.1 Generalidades
- 9.2 ...

Todos os Eurocódigos seguiram esta estrutura. No entanto nem todos apresentam a secção 8, como o Eurocódigo 6 [5] ou a secção 9, como o Eurocódigo 3 [6]. Outros, como o Eurocódigo 5 [7], incluíram uma nova secção, neste caso, a Secção 9, que trata as ligações em estruturas de madeira, passando as disposições construtivas para a secção 10. Há ainda Eurocódigos, como o

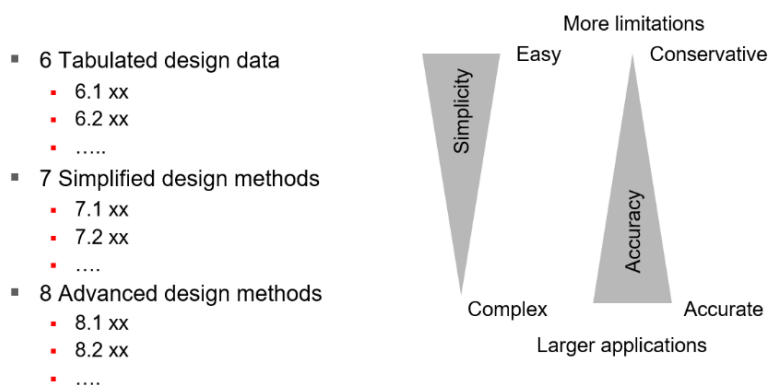


Figura 1 Proposta de conteúdos para as secções 6 a 8 de todas as Partes 1-2 (Fogo) dos Eurocódigos relativos aos vários materiais [4]

Eurocódigo 3 [6] e o Eurocódigo 9 [8], que embora não apresentem valores tabelados, mantiveram a Secção 6, para manter a estrutura pré-definida, informando em Nota que não são fornecidos valores tabelados.

De um modo geral os Eurocódigos permitem, para a verificação da resistência ao fogo das estruturas, a utilização de três metodologias de complexidade crescente, baseadas em: i) valores tabelados, ii) modelos de cálculo simplificados e iii) modelos de cálculo avançados. Para melhorar a facilidade de utilização, a clareza e a consistência entre todas as Partes 1-2 dos Eurocódigos relativos aos vários materiais, o Grupo de Trabalho Horizontal HG-FT1 propôs incluir em todas elas aqueles três procedimentos, mesmo que, como sucede na EN 1993-1-2 [6] e na EN 1999-1-2 [8], não sejam fornecidos quaisquer valores tabelados, como se viu. A sequência recomendada para as Secções 6 a 8 reflete o procedimento comum na verificação da resistência ao fogo das estruturas, desde o mais simples, baseado em valores tabelados (Secção 6), seguindo-se os modelos de cálculo simplificados (Secção 7) e finalmente os modelos avançados cálculo (Secção 8). A Figura 1 ilustra a proposta de índice harmonizado de conteúdos para as secções 6 a 8, feita pelo Grupo Horizontal Fogo (HG-FT1) [4].

Relativamente à redução do número de Parâmetros Determinados a Nível Nacional (NDPs), o Quadro 1 mostra claramente que houve um esforço em todos os Eurocódigos para conseguir essa redução.

Quadro 1 Redução de NDPs nas Partes 1-2 dos Eurocódigos

Eurocódigos	Número de Parâmetros Determinados a Nível Nacional (NDPs)		Número de Anexos informativos	
	1.ª Geração	2.ª Geração	1.ª Geração	2.ª Geração
Eurocódigo 1	10	4	7	8
Eurocódigo 2	16	3	5	3
Eurocódigo 3	5	4	3	0
Eurocódigo 4	8	3	9	1
Eurocódigo 5	5	3	6	4
Eurocódigo 6	7	6	4	2
Eurocódigo 9	6	4	2	2

Nas subsecções seguintes do presente artigo serão apresentadas as alterações introduzidas nas Partes 1-2 dos Eurocódigos Estruturais relativamente às suas versões atuais.

2.1 A EN 1991 – Eurocódigo 1: Ações em estruturas

A nova geração da EN 1991-1-2 [3], onde se definem as ações em estruturas expostas ao fogo, apresenta alterações a nível dos incêndios localizados, os quais se enquadravam nos designados “modelos de incêndio natural”, cuja designação passará a ser “modelos de incêndio com base física” (*Physically based models*). A

versão atual da EN 1991-1-2 [9] apresenta no seu Anexo C o Método de Heskestad que apenas permite calcular a temperatura ao longo do eixo vertical da chama do fogo localizado, como se mostra na Figura 2a e o Método de Hasemi que permite calcular o fluxo de calor incidente em perfis situados ao nível do teto e a uma distância r do eixo da chama, quando esta atinge o teto, como ilustra a Figura 2b. A nova geração da EN 1991-1-2 [3], introduz um novo método que permite avaliar a distribuição de temperatura na vertical, num pilar situado a certa distância do eixo da chama [3, 10].

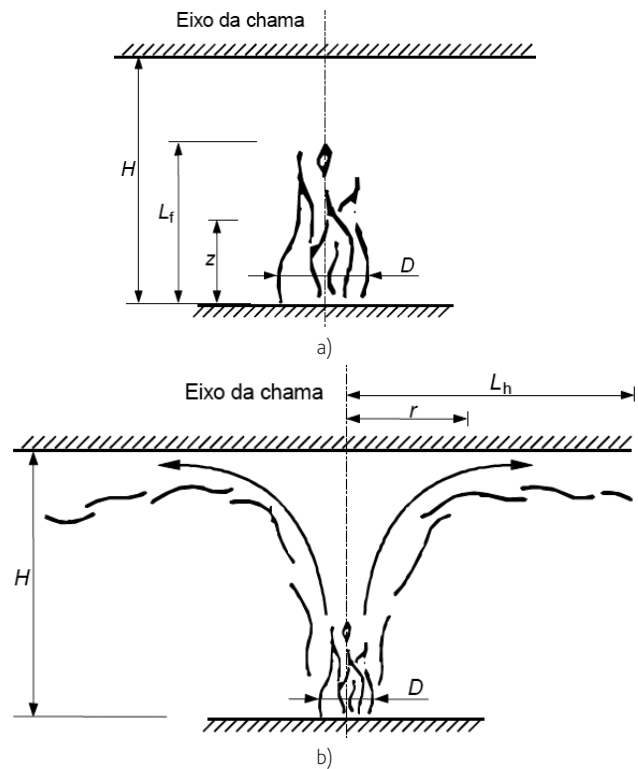


Figura 2 Fogo localizado. a) a chama não atinge o teto (método de Heskestad); b) a chama atinge o teto (método de Hasemi) [9]

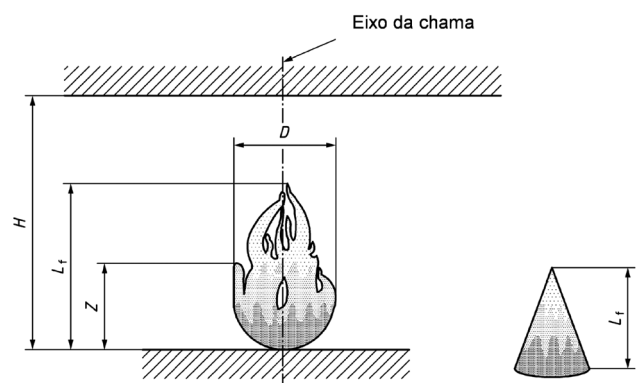


Figura 3 Fogo localizado em que a chama não atinge o teto (método de Heskestad) [3]

A nova metodologia de cálculo do efeito de fogos localizados introduz o conceito de chama virtual, a qual é considerada cónica como mostra a Figura 3 [3].

O Anexo E da EN 1991-1-2 [9] sofreu também algumas alterações nomeadamente na fórmula para obtenção do valor de cálculo da densidade de carga de incêndio, aqui reproduzida na Equação (1), que passa a incluir um novo fator (δ_{q3}) que tem em conta a classe de fiabilidade do edifício (ver Quadro 2) [3]. Por outro lado, houve um rearranjo na maneira de calcular o fator δ_n , que tem em conta as medidas ativas de segurança contra incêndios adotadas, que passa a depender de oito fatores, em vez dos dez fatores atuais. Estes fatores estão relacionados com i) os sistemas de extinção automática por água (*sprinklers*), ii) redes suplementares independentes, iii) deteção automática por calor, por fumo ou por ambos e alarme, iv) transmissão automática do alarme para o corpo de bombeiros, v) bombeiros no local ou fora do local, vi) vias de acesso seguras, vii) meios de 1ª intervenção e viii) sistemas de evacuação de fumos. O valor de cálculo da densidade de carga de incêndio continua a considerar a influência da dimensão do compartimento de incêndio (δ_{q1}) e do tipo de ocupação no risco de ativação do incêndio (δ_{q2}).

Quadro 2 Fator δ_{q3}

Classes de fiabilidade	Exemplos de edifícios	δ_{q3}
RC3	Bancadas, edifícios públicos em que as consequências do colapso são elevadas (por exemplo, uma sala de concertos)	1,19
RC2	Edifícios de habitação e de escritórios, edifícios públicos em que as consequências do colapso são médias (por exemplo um edifício de escritórios)	1
RC1	Edifícios agrícolas normalmente não ocupados permanentemente por pessoas (por exemplo armazéns), estufas	0,83

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot \delta_{q3} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad (1)$$

em que

m fator de combustão [3, 9];

δ_{q1} fator que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento [3, 9];

δ_{q2} fator que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação [3, 9];

$\delta_n = \prod_{i=1}^8 \delta_{ni}$ fator que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio, i (*sprinklers*, deteção, alarme automático, bombeiros ...). Estas medidas de segurança ativas são geralmente impostas por razões de proteção das vidas dos ocupantes [3];

δ_{q3} fator que tem em conta a classe de fiabilidade do edifício (ver Quadro 2) [3];

$q_{f,k}$ valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento [MJ/m^2] (ver Quadro 3) [3,9].

Deve dizer-se que esta metodologia adotada no Eurocódigo 1, para determinação do valor de cálculo da densidade de carga de incêndio foi talvez um dos aspetos menos consensuais entre os vários países aderentes ao programa dos Eurocódigos, optando alguns deles, nos seus Anexos Nacionais, por definir metodologias próprias. É o caso de Portugal que no Anexo Nacional da NP EN 1991-1-2 [9] recomenda preferencialmente a não consideração dos efeitos benéficos das medidas ativas de segurança contra incêndios, sem, no entanto, a rejeitar completamente. Segundo este anexo o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio, calculado com base no valor característico dado no Quadro 3 “*pode eventualmente ser modificado para ter em conta as medidas ativas de combate a incêndio, desde que as opções sejam convenientemente fundamentadas, com base em análises de risco (estudos probabilísticos ou semi-probabilísticos de risco de colapso da estrutura), associadas a práticas já experimentadas*”.

Uma vez que vários Estados-Membros introduziram modificações no seu Anexo Nacional relativamente à densidade de carga de incêndio, estas divergências foram objeto de harmonização na nova geração do Eurocódigo 1. Por outro lado, foram introduzidos outros tipos de ocupação, como os arquivos, os escritórios densamente carregados e os “open space” indicados no Quadro 3 a negrito. Neste quadro também se assinalam as alterações introduzidas em algumas designações para a ocupação do espaço como a designação de “Centro comercial” que foi substituída por “Área comercial” e “Transporte espaço público” que passou a “Espaço público (áreas de circulação de pessoas)”.

Quadro 3 Valor médio e característico da densidade de carga de incêndio $q_{f,k}$, por unidade de área do pavimento de acordo com o tipo de ocupação

Ocupação	Densidade de carga de incêndio $q_{f,k}$ [MJ/m^2]	
	Valor médio	Quantilho 80%
Habitação	780	948
Hospital (quarto)	230	280
Hotel (quarto)	310	377
Biblioteca, arquivo	1500	1824
Escritório densamente carregado (escritório com até 20% de superfície de arquivo)	744	905
Escritório	420	511
Escritório pouco carregado (escritório “open space”, escritório sem arquivos de papel)	206	250
Sala de aulas de uma escola	285	347
Área comercial	600	730
Teatro (cinema)	300	365
Espaço público (áreas de circulação de pessoas)	100	122

A taxa de crescimento de incêndio e a taxa máxima de libertação de calor por unidade de área, RHR_p , para diferentes tipos de ocupação foi também atualizada de acordo com as novas ocupações introduzidas.

O fogo é considerado uma ação de acidente, pelo que o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio, deve ser obtido usando-se a seguinte combinação de acidente definida na EN 1990 [11]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + (\Psi_{1,1} \text{ ou } \Psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d \quad (2)$$

onde

$G_{k,j}$ é o valor característico das ações permanentes;

$Q_{k,1}$ é o valor característico da ação variável de base ou principal;

$\Psi_{1,1}$ é o coeficiente de combinação associado à ação variável de base;

$\Psi_{2,1}$ é o coeficiente de combinação associado à ação variável de base;

$\Psi_{2,i}$ é o coeficiente de combinação associado às restantes ações variáveis;

A_d é o valor de cálculo das ações indiretas de incêndio a que correspondem os esforços resultantes das restrições às dilatações térmicas, englobando também o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do material.

O valor representativo da ação variável Q_1 poderá ser considerado como o valor quase-permanente $\Psi_{2,1} Q_1$, ou, em alternativa, como o valor frequente $\Psi_{1,1} Q_1$. A utilização de um ou de outro pode ser especificada no Anexo Nacional. A EN 1991-1-2 [9] recomenda a utilização de $\Psi_{2,1} Q_1$, mas alguns países adotaram $\Psi_{1,1} Q_1$ de modo a evitar a ausência de forças horizontais resultantes da ação do vento ($\Psi_{2,1} = 0$, quando o vento é a ação variável de base, de acordo com o Anexo A1 da EN 1990) [11], levando à situação perigosa de poder haver sistemas de contraventamento sem proteção passiva contra incêndio, uma vez que estão sujeitos a esforços nulos, na ausência de forças horizontais, como se pode ver na Figura 4 [12], onde G representa as cargas permanentes, Q a sobrecarga de utilização e W o vento.

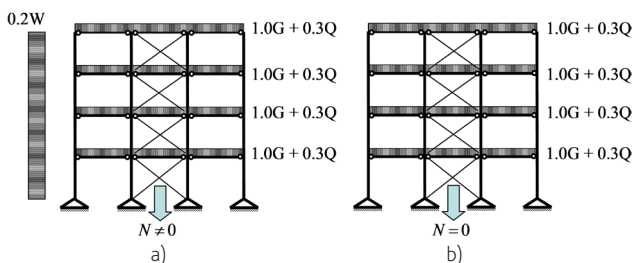


Figura 4 Combinação de ações em situação de incêndio. a) Quando se adota $\Psi_{1,1} Q_1$; b) Quando se adota $\Psi_{2,1} Q_1$ [12]

Esperava-se que a nova geração das Partes 1-2 dos Eurocódigos, viesse harmonizar a escolha do coeficiente de combinação associado à ação variável de base, mas tal não sucedeu. Esta escolha continuará a constituir um Parâmetro Determinado a Nível Nacional. Portugal

adotou na primeira geração dos Eurocódigos o valor frequente da ação variável de base, ou seja, $\Psi_{1,1} Q_1$.

A segunda geração da EN 1991-1-2 [3] apresenta um novo anexo, o Anexo H, relacionado com as ações térmicas para cargas estruturais de incêndio em estruturas de madeira. Neste anexo é tida em consideração a contribuição da própria estrutura de madeira para a carga total de incêndio.

2.2 A EN 1992 - Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão

Nesta subsecção far-se-á uma descrição das alterações introduzidas na EN 1992-1-2 [13]. Uma das primeiras alterações que se podem encontrar na segunda geração da EN 1992-1-2 [14], consiste na referência à possibilidade de utilização de armaduras em aço inoxidável, sendo mencionado que as suas propriedades térmicas e mecânicas a temperaturas elevadas se podem encontrar na Parte 1-2 do Eurocódigo 3 [6].

Na versão atual da EN 1992-1-2 [13] são fornecidas duas curvas (limite inferior e limite superior) para a condutibilidade térmica do betão a temperaturas elevadas, como se ilustra na Figura 5. Os anexos nacionais podiam ainda definir qualquer curva entre aquelas duas, o que levou ao aparecimento de diferentes curvas adotadas nos vários países. Para harmonizar estas curvas, a segunda geração do Eurocódigo 2 [14] propõe apenas uma curva, como se representa na Figura 5.

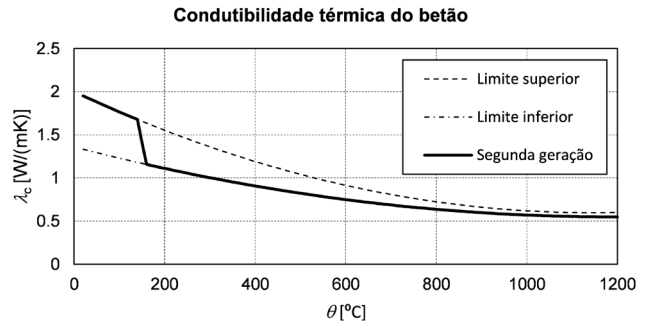


Figura 5 Condutibilidade térmica do betão em função da temperatura [13, 14]

Relativamente aos betões de alta resistência, foram substituídas as três classes de betão para a definição dos fatores de redução da resistência a temperaturas elevadas por apenas uma classe. Assim, enquanto na versão atual da EN 1992-1-2 [13] a classe recomendada para os betões C 55/67 e C 60/75 é a Classe 1, para os betões C 70/85 e C 80/95 é a Classe 2 e para o betão C 90/105 a Classe 3, na nova geração do Eurocódigo 2 [14,15], passou a haver apenas uma classe correspondente a betões com $f_{ck} \geq 70$ MPa.

Na versão atual da EN 1994-1-2 [16], relativa à verificação da resistência ao fogo de estruturas mistas aço-betão, existe um anexo informativo que especifica a resistência do betão durante a fase de arrefecimento nos modelos de incêndio definidos com base física (modelos de incêndio natural). Este anexo não existe na versão atual da EN 1992-1-2 [12]. A fim de harmonizar as diferentes partes

dos Eurocódigos, o Grupo Horizontal Fogo, sugeriu que este anexo deixasse de estar no Eurocódigo 4 e passasse para a EN 1992-1-2 [14]. Assim, este anexo foi adaptado para cobrir agregados siliciosos e calcários e foi simplificado para constituir uma única secção introduzida no corpo da norma em vez de constituir um anexo normativo.

A segunda geração da EN 1992-1-2 [14], não traz alterações à lei constitutiva do aço das armaduras, a qual continua a ser a preconizada na Parte 1-2 do Eurocódigo 3 [6] para os aços estruturais, representada na Figura 7. Usando a nomenclatura do Eurocódigo 2, onde na Figura 7, está $f_{y,\theta}$, $f_{p,\theta}$, $\epsilon_{p,\theta}$ e $\epsilon_{y,\theta}$ deve ler-se respetivamente $f_{sy,\theta}$, $f_{sp,\theta}$, $\epsilon_{sp,\theta}$ e $\epsilon_{sy,\theta}$. Houve, no entanto, alterações relativamente à resistência a considerar nas armaduras comprimidas em colunas e zonas comprimidas de vigas e lajes em que a extensão total é inferior a 2% ($\epsilon_{y,\theta} = 2\%$), que na versão atual da norma corresponde ao limite convencional de proporcionalidade a 0,2% e passa, na segunda geração, a ser considerada uma tensão equivalente $f_{se,\theta}$, que é a tensão representativa para valores das extensões entre o limite de proporcionalidade ($\epsilon_{sp,\theta}$) e a extensão correspondente à tensão de cedência ($\epsilon_{y,\theta} = 2\%$). Esta tensão representa a tensão média, de acordo com a lei constitutiva do aço representada na Figura 7, entre as extensões $\epsilon_{sp,\theta}$ e $\epsilon_{sy,\theta} = 2\%$, obtida de [15]:

$$f_{se,\theta} = \frac{\int_{\epsilon_{sp,\theta}}^{\epsilon_{sy,\theta}=2\%} \sigma(\theta) d\epsilon}{\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta}} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Esta fórmula permite obter os valores do fator de redução em função da temperatura para a tensão equivalente, representados na coluna 6 do Quadro 4, assinalados a negrito. As restantes colunas deste quadro permanecem inalteradas na segunda geração da EN 1992-1-2 [14] relativamente à versão atual [13].

Relativamente aos aços de pré-esforço, na versão atual da NP EN 1992-1-2:2010 [13] são dadas duas classes diferentes (A e B) sendo a escolha da Classe A ou da Classe B em cada país especificada no seu Anexo Nacional. O Anexo Nacional Português [13] estipula "Para efeitos da caracterização das propriedades de resistência e de deformação do aço de pré-esforço deverá considerar-se a Classe A". A segunda geração da EN 1992-1-2 [14] tem apenas uma classe de aço de pré-esforço, o que permitiu eliminar um NDP (Parâmetro determinado a nível Nacional).

De acordo com a cláusula 6.1 (2) da FprEN 1992-1-2:2023 [14], a utilização de valores tabelados deve, em geral, fornecer resultados conservativos quando comparados com resultados experimentais, resultados obtidos através de métodos simplificados ou métodos avançados de cálculo. No entanto, vários estudos mostraram que o Método A pode ser menos conservativo do que outros métodos de projeto para $l_{0,fi} = l_{0,e}$ e para $l_{0,fi} = 0,7 l_{0,e}$, em que $l_{0,fi}$ e $l_{0,e}$ representam respetivamente o comprimento de encurvadura da coluna em situação de incêndio e à temperatura normal. Este facto levou a que a segunda geração da EN 1992-1-2 [14] restringisse a utilização do Quadro 5.2a da NP EN 1992-1-2:2010 [13] às situações em que $l_{0,fi} = 0,5 l_{0,e}$. Para outros valores da relação $l_{0,fi} / l_{0,e}$, o grau de

Quadro 4 Valores dos parâmetros da relação tensões-extensões para aço para betão armado laminado a quente e endurecido a frio a temperaturas elevadas

Temperatura do aço θ [°C]	$k_{sy,\theta} = f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$k_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$k_{se,\theta} = f_{se,\theta} / f_{yk}$	$k_{Es,\theta} = E_{s,\theta} / E_s$	
	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio	Laminado a quente ou endurecido a frio	Laminado a quente	Endurecido a frio
1	2	3	4	5	6	7	8
20	1	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	0,96	1	1	1
200	1	1	0,81	0,92	0,95	0,9	0,87
300	1	1	0,61	0,81	0,9	0,8	0,72
400	1	0,94	0,42	0,63	0,85	0,7	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,6	0,6	0,4
600	0,47	0,4	0,18	0,26	0,35	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,1	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,08	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
1200	0	0	0	0	0	0	0

utilização μ_{fi} deve ser calculado de acordo com a Fórmula (6.6) da FprEN 1992-1-2:2023 [14], usando o valor de cálculo da resistência à compressão do pilar à temperatura normal N_{Rd} calculado para um comprimento efetivo modificado fictício $l_{0,fi} = 2 l_{0,fi}$.

A tabela para colunas (Método A) da NP EN 1992-1-2:2010 [13] contém apenas valores para um grau de utilização ($\mu_{fi} = 0,7$). Por esta razão, foi preparada uma nova tabela com três graus de utilização diferentes. No geral, isto permite um projeto mais económico de pilares em situação de incêndio [15].

Nas tabelas da emenda EN 1992-1-2:2004/A1:2019 [17] o nível de carregamento η_{fi} constitui parâmetro de entrada do mesmo modo que no antigo Anexo C e no Método B da NP EN 1992-1-2:2010 [13]. No novo Anexo D (Encurvadura de colunas em situação de incêndio), as tabelas são alteradas para usar μ_{fi} como parâmetro de entrada para harmonização com os princípios gerais utilizados com valores tabelados na segunda geração dos Eurocódigos Estruturais.

O Anexo A da NP EN 1992-1-2:2010 [13] que fornece perfis de temperatura calculados para lajes, vigas, colunas e paredes expostas apenas num dos lados, foi eliminado fornecendo a segunda geração daquela norma equações simplificadas que permitem facilmente obter analiticamente as temperaturas em secções de betão armado. Esta alteração introduz uma simplificação significativa em comparação com a versão anterior (Anexo A da NP EN 1992-1-2:2010 [13]), onde os perfis de temperatura eram fornecidos apenas em forma gráfica, dificultando assim a obtenção dos valores de temperatura tendo em vista a análise mecânica.

A versão atual da NP EN 1992-1-2 [13] não dá nenhuma indicação sobre a imperfeição a utilizar em elementos estruturais. A segunda geração da norma corrige esta lacuna e sugere a utilização de uma imperfeição inicial sinusoidal ou parabólica com um valor máximo a meio vão de $l/1000$, em que l é o comprimento do elemento.

Foram introduzidas na segunda geração da EN 1992-1-2 [14] regras específicas para controlar o destacamento do betão ("spalling"). Assim, é considerado um novo limite de C60 ($f_{ck} < 70$ MPa) em vez de C80 para que não sejam necessárias verificações adicionais em relação à ocorrência de destacamento do betão. Agora, para betões com $f_{ck} \geq 70$ MPa ou com um teor de sílica de fumo igual ou superior a 6% em massa de cimento, deve ser feita a avaliação do destacamento do betão, ou devem ser incluídas fibras de polipropileno para mitigar a ocorrência de destacamento de betão.

Finalmente, refira-se que foi incluído um anexo informativo que fornece orientações para o dimensionamento ao fogo de estruturas de betão reforçado com fibras de aço, e um outro, também informativo, relacionado com agregados reciclados.

2.3 A EN 1993 - Eurocódigo 3: Projeto de estruturas de aço

As alterações mais significativas introduzidas na nova geração da EN 1993-1-2 [6] serão apresentadas nesta subsecção.

A segunda geração da EN 1993-1-2 [6] introduziu valores da emissividade da superfície para os aços galvanizados a quente. Assim para os aços correntes esta emissividade continua a valer 0,7, mas para os aços galvanizados, passa a valer 0,35 para temperaturas

inferiores ou iguais a 500 °C e 0,7 para temperaturas superiores a 500 °C.

Foram incluídas novas curvas de encurvadura lateral de modo a contemplar a influência do tipo de carregamento, tal como acontece na Parte 1-1 do Eurocódigo 3 [18]. A Figura 6 ilustra estas novas curvas, sendo a curva correspondente a uma distribuição de momentos uniforme ($\psi = 1$) a curva disponível na versão atual da EN 1993-1-2 [19].

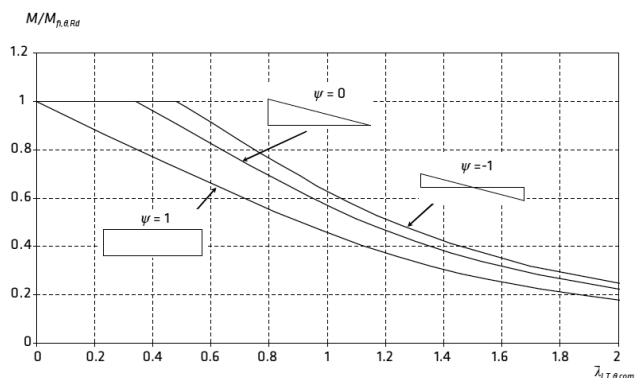


Figura 6 Influência do diagrama de momentos nas curvas de encurvadura lateral [12,20]

Foi incluída uma formulação completamente nova para a verificação da resistência ao fogo de elementos estruturais com secção transversal de Classe 4 em que a tensão de cedência a utilizar, em linha com o resto da norma será a tensão correspondente à extensão total de 2% em vez da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, como especificado na versão atual da norma [19] e se ilustra na Figura 7, [12,20].

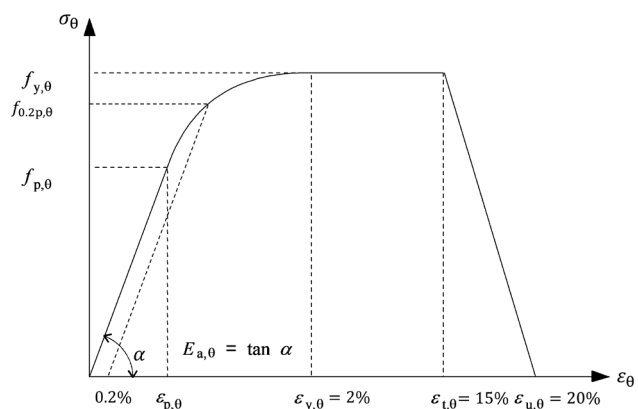


Figura 7 Diagrama de tensões-extensões para o aço a temperaturas elevadas [12,20]

O atual Anexo E, dedicado aos elementos estruturais de Classe 4 deixou de existir e a nova formulação para os elementos de secção transversal de Classe 4 passou a integrar o corpo da norma. A Figura 8 [21] ilustra, comparando a NP EN 1993-1-2:2010 [19] com resultados numéricos obtidos com o programa de elementos finitos SAFIR [22], para o caso da encurvadura lateral, a necessidade de melhorar as fórmulas de cálculo relativas a este tipo de elementos.

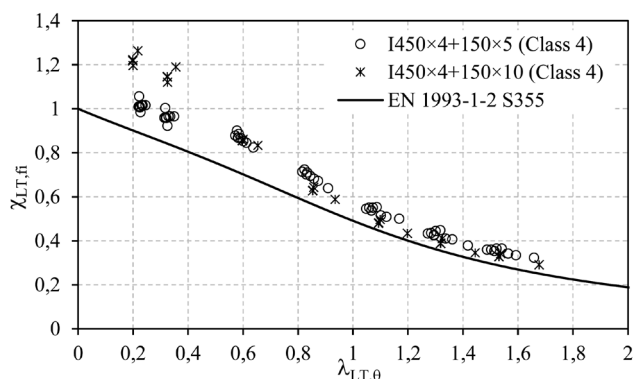


Figura 8 Comparação da curva de encurvadura lateral com resultados numéricos para vigas em I com secção transversal de Classe 4 [21]

Foram introduzidas regras para vigas metálicas com aberturas na alma (vigas alveolares). A Figura 9 [6] mostra a localização das secções críticas dos vários modos de colapso neste tipo de viga. A nova geração da EN 1993-1-2 [6] contempla também as expressões necessárias ao cálculo dos fatores de massividade destas secções para cálculo das temperaturas correspondentes.

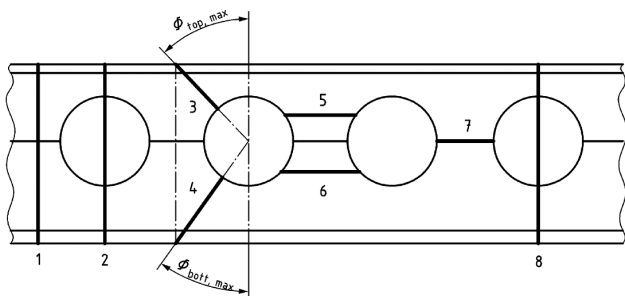


Figura 9 Secções críticas numa viga alveolar [6]

Introduziram-se novas fórmulas de verificação da resistência ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável. Atualmente a verificação da segurança em situação de incêndio de estruturas em aço inoxidável é feita, de acordo com a EN 1993-1-2 [19], usando as mesmas regras aí estipuladas para o aço carbono. Dado que as leis constitutivas dos dois materiais são diferentes, foram introduzidas formulações específicas para o aço inoxidável. A título de exemplo, a Figura 10 [23] compara a curva de encurvadura lateral da EN 1993-1-2 [19] com resultados numéricos obtidos com o programa de elementos finitos SAFIR [22]. Consta-se claramente que a curva da EN 1993-1-2 [19] não está do lado da segurança, razão pela qual foram introduzidas alterações para este tipo de aço. O Anexo C da FprEN 1993-1-2 [6], relativo às estruturas em aço inoxidável, foi completamente reformulado estando agora em linha com o resto da norma no que respeita à utilização da tensão correspondente à extensão total de 2% para tensão de cedência e deixa de utilizar as 4 classificações habituais das secções transversais de perfil metálicos, passando a considerar apenas dois tipos de secções transversais: esbeltas e não-esbeltas. As fórmulas de verificação da resistência de vigas-coluna foram também alteradas.

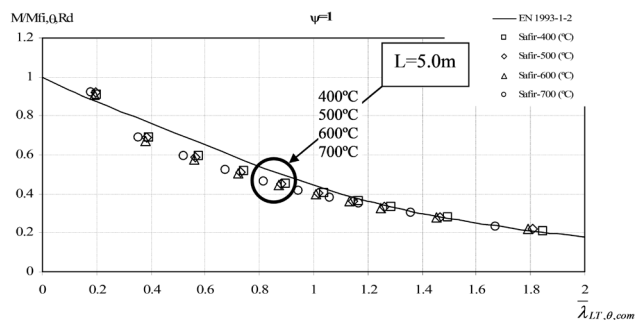


Figura 10 Comparação entre resultados numéricos e a curva de encurvadura lateral da EN 1993-1-2 [19] para aço inoxidável [23]

Introduziram-se melhoramentos nas regras apresentadas no Anexo D da Parte 1-2 do Eurocódigo 3 [19] relativamente a ligações soldadas e aparafusadas. Este Anexo introduz um novo procedimento de cálculo da temperatura nas ligações, bem como a verificação da segurança de ligações soldadas de perfis tubulares em situação de incêndio.

Atualmente as regras de verificação da segurança em caso de incêndio, estipuladas na Parte 1-2 do Eurocódigo 3 [19], são válidas apenas para os aços da classe S460 ou de qualidade inferior. A nova geração da EN 1993-1-2 [6] incluirá a mesma gama de aços que a EN 1993-1-1:2022 [24], ou seja, até aos aços da classe S700, passando assim a considerar os aços de alta resistência.

2.3 A EN 1994 - Eurocódigo 4: Projeto de estruturas mistas aço-betão

A nova geração da EN 1994-1-2 [25] passará a conter explicitamente uma referência, através de um novo anexo (Anexo G), ao efeito de membrana que se desenvolve nas lajes mistas aço-betão. Incêndios reais e ensaios à escala real têm demonstrado que as lajes mistas aço-betão apresentam uma resistência ao fogo superior àquela que resulta do cálculo baseado na avaliação do seu comportamento como elemento estrutural isolado, trabalhando essencialmente à flexão. As grandes deformações provocadas pela perda de rigidez devido ao aumento da temperatura favorecem o desenvolvimento de esforços de membrana nas lajes, responsáveis pelo aumento da sua resistência ao fogo. Estes esforços de membrana são tidos em conta na nova metodologia de cálculo que será introduzida na nova geração do Eurocódigo 4. Contrariamente ao procedimento convencional de dimensionamento, com este novo método de cálculo, pode, em muitas situações, evitar-se a utilização de proteção passiva contra incêndio numa grande percentagem de vigas secundárias, resultando numa considerável redução de custos, sem comprometer a segurança da estrutura em caso de incêndio. De acordo com o projeto Europeu MACS+ [26], 40% a 55% das vigas podem ser deixadas sem proteção, colocando proteção onde ela é realmente necessária.

A Figura 11 mostra um caso em que se tirou partido do efeito de membrana para evitar a proteção contra incêndio das vigas secundárias. Nas Figuras 11a [26] e 11b [25] as vigas secundárias assinaladas a cor encarnada (vigas do tipo 3) não foram protegidas.

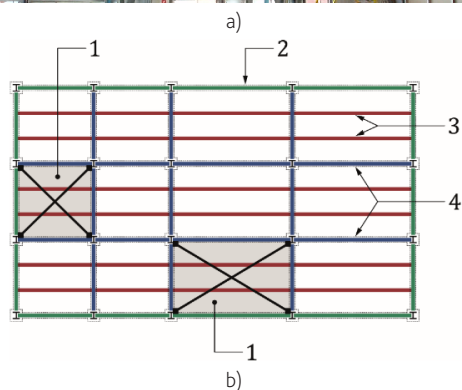


Figura 11 Vigas secundárias não protegidas. a) [26], b) [25]

Entre 1995 e 1996 ensaios realizados à escala real num edifício de oito pisos, construído para o efeito no "Cardington Laboratory of the Building Research Establishment (BRE)", no Reino Unido (Figura 12) [27,28], mostraram que, apesar das temperaturas atingidas pelas

vigas não protegidas ultrapassarem os 1150 °C [29] e da ocorrência de flechas elevadas das lajes mistas aço-betão (Figura 12b) não ocorreu o colapso da estrutura.

Em todos os ensaios realizados no BRE os pilares e as vigas periféricas do compartimento de incêndio estudado foram protegidos de acordo com os procedimentos habituais, mas as vigas secundárias foram mantidas sem proteção passiva contra incêndio. Concluiu-se que a reserva de resistência verificada se deveu ao desenvolvimento de ações de membrana nas lajes mistas aço-betão.

A segunda geração da EN 1994-1-2 [25] introduziu os mesmos valores da emissividade da superfície do aço que a EN 1993-1-2 [6] e as propriedades térmicas do betão foram harmonizadas com as da EN 1992-1-2 [14].

O dimensionamento ao fogo de vigas "shallow floor beams" ou "vigas rasas" foi introduzido na segunda geração da EN 1994-1-2 [25], constituindo o novo anexo H. Este tipo de viga, (ver Figura 13) tem vindo a ser utilizado, mas não se encontram na regulamentação bases legais para o seu dimensionamento, pelo que urge dotar o Eurocódigo 4 com um conjunto de regras de apoio aos projetistas.

Os pilares constituídos por perfis tubulares de aço preenchidos com betão, como os representados na Figura 14, são uma boa solução quando as cargas são elevadas e quando há limitações de espaço. O anexo informativo H da EN 1994-1-2 [16] foi atualizado com novas metodologias de cálculo e passou a Anexo F na segunda geração da EN 1994-1-2 [25].

Vigas mistas aço-betão com grandes aberturas na alma (vigas alveolares) têm vindo a ser amplamente utilizadas em toda a Europa (ver Figura 15). Existem algumas soluções pertencentes às empresas que as comercializam baseadas em campanhas de ensaios experimentais e cálculo estrutural. São necessárias, no entanto, novas formulações genéricas para garantir que todas estas soluções satisfazem certos princípios gerais do cálculo estrutural, e para fornecer aos projetistas soluções e procedimentos claros a serem seguidos. Esta lacuna foi colmatada com a inclusão do novo Anexo I.



Figura 12 Ensaio à escala real no Cardington Laboratory of the Building Research Establishment. a) Vista exterior do edifício durante o ensaio; b) Vista após ensaio [27,28]

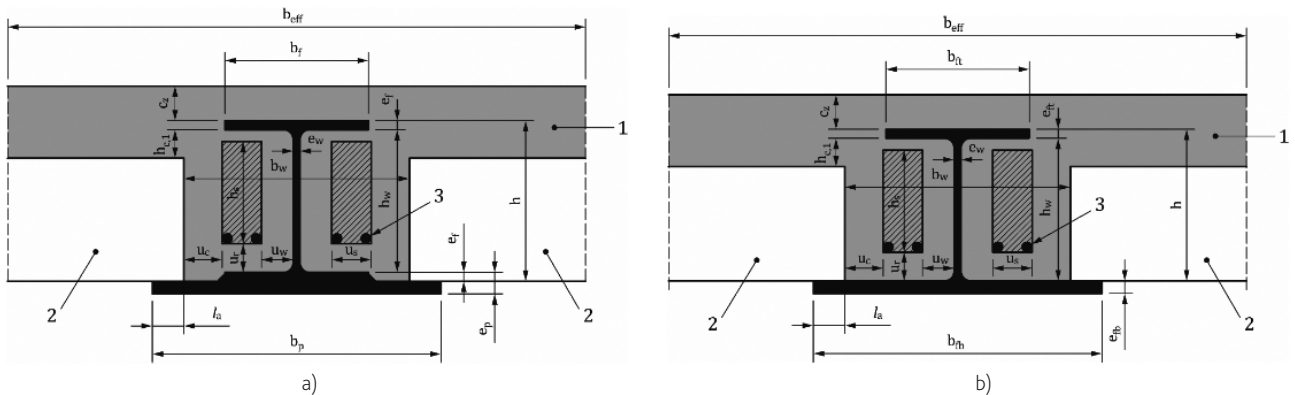


Figura 13 Geometrias de secções transversais de vigas rasas do Tipo A (a) e do Tipo B (b) abrangidas pelo Anexo H da EN 1994-1-2 [25]

O Anexo I da versão atual da EN 1994-1-2 [16], relativo à conceção e avaliação de modelos experimentais, foi eliminado.

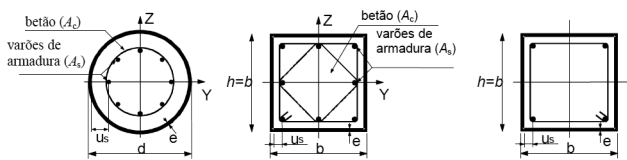


Figura 14 Pilares constituídos por perfis tubulares de aço preenchidos com betão [16]

protegidas”, foi alargado de modo a contemplar as chapas perfiladas colaborantes com reforços no topo, como mostra a Figura 16.

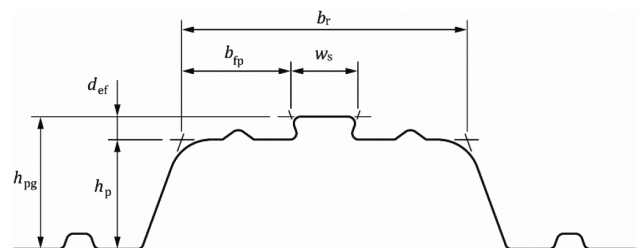


Figura 16 Chapa colaborante perfilada aberta com um reforço reentrante superior [25]

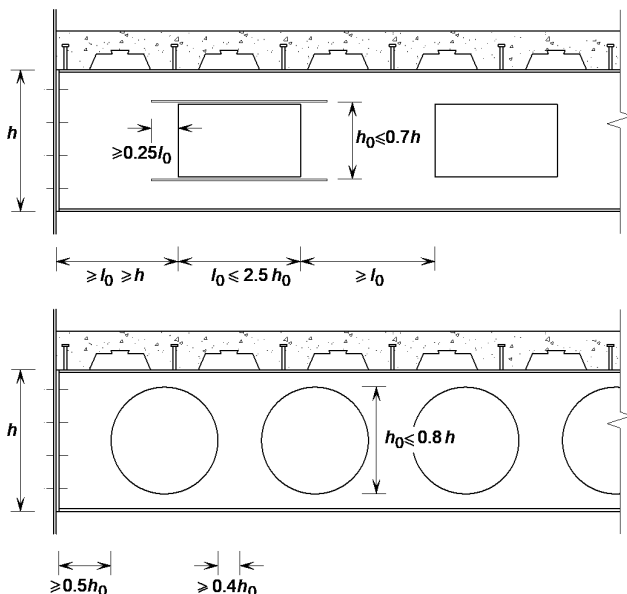


Figura 15 Vigas alveolares mistas aço-betão [25]

O Anexo B da segunda geração da EN 1994-1-2 [25] relativo ao “modelo de cálculo da resistência ao fogo de lajes mistas não

refira-se ainda que o Anexo C, informativo, da versão atual da EN 1994-1-2 [16] relativo às “relações tensões-extensões do betão adaptadas a incêndios naturais com um ramo descendente para utilização nos modelos avançados de cálculo”, desaparece na segunda geração do Eurocódigo 4, tendo sido incorporado no corpo da norma EN 1994-1-2 [14], uma vez que nada era referido a esse respeito na versão atual da Parte 1-2 do Eurocódigo 2 [13].

2.5 A EN 1995- Eurocódigo 5: Projeto de estruturas de madeira

A segunda geração da EN 1995-1-2 [7] constitui uma revisão profunda da EN 1995-1-2: 2004 [30]. As principais alterações em relação à edição anterior são as seguintes:

- melhoria do modelo de carbonização (secção 5.4);
- introdução de valores tabelados (secção 6);
- melhoria do método da secção transversal efetiva (secção 7.2);
- inclusão de regras de projeto para madeira lamelada cruzada (CLT), como representada na Figura 17 (secção 7.2.3);

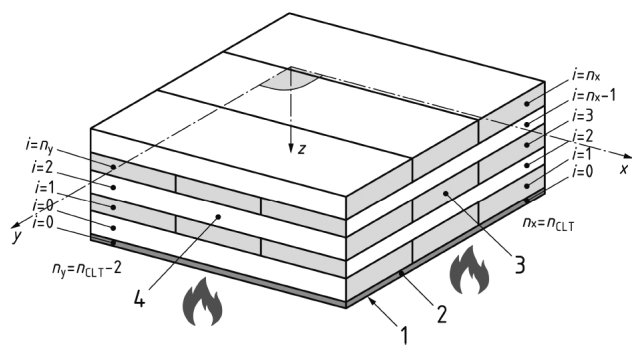


Figura 17 Numeração de camadas CLT nas direções x e y com e sem sistema de proteção [7]

- melhoria das regras de dimensionamento para subsistemas de estruturas de madeira (secção 7.2.4);
- inclusão de regras de dimensionamento para elementos mistos madeira-betão (secção 7.2.5);
- introdução do método da função de compartimentação (secção 7.3);
- melhoria das regras de dimensionamento de ligações (secção 9), como se ilustra na Figura 18;

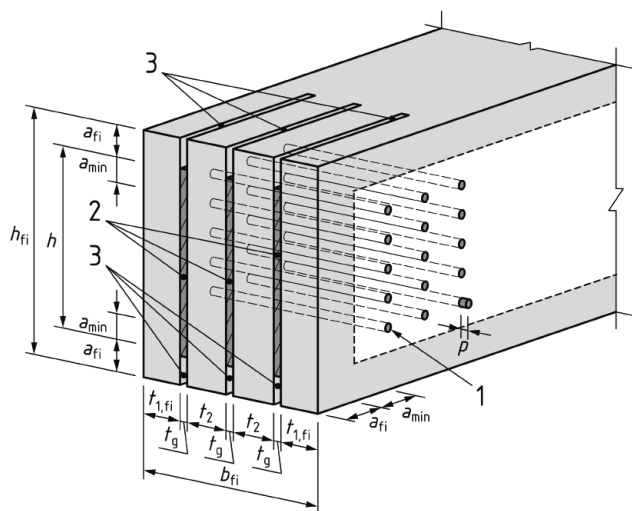


Figura 18 Requisitos geométricos para ligações aço-madeira com cavilhas e três ou mais placas de aço ranhuradas (exemplo para 3 x 5 cavilhas) [7]

- melhoria das disposições construtivas (secção 10);
- inclusão de anexos normativos e informativos.

Alguns anexos sofreram alterações significativas como por exemplo o Anexo A relativo ao dimensionamento de estruturas de madeira expostas a curvas de incêndio definidas com base física (incêndios naturais) e o Anexo C sobre a determinação da taxa básica de carbonização. Outros são anexos novos que foram adicionados na segunda geração da EN 1995-1-2 [7], como o Anexo B correspondente à avaliação da integridade da linha de ligação em situação de

incêndio, o Anexo D relativo à avaliação do nível de proteção do isolamento de cavidades, o Anexo E relativo à avaliação de chamas exteriores que fornece orientações complementares ao Anexo B da FprEN 1991-1-2 [3] sobre ações térmicas para elementos estruturais exteriores, o Anexo F sobre a avaliação do tempo de colapso de sistemas de proteção contra incêndios, o Anexo G que estabelece regras para o Método da Função de Compartimentação, o Anexo I relativo ao dimensionamento de subsistemas com elementos lineares de madeira com secção transversal em forma de I, o Anexo M que contém disposições adicionais para propriedades de materiais e produtos necessárias ao projeto de acordo com a prEN 1995-1-2 [7], e o Anexo T que apresenta fórmulas que permitem determinar a temperatura de elementos de madeira quando expostos à curva de incêndio padrão ISO 834.

2.6 A EN 1996- Eurocódigo 6: Projeto de estruturas de alvenaria

A segunda geração da EN 1996-1-2 [5] segue a estrutura comum das Partes 1-2 dos Eurocódigos Estruturais estabelecida pelo Grupo Horizontal Fogo (HG-F.T1) [4], embora se deva referir que contrariamente a todas as Partes 1-2 dos Eurocódigos Estruturais que contém de modo harmonizado a Secção 8 relativa aos métodos avançados de cálculo, a segunda geração da EN 1996-1-2 [5] não contém esta secção.

Ao contrário da versão atual da EN 1996-1-2 [31], a nova geração da EN 1996-1-2 [5] não refere explicitamente os métodos simplificados de cálculo nem os métodos avançados de cálculo, sendo os métodos de análise remetidos para a Secção 7.1.5 da EN 1990:2023 [32]. De facto, na Secção 4.6 (4) apenas é referido que a verificação da resistência ao fogo das estruturas de alvenaria pode ser feita de acordo com as seguintes metodologias:

- utilização de valores tabelados;
- utilização de resultados de ensaios de resistência ao fogo.

O antigo Anexo A da versão atual da EN 1996-1-2 [31] relativo a recomendações sobre a escolha dos períodos de resistência ao fogo, foi retirado. O Anexo B [31], com valores tabelados, foi atualizado tendo em consideração resultados experimentais recentes, tendo passado a Anexo A na segunda geração deste Eurocódigo [5]. Foi introduzido um novo Anexo B com informação sobre as propriedades térmicas e mecânicas a temperaturas elevadas para alguns materiais de alvenaria, substituindo o antigo Anexo C sobre modelos de cálculo simplificado e o Anexo D sobre Modelos de cálculo avançado.

O factor de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio, η_{pr} , foi alterado, passando a valer 0,60 no caso de edifícios com pavimentos em madeira, mantendo o valor de 0,65 para os edifícios em geral.

2.7 A EN 1999 - Eurocódigo 9: Projeto de estruturas de alumínio

A versão atual da EN 1999-1-2 [33] não sofreu alterações significativas. As principais alterações estão referidas no preâmbulo

europeu da segunda geração da EN 1999-1-2 [8] e listadas em seguida:

- alguma reorganização do texto e sua coerência com outros Eurocódigos;
- melhoria da qualidade das figuras;
- atualização de símbolos, alinhamento entre os Eurocódigos;
- maior clareza e consistência.

3 Conclusões

Fez-se uma descrição das atualizações introduzidas nas partes relativas à verificação da resistência ao fogo da segunda geração dos Eurocódigos Estruturais relativamente à versão atual dos mesmos.

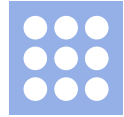
Os aspetos essenciais definidos na resposta ao mandato M/515 foram os seguintes: 1) redução do número de Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDPs) nos Eurocódigos existentes; 2) melhoria da "facilidade de utilização" dos Eurocódigos atuais através da i) clarificação, quando necessário; ii) simplificação de regras de cálculo; iii) limitação, quando possível, da inclusão de regras de cálculo alternativas e; iv) não inclusão ou remoção das regras de reduzida utilização prática em projeto. No caso das Partes 1-2, procurou-se também, como se mostrou, harmonizar a sua estrutura em todos os Eurocódigos. Para além disso, foram incluídos novos desenvolvimentos resultantes de investigação recente, tendo-se melhorado também procedimentos de cálculo e colmatado lacunas existentes.

Espera-se que as Partes 1-2 da nova geração do Eurocódigos Estruturais se mantenham como um dos conjuntos de normas para o projeto de estruturas em situação de incêndio, técnica e cientificamente mais avançadas a nível mundial.

Referências

- [1] M/515 EN – Mandate for amending existing eurocodes and extending the scope of structural eurocodes, European Commission, 12 December 2012.
- [2] CEN/TC 250 N993 – Response to Mandate M/515 - Towards a second generation of EN Eurocodes, May 2013.
- [3] FprEN 1991-1-2:2023 – Actions on structures - Part 1-2: Actions on structures exposed to fire. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [4] CEN-TC250-SC3-WG2_N0050__CENTC_250_N_1873_- Background_document, Maio 2018.
- [5] FprEN 1996-1-2:2024 – Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [6] FprEN 1993-1-2:2023 Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-2: Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [7] prEN 1995-1-2: 2023 Eurocode 5 – Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [8] EN 1999-1-2:2023 Eurocode 9 – Design of aluminium structures - Part 1-2: Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [9] NP EN 1991-1-2:2010, Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Parte 1-2: Ações gerais - Ações em estruturas expostas ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [10] Ferreira, M. (trad.); Vila Real, P.; Lopes, N. – (eds.) *Dimensionamento de colunas sujeitas a incêndios localizados*, ISBN 978-989-20-9009-2, Universidade de Aveiro, dezembro 2018.
- [11] NP EN 1990:2009 Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [12] Vila Real, P. – Manual de dimensionamento ao fogo de estruturas metálicas. Edição CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, ISBN: 978-989-99251-8-2, (484 páginas), abril de 2021.
- [13] NP EN 1992-1-2:2010 Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [14] FprEN 1992-1-2:2023, Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [15] CEN-TC 250_N3473_CEN-TC 250-SC 2_N2088_Background document FprEN 1992-1-2 (final version), Abril de 2023.
- [16] NP EN 1994-1-2: 2011 Eurocódigo 4 – Projeto de estruturas mistas aço-betão – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [17] EN 1992-1-2:2004/A1: 2019 Eurocode 2 – Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [18] NP EN 1993-1-1:2010 Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [19] NP EN 1993-1-2:2010 Eurocódigo 3 – Projeto de estruturas de aço - Parte 1-2: Regras gerais - Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [20] Franssen, J.M.; Vila Real, P. – Fire Design of Steel Structures, ECCS Press, ISBN 978-92-9147-128-7 and Ernst & Sohn a Wiley Company, ISBN 978-3-433-03143-8, 2nd Edition (475 páginas), outubro de 2015.
- [21] Couto C., et al. – Numerical investigation of the lateral-torsional buckling of beams with slender cross sections for the case of fire. Eng Struct 2015;106:410–21. doi:10.1016/j.engstruct.2015.10.045, 2015.
- [22] Franssen, J.M.; Gernay, T. (2017) – "Modeling structures in fire with SAFIR ®: theoretical background and capabilities", Journal of Structural Fire Engineering, Vol. 8 No. 3, pp. 300-323.
- [23] Vila Real, P. et al. – "Lateral-Torsional Buckling of Stainless Steel I-Beams in Case of Fire", Journal of Constructional Steel Research, ELSEVIER SCI LTD, ISSN: 0143-974X, vol. 64, pp. 1302-1309, 2008.
- [24] EN 1993-1-1:2022, Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [25] prEN 1994-1-2:2024, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: Structural fire design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [26] MACS+ - RFCR2-CT-2011-00025, Membrane Action in fire design of Composite Slab with solid and cellular steel beams – Valorisation, Research Fund for Coal and Steel, 2012.
- [27] Vassart, O.; Zhao, B. (authors); Vila Real, P.; Lopes, N. (editors) – Ações de Membrana em Estruturas Mistas em Situação de Incêndio: Bases de cálculo, ISBN 978-972-789-370-6, Universidade de Aveiro, dezembro de 2012.

- [28] Vassart, O.; Zhao, B. (authors); Vila Real, P.; Lopes, N. (editors) – *Ações de Membrana em Estruturas Mistas em Situação de Incêndio: Manual de Dimensionamento*, ISBN 978-972-789-371-3, Universidade de Aveiro, dezembro 2012.
- [29] Bailey, C.G. – “Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire”, *Engineering Structures*, 26, pp. 1691-1703, 2004.
- [30] NP EN 1995-1-2:2022, Eurocódigo 5 – Projeto de estruturas de madeira - Parte 1-2: Regras gerais - Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [31] NP EN 1996-1-2:2015, Eurocódigo 6 – Projecto de estruturas de alvenaria - Parte 1-2: Regras gerais - Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [32] EN 1990:2023, Eurocode – Basis of structural and geotechnical design. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.
- [33] NP EN 1999-1-2:2022, Eurocódigo 9 –Projeto de estruturas de alumínio - Parte 1-2: Verificação da resistência ao fogo. CEN (Comité Européen de Normalisation), Brussels.



A Nova Especificação Técnica Europeia CEN/TS 19101:2022 – Projeto de estruturas de compósitos de polímero reforçado com fibras

The New European Technical Specification CEN/TS 19101:2022
– Design of Fibre-Polymer Composite Structures

João R. Correia, José Sena-Cruz
Luigi Ascione, Thomas Keller
Toby Mottram, Jan Knippers
Carlo Paulotto

Resumo

Durante a atual revisão da primeira geração dos Eurocódigos, que começou em 2016 e terminará em 2026, a Comissão Europeia decidiu iniciar o desenvolvimento de um Eurocódigo para estruturas em compósitos de fibra-polímero. De acordo com o procedimento do Comité Europeu de Normalização (CEN), um Eurocódigo deve ser precedido por uma Especificação Técnica e, após um período de uso experimental, esta poderá então ser convertida em Eurocódigo. Este artigo apresenta uma descrição geral da nova Especificação Técnica Europeia CEN/TS 19101:2022, "*Design of Fibre-Polymer Composite Structures*", publicada em novembro de 2022, e de dois dos documentos complementares, o "*Commentary*" e os "*Worked Examples*".


Abstract

During the current revision of the first generation of Eurocodes, which started in 2016 and will end in 2026, the European Commission decided to start the development of a Eurocode for fibre-polymer composite structures. According to the CEN procedure, a Eurocode has to be preceded by a Technical Specification, which, after a period of trial use, can then be converted into a Eurocode. This paper gives an overview of the European Technical Specification CEN/TS 19101:2022, *Design of Fibre-Polymer Composite Structures*, published in November 2022, and of two of its complementary documents, the *Commentary* and the *Worked Examples*.

Palavras-chave: Materiais compósitos de fibra-polímero / Dimensionamento / Especificação Técnica / Eurocódigo

Keywords: Fibre-polymer composite materials / Design / Technical Specification / Eurocode

João R. Correia

Coordenador do GT 04 da CT 115
Professor
CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
Lisboa, Portugal
 0000-0001-5485-136X
joao.ramoacorreia@tecnico.ulisboa.pt

José Sena-Cruz

Professor
ISISE/ARISE, Escola de Engenharia, Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
 0000-0003-3048-1290
jose.sena-cruz@civil.uminho.pt


Luigi Ascione

Professor
University of Salerno
Salerno, Italy
 0000-0001-6969-9268
lascione@unisa.it


Thomas Keller

Professor
CCLAB, EPFL
Lausanne, Switzerland
 0000-0002-0430-8438
thomas.keller@epfl.ch

Toby Mottram

Professor
University of Warwick
Warwick, UK
 0000-0002-2750-8125
toby.mottram@warwick.ac.uk

Jan Knippers

Professor
University of Stuttgart, Germany
 0000-0002-6683-8004
jan.knippers@itke.uni-stuttgart.de

Carlo Paulotto

PhD
Ferrovial, Offshore Wind
Madrid, Spain
cpaulotto@ferrovial.com

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

CORREIA, J. [et al.] – A Nova Especificação Técnica Europeia CEN/TS 19101:2022 – Projeto de estruturas de compósitos de polímero reforçado com fibras. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 25. ISSN 2183-8488. (julho 2024) 139-148.
<https://doi.org/10.34638/rpee-sIII-n25-015>

1 Introdução

Em 2012, a Comissão Europeia emitiu o Mandato M/515 [1], com um programa de trabalhos detalhado para rever os Eurocódigos estruturais existentes e expandir o seu âmbito de aplicação. O trabalho do Comité Técnico 250 "Eurocódigos Estruturais" do Comité Europeu de Normalização (CEN/TC 250) começou em 2016, esperando-se que a segunda geração dos Eurocódigos seja publicada até 2026.

A primeira geração dos Eurocódigos não incluía qualquer Eurocódigo para estruturas em compósitos de fibra-polímero (também referido como polímero reforçado com fibras, ou FRP, do inglês, "Fibre-Reinforced Polymer"), não obstante o aumento da sua utilização nos últimos anos (Figuras 1 e 2) [2]. Durante a revisão da primeira geração dos Eurocódigos, foi então decidido iniciar o desenvolvimento de um Eurocódigo para estruturas em compósitos de fibra-polímero, seguindo o procedimento clássico previsto pelo CEN/TC 250 [3], que consiste em três fases, descritas adiante. Nesse contexto, foi constituído o Grupo de Trabalho WG4 do CEN/TC 250, sob a coordenação de Luigi Ascione.



Figura 1 Edifício com estrutura treliçada em perfis pultrudidos de compósito de fibra-polímero (Thomas Keller, EPFL-CCLab)

¹ Durante o desenvolvimento da Especificação Técnica CEN/TS 19101:2022, o WG4 do CEN/TC250 decidiu alterar a denominação polímero reforçado com fibras (e o correspondente acrónimo FRP) para compósito de fibra-polímero. Esta alteração foi motivada pelo facto de se ter considerado que a primeira denominação não refletia adequadamente o papel estrutural dos dois componentes de um material compósito, isto é, as fibras de reforço e a matriz polimérica. Para além disso, esta nova denominação está em linha com a que é utilizada noutros idiomas europeus (todos incluem o termo "compósito") e, também, a que é adoptada noutras indústrias que utilizam regularmente materiais compósitos. Nesta reflexão, também se considerou desejável não utilizar siglas como FRP, GFRP ou CFRP, de forma a promover uma identidade mais clara para estes materiais estruturais.



Figura 2 Cobertura em painéis sanduíche com faces e almas em compósito de fibra-polímero e núcleo em espuma de poliuretano (Thomas Keller, EPFL-CCLab)

Numa primeira fase, foi publicado, em 2016, um Relatório Científico e Técnico [4], com o objetivo de promover uma discussão na Europa sobre o tema do dimensionamento de estruturas em compósitos de fibra-polímero.

Com base nesse relatório, foi iniciada a segunda fase, o desenvolvimento de uma Especificação Técnica do CEN, "Design of Fibre-Polymer Composite Structures". Com o objetivo de preparar esse documento, em julho de 2018, foi constituída a equipa de projeto WG4.T2, associada ao WG4, sob a liderança de João Ramôa Correia. Os outros membros da equipa foram Thomas Keller, Jan Knippers, Toby Mottram, Carlo Paulotto, José Sena-Cruz (a partir de 09/2020) e Till Vallée (até 11/2019). Entre julho de 2018 e abril de 2022, a equipa de projecto WG4.T2 preparou três versões da Especificação Técnica, que foram amplamente discutidas pelos membros do WG4 e submetidas a revisão pelos Organismos Nacionais de Normalização Europeus (NSBs). Em abril de 2022, o texto final da Especificação Técnica foi submetido a votação formal pelos membros nacionais do CEN, que o aprovaram em julho de 2022. Em novembro de 2022, a Especificação Técnica CEN/TS 19101:2022 foi publicada [5], estando agora disponível para projectistas, donos de obra, fabricantes e empreiteiros. Foram também publicadas versões traduzidas deste documento para alemão e francês. Esta Especificação Técnica representa a conclusão do segundo passo do procedimento geral estabelecido pelo CEN/TC 250 rumo a um novo Eurocódigo, que se espera que seja concluído até 2026.

Após um período de uso experimental e comentários, a conversão da Especificação Técnica num novo Eurocódigo pelo CEN/TC 250 constituirá a terceira e última fase.

O presente artigo apresenta uma visão geral da CEN/TS 19101:2022, descrevendo, de forma sumária, as suas principais secções. Na parte final do artigo, são ainda referidos dois documentos complementares, produzidos pelos membros da equipa de projecto, em colaboração com os membros do WG4: um "Commentary" [6] e "Worked Examples" [7].

2 Estrutura e âmbito de aplicação da CEN/TS 19101:2022

A CEN/TS 19101:2022 está organizada nas seguintes doze secções e cinco anexos (3 informativos e 2 normativos), apresentando uma estrutura semelhante à da nova geração dos Eurocódigos:

1. *Scope*
 2. *Normative references*
 3. *Terms, definition and symbols*
 4. *Basis of design*
 5. *Materials*
 6. *Durability*
 7. *Structural analysis*
 8. *Ultimate limit states*
 9. *Serviceability limit states*
 10. *Fatigue*
 11. *Detailing*
 12. *Connections and joints*
- Annex A (informative) Creep coefficients*
Annex B (informative) Indicative values of material properties for preliminary design
Annex C (normative) Buckling of orthotropic laminates and profiles
Annex D (normative) Structural fire design
Annex E (informative) Bridge details

O âmbito de aplicação da CEN/TS 19101:2022 é definido na secção 1. Esta Especificação Técnica aplica-se ao dimensionamento de edifícios, pontes e outras estruturas de engenharia civil, incluindo estruturas permanentes e temporárias, constituídas por materiais compósitos de fibra-polímero ou resultando da combinação de materiais compósitos com outros materiais estruturais, naquilo a que se designa por estruturas híbridas.

Os componentes e elementos estruturais abrangidos pela CEN/TS 19101:2022 podem ser constituídos por laminados (utilizados, por exemplo, em placas e cascas), perfis (Figura 2) e painéis sanduíche (Figura 3), multicelulares ou com núcleos (homogéneos ou contendo também almas), com ligações aparafusadas, coladas e aparafusadas-coladas. A Especificação Técnica aplica-se a (i) compósitos constituídos por fibras de vidro, carbono, basalto ou aramida, e por resinas termoendurecíveis, (ii) núcleos (de painéis sanduíche) em espuma polimérica ou madeira de balsa, e (iii) adesivos termoendurecíveis. A Especificação Técnica não é aplicável a núcleos em favos de mel, nem a componentes em compósitos de fibra-polímero utilizados como cabos, varões ou sistemas de reforço (laminados e mantas) para estruturas de betão armado².

A CEN/TS 19101:2022 aplica-se a materiais compósitos produzidos pelos principais processos de fabrico, como sejam a pultrusão, a

² Estes dois tipos de componentes em compósitos de fibra-polímero (varões e sistemas de reforço) utilizados em estruturas de betão armado são objecto de dois novos anexos da prEN 1992-1-1, respectivamente, os Anexos R [7] e J [8].

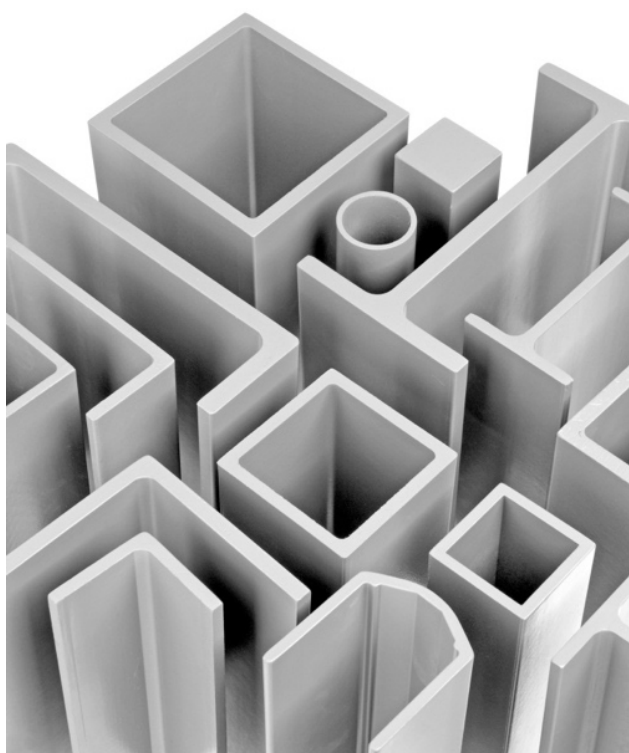


Figura 3 Componentes e elementos estruturais cobertos pela CEN/TS 19101:2022: perfis (esquerda, Fiberline) e painéis sanduíche multicelulares (direita em cima, Creative Pultrusions) ou com núcleo homogéneo em madeira de balsa (direita em baixo, Thomas Keller, EPFL-CCLab)

infusão a vácuo, a laminação manual, o enrolamento filantar e a moldagem por transferência de resina.

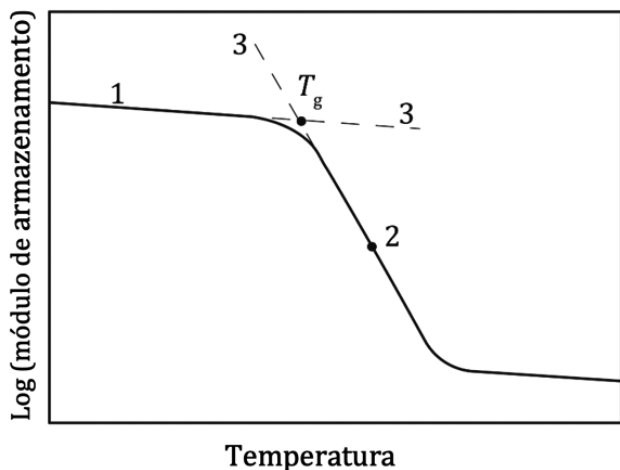


Figura 4 Determinação do valor da T_g com base em ensaios de DMA (1 – estado vítreo; 2 – ponto de inflexão na região de transição vítrea; 3 – linhas tangentes)

A CEN/TS 19101:2022 aplica-se a estruturas em compósitos de fibra-polímero em que as temperaturas no material dos elementos

estruturais, das ligações e dos componentes, em condições de serviço, sejam superiores a -40 °C e inferiores a $T_g - 20\text{ °C}$, em que T_g é a temperatura de transição vítrea do material (compósito, núcleo ou adesivo). O valor da T_g é obtido através de análises dinâmicas mecânicas (DMA), de acordo com o procedimento indicado na norma ISO 6721-11:2019 [10], correspondendo ao valor do início do decaimento do módulo de armazenamento (Figura 4). De acordo com a CEN/TS 19101:2022, o valor da T_g deve ser pelo menos 60 °C . Estes requisitos são particularmente relevantes dada a dependência das propriedades dos materiais compósitos de fibra-polímero e dos materiais de núcleo e dos adesivos poliméricos da temperatura.

3 Termos, definições e símbolos

Os termos utilizados na CEN/TS 19101:2022 são introduzidos na secção 3, que apresenta definições relacionadas com (i) os materiais constituintes, (ii) os processos de fabrico, (iii) os componentes e elementos estruturais em compósito, (iv) o dimensionamento, (v) os modos de rotura, (vi) as ligações, e (vii) os defeitos e anomalias. Esta secção inclui também uma lista detalhada de símbolos e abreviaturas, especificando ainda as convenções de eixos dos componentes e elementos estruturais. Este último aspecto é particularmente relevante em compósitos de fibra-polímero dada a sua ortotropia.

4 Bases de dimensionamento

As bases de dimensionamento são apresentadas na secção 4, seguindo a filosofia e o formato geral de segurança dos Eurocódigos (baseado em factores parciais, factores de conversão e valores característicos da resistência e das ações), sendo complementados por disposições específicas para estruturas em compósitos de fibra-polímero.

O dimensionamento de elementos estruturais em compósitos de fibra-polímero, adoptado para a generalidade das verificações de segurança, e de ligações aparafusadas é efectuado de acordo com o formato de resistência definido pela Equação (1), em que o valor de cálculo da resistência, R_d , é determinado a partir de:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot \gamma_m} R \{ \eta_{ct} \cdot X_{ki}; \alpha_d; \sum F_{Ed} \} \quad (1)$$

em que,

γ_{Rd} é um fator parcial que tem em conta as incertezas no modelo de resistência e na geometria;

γ_m é um fator parcial que tem em conta os desvios desfavoráveis de uma propriedade representativa do material³ em relação ao seu valor característico;

η_{ct} é o fator de conversão, que tem em conta os efeitos da temperatura e da humidade na propriedade do material i (discutido adiante);

R é o resultado do modelo de resistência;

X_{ki} representa os valores característicos (quantil de 5%) da propriedade do material i incluída no modelo de resistência;

α_d representa valores de cálculo de parâmetros geométricos;

F_{Ed} representa os valores de cálculo das ações utilizados para avaliar o valor de cálculo do efeito das ações E_d .

O formato de resistência definido pela Equação (1) não é o tradicionalmente seguido nos outros Eurocódigos, em que os factores parciais γ_{Rd} e γ_m são substituídos por um factor parcial único, $\gamma_{M'}$, que tem em conta, conjuntamente, as incertezas nas propriedades do(s) material(is) e no modelo de resistência. Na CEN/TS 19101:2022, optou-se pelo formato de resistência definido pela Equação (1) pelas seguintes razões: (i) os materiais compósitos de fibra-polímero podem ser produzidos com diferentes materiais constituintes e diferentes conteúdos e orientações de fibras, através de vários processos de produção, o que, naturalmente, pode resultar numa gama de variação significativa para as propriedades; (ii) também foram observadas diferentes incertezas nos modelos de resistência aplicáveis a vários modos de rotura; (iii) alguns modelos de resistência incluem um número significativo de propriedades, nalguns casos correspondentes a diferentes materiais (por exemplo, no caso de painéis sanduíche).

Para a verificação da segurança associada à rotura em fluência e à fadiga, e para o dimensionamento de ligações coladas e em situação de incêndio, o formato de resistência adoptado inclui

³ Esta propriedade representativa utilizada para definir o valor de γ_m é a propriedade material cuja incerteza é mais relevante para a incerteza geral da resistência correspondente a um dado modo de rotura.

um factor parcial único, $\gamma_{M'}$, que considera todas as incertezas e desvios mencionados acima. Tal opção deveu-se à falta de dados experimentais, que não permitiu distinguir entre os factores parciais γ_m e γ_{Rd} .

4.2 Factores parciais

O fator parcial da propriedade material representativa, γ_m , depende apenas do seu coeficiente de variação, V_x , que deve ser determinado por meio de ensaios (Tabela 1).

Tabela 1 Definição do fator parcial γ_m a partir do coeficiente de variação da propriedade material representativa (V_x)

V_x	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
γ_m	1,07	1,15	1,23	1,32	1,41	1,51

Relativamente ao fator parcial do modelo de resistência, γ_{Rd} , a CEN/TS 19101:2022 indica valores que são função do tipo de componente ou elemento estrutural e do modo de rotura. Em particular, são indicados valores de γ_{Rd} para: (i) perfis e laminados (para rotura material, ou para encurvadura global e local); (ii) painéis sanduíche (para rotura material, encurvadura global e local, enrugamento das faces, indentação ou punçoamento do núcleo); e (iii) ligações aparafusadas (tração, esmagamento, corte, corte em bloco, arrancamento). Para alguns modelos de resistência, quando tal foi possível, os valores de γ_{Rd} fornecidos na CEN/TS 19101:2022 foram obtidos a partir de análises estatísticas detalhadas e análises de fiabilidade [11,12], com base nos procedimentos e hipóteses definidos na prEN 1990:2021 [13] e na ISO 2394:2014 [14]. A título de exemplo, na Tabela 2 apresentam-se os valores de γ_{Rd} para perfis e laminados.

Tabela 2 Valores de γ_{Rd} para perfis e laminados

Rotura material	Encurvadura global			Encurvadura local
	Flexão	Flexão lateral-torção	Flexo-torção	
	1,40	1,30	1,30	1,55

Para a verificação da segurança associada à rotura em fluência e à fadiga, e para o dimensionamento de ligações coladas e em situação de incêndio, o valor do factor parcial ($\gamma_{M'}$) foi definido com base em valores propostos na literatura (por exemplo, em [15]), em juízo de engenharia, em verificações de plausibilidade (no caso da fadiga) e, no caso das verificações em situação de incêndio, nas disposições incluídas nas partes do fogo de outros Eurocódigos.

4.3 Factores de conversão

O factor de conversão, η é definido como o produto de dois factores (parcelares) de conversão, que consideram os efeitos da temperatura, η_{ct} , e os efeitos da humidade, $\eta_{cm'}$, pressupondo-se que os efeitos combinados daqueles dois agentes podem ser determinados multiplicando os seus efeitos individuais:

$$\eta_c = \eta_{ct} \cdot \eta_{cm} \quad (2)$$

A CEN/TS 19101:2022 fornece valores nominais para fatores de conversão, que são aplicáveis a determinados materiais compósitos (bem como a núcleos de painéis sanduíche e adesivos) e a condições ambientais específicas, e que são válidos para um período de 50 anos. Este período pode ser alargado, caso sejam implementados procedimentos de manutenção e inspeção apropriados. Como alternativa aos valores nominais dos fatores de conversão fornecidos, as propriedades dos materiais dependentes da temperatura e da humidade podem ser determinadas com base em ensaios, de acordo com o Anexo D da prEN 1990:2021 [13]. O mesmo se aplica a quaisquer propriedades materiais que sejam afetadas por condições ambientais não cobertas pelos fatores de conversão fornecidos na CEN/TS 19101:2022.

O fator de conversão para a temperatura, η_{ct} , tem em consideração a alteração nas propriedades dos materiais quando estes, em condições de serviço, são sujeitos a temperaturas superiores a 20 °C, temperatura de referência para a qual são determinadas as propriedades materiais utilizadas no dimensionamento. Na CEN/TS 19101:2022, são fornecidos valores nominais de factores de conversão para a temperatura para materiais compósitos, que dependem do tipo de propriedade mecânica (em particular, se esta é dominada pelas fibras ou pela matriz), e que são função da T_g do material e da temperatura de serviço. São também fornecidos valores nominais de factores de conversão para a temperatura para espumas poliméricas e madeira de balsa (utilizadas em painéis sanduíche), igualmente dependentes da T_g e, no caso da madeira de balsa, também dependentes da sua densidade.

Assim, para materiais compósitos, o fator de conversão para a temperatura é definido da seguinte forma:

$$\eta_{ct} = \min \left\{ 1 - \alpha \cdot \frac{T_s - 20 \text{ °C}}{T_g - 20 \text{ °C}}; 1,0 \right\} \quad (3)$$

em que T_s é a temperatura máxima no material em condições de serviço e α é um parâmetro que foi definido (calibrado) com base em resultados disponíveis na literatura. Para compósitos constituídos por fibras de vidro, carbono ou basalto, e matrizes de resina termoendurecível de poliéster, viniléster ou epóxi, foram definidos valores de $\alpha = 0,25$ e $\alpha = 0,80$ para propriedades dependentes das fibras e da matriz, respectivamente.

O fator de conversão para a humidade, η_{cm} , tem em consideração as alterações nas propriedades dos materiais devido à absorção de humidade ao longo do tempo, incluindo os efeitos de envelhecimento resultantes de uma exposição a longo prazo. A CEN/TS 19101:2022 apresenta valores nominais de η_{cm} para materiais compósitos não protegidos e para adesivos epóxicos, para três classes de exposição: (i) a classe I corresponde a aplicações interiores; (ii) a classe II diz respeito a aplicações exteriores sem exposição contínua à água ou a humidade relativa elevada; (iii) a classe III representa situações de exposição contínua à água ou a humidade relativa elevada. Para materiais compósitos com as características referidas acima e com um teor volumétrico de fibras superior a 35%, foram definidos os seguintes factores de conversão para a humidade: classe I - $\eta_{cm} = 1,0$; classe II - $\eta_{cm} = 0,85$; classe III - $\eta_{cm} = 0,60$.

Os valores nominais dos fatores de conversão fornecidos na CEN/TS 19101:2022 foram obtidos com base em resultados experimentais reportados na literatura e em considerações estatísticas, descritas em detalhe em [6,16,17].

4.4 Efeitos da fluência

Os materiais em compósitos de fibra-polímero, bem como os materiais de núcleo utilizados em painéis sanduíche e os adesivos poliméricos apresentam um comportamento viscoelástico. Deste modo, de acordo com a CEN/TS 19101:2022, os efeitos de fluência são tidos em conta, quer nas deformações, quer na resistência.

Os efeitos da fluência nas deformações são tidos em consideração por meio de coeficientes de fluência, que reduzem os módulos elásticos relevantes dos materiais. Na CEN/TS 19101:2022, são especificados valores dos coeficientes de fluência para diferentes módulos elásticos de perfis pultrudidos, laminados compósitos (com diferentes tipos de arquitectura de fibras) e materiais de núcleo de origem polimérica, para um período de vida útil de 50 anos (o Anexo A fornece valores adicionais para outros períodos). Os valores recomendados foram obtidos com base em resultados experimentais disponíveis na literatura e, também, noutras recomendações de dimensionamento. A título de exemplo, na Tabela 3, indicam-se os valores dos coeficientes de fluência definidos para perfis pultrudidos.

Tabela 3 Valores do coeficiente de fluência, $\phi(t)$, para perfis pultrudidos

Propriedade	50 anos	100 anos
E_x^{full}	0,70	0,84
G_{xy}^{full}	2,09	2,62
$E_{x,t}$	0,26	0,28
$E_{x,c}$	0,41	0,48

- E_x^{full} e G_{xy}^{full} são, respetivamente, o módulo de elasticidade e de distorção efectivos da secção, para elementos à flexão; $E_{x,t}$ e $E_{x,c}$ são, respetivamente, o módulo de elasticidade em tracção e em compressão (na direcção longitudinal).
- Valores válidos para: (i) fibras de vidro, basalto ou carbono; (ii) teor volumétrico de fibras superior a 35%; e (iii) temperatura até 25 °C e humidade relativa até 65%.

Os efeitos da fluência na resistência são considerados limitando os níveis de tensão em elementos estruturais e em componentes para as combinações quase permanentes de ações. Esta limitação depende do tipo de fibras, dada a diferente susceptibilidade das fibras de vidro, basalto, aramida ou carbono ao fenómeno da rotura por fluência (designado, na literatura inglesa, por "creep rupture"). Para este efeito, são definidos valores de um factor de redução da resistência, aplicáveis a diferentes tipos de fibras e a um período de 50 anos (Tabela 4). Estes valores foram definidos com base em dados disponíveis na literatura [6], incluindo o estudo de Benmokrane *et al.* [18], bem como em juízo de engenharia.

Tabela 4 Fator de redução da resistência para rotura em fluência à tracção para compósitos com fibras unidireccionais, $k_{L,creep}$ para diferentes tipos de fibras e para um período de 50 anos

Tipo de fibra	Vidro	Aramida	Basalto	Carbano
$k_{L,creep}$	0,4	0,5	0,6	0,9

5 Materiais

A secção 5 da CEN/TS 19101:2022 apresenta um conjunto de requisitos para os materiais compósitos, núcleos e adesivos, incluindo a determinação das suas propriedades físicas e mecânicas.

De acordo com a Especificação Técnica, no dimensionamento de estruturas em compósitos de fibra-polímero, as propriedades dos materiais devem ser obtidas com base em ensaios. Nesta secção 5, são indicados os métodos de ensaio para obter as propriedades dos materiais compósitos de fibra-polímero, dos materiais de núcleo de sanduíches e dos adesivos. Preferencialmente, são indicadas normas EN e ISO, de acordo com os requisitos do CEN/TC250; alternativamente, na inexistência de normas EN e ISO, são indicadas normas ASTM.

Nesta secção são fornecidas instruções sobre como extrair e/ou fabricar provetes de ensaio, de forma a evitar danificar elementos estruturais em compósitos de fibra-polímero, por exemplo, protótipos de pontes pedonais produzidas numa peça única por infusão a vácuo. Também são fornecidas disposições para situações em que a geometria dos componentes em compósito apresenta restrições ao cumprimento dos requisitos das normas de ensaio (por exemplo, comprimento insuficiente numa dada direcção); nesse caso, é possível ensaiar laminados de maior dimensão, representativos do componente que se pretende caracterizar, desde que sejam produzidos pelo mesmo método, com a mesma espessura, arquitetura e teor de fibras. São ainda fornecidas disposições para situações em que os laminados em compósito são demasiado espessos, o que pode dificultar ou mesmo impossibilitar o seu ensaio; nesse caso, é possível realizar ensaios ao nível do sub-laminado ou da camada, e aplicar posteriormente a teoria dos compósitos laminados com um critério de rotura apropriado.

No Anexo B da Especificação Técnica são fornecidos valores indicativos (médios) de propriedades de materiais seleccionados, os quais podem ser aplicados a um nível de projecto preliminar (pré-dimensionamento), desde que sejam assumidos valores apropriados dos coeficientes de variação de forma a determinar os correspondentes valores característicos e de cálculo.

6 Durabilidade

A secção 6 fornece orientações sobre a selecção e o processamento dos materiais constituintes dos compósitos a produzir. São descritas as condições ambientais mais relevantes a que os compósitos poderão estar sujeitos durante o seu tempo de vida útil e os seus principais efeitos nas propriedades dos materiais ao longo do tempo. São também fornecidas recomendações sobre a aplicação

de eventuais medidas de protecção para determinadas condições ambientais, tanto para elementos estruturais, como para as suas ligações. A secção considera as seguintes condições ambientais, que podem actuar isoladamente ou em conjunto: (i) temperatura, (ii) humidade, (iii) produtos químicos, e (iv) radiação ultravioleta (UV).

7 Análise estrutural

Na secção 7 são detalhadas as disposições para a análise estrutural de laminados, perfis, painéis sanduíche, ligações e estruturas híbridas. Estas disposições têm em conta os aspetos gerais que caracterizam as estruturas em compósitos, incluindo a ortotropia dos materiais e o seu comportamento elástico-linear, a influência da deformabilidade por corte e a viscoelasticidade.

Esta secção inclui, de forma explícita, fórmulas para a análise estrutural de painéis sanduíche com diferentes tipologias. As ligações - simples, semi-contínuas e contínuas - são também abordadas nesta secção. São fornecidas disposições sobre análises de primeira ordem, baseadas na geometria inicial da estrutura, e análises de segunda ordem, tendo em conta a influência da deformação da estrutura, e de eventuais imperfeições. São ainda fornecidas disposições para a análise estrutural através de simulação analítica e numérica, com recurso a modelos de elementos finitos, para laminados, perfis e painéis sanduíche.

8 Estados limite últimos

As verificações aos Estados Limite Últimos (ELU) para laminados, perfis e painéis sanduíche são descritas em quatro subsecções da secção 8 e um anexo (Anexo C para laminados e perfis). Na parte final desta secção 8 é também incluída a verificação ao ELU de rotura por fluência.

No que diz respeito aos laminados, são fornecidas fórmulas de verificação dos ELU para laminados simétricos balanceados nos casos de (i) tensões devidas a esforços axiais, de flexão e de corte no plano, (ii) tensões de tração e flexão para fora do plano, (iii) tensões de corte interlaminar, e (iv) estados de tensão envolvendo a combinação de diferentes tipos de tensões, no plano e para fora do plano.

Para perfis, a Especificação Técnica fornece fórmulas de verificação dos ELU, para os tipos de esforços mais comuns, ou seja, esforço axial, flexão, corte e torção, fornecendo ainda disposições para a compressão transversal ao eixo dos perfis. São também consideradas combinações de esforços axiais e de flexão, e de flexão e corte.

Para painéis sanduíche, a Especificação Técnica inclui mais de 20 verificações para diferentes tipologias, nomeadamente, com núcleos homogéneos ou contendo almas em compósitos. As verificações aos ELU para painéis sanduíche foram objeto de uma revisão muito significativa em relação ao Relatório Científico e Técnico desenvolvido na primeira fase [4]. Para além dos modos de rotura típicos nos laminados das faces (e das almas) e do modo de rotura por corte do núcleo, a Especificação Técnica inclui também outras verificações, tais como o enrugamento dos laminados das faces ("face sheet wrinkling", na literatura inglesa), a indentação

do núcleo e a perfuração do núcleo. Em relação à interface entre as faces e o núcleo do painel sanduíche, a rotura deve ocorrer necessariamente no núcleo, o que deverá ser verificado com recurso a ensaios experimentais.

9 Estados limite de serviço

As verificações aos Estados Limite de Serviço (ELS) são tratadas na secção 9, onde são considerados os seguintes critérios: (i) deformações, (ii) vibrações, e (iii) fissuração da matriz dos laminados. Esta última verificação, relevante em algumas aplicações (por exemplo, em aplicações exteriores), é efectuada através do controlo da extensão de tração para a combinação frequente de ações, considerando os efeitos da fluência das ações permanentes e a componente quase permanente das ações variáveis. Para este efeito, são fornecidos valores de referência para a extensão limite de tração que provoca fissuração da matriz de laminados produzidos com resinas de poliéster e de epóxi.

10 Fadiga

As verificações relativas à fadiga são abordadas na secção 10. A abordagem seguida na Especificação Técnica requer a verificação da fadiga com base em ensaios à escala real, ou seja, ao nível dos elementos estruturais e das ligações (em termos de esforços internos, ou seja, forças e/ou momentos), e não ao nível dos detalhes críticos (e das suas concentrações de tensões). Esta abordagem deve-se ao facto de a rotura por fadiga ocorrer normalmente em locais onde ocorrem alterações geométricas das secções ou alterações dos materiais, que geram concentrações de tensões, tornando as verificações baseadas em tensões de difícil materialização. Além disso, os ensaios ao nível dos elementos estruturais ou das ligações têm em consideração os efeitos das imperfeições geométricas e materiais, e não estão associados a efeitos de escala.

O modelo de ação de fadiga devido às cargas de tráfego deve ser definido com base nas especificações do projeto e da EN 1991-2:2023 [19], considerando-se o valor médio da tensão, do qual depende o tempo de vida útil de fadiga da estrutura. Neste contexto, os modelos de ações de fadiga (FLMs – da literatura inglesa, “*Fatigue Load Models*”) FML1-FML3 da EN 1991-2:2023 [19] não estão adaptados para pontes em compósitos e, por isso, não lhes são aplicáveis. Além disso, o modelo FLM4 representa uma ação de amplitude variável (VA) e a verificação da segurança à fadiga com uma ação de amplitude variável origina dois problemas relevantes no dimensionamento de estruturas em compósitos: (i) o esforço envolvido em ensaios experimentais é considerável, e (ii) considera-se que a regra de dano linear de *Miner* (em que o método é baseado) não é aplicável a estruturas em compósitos, porque pode sobrestimar ou subestimar significativamente o seu tempo de vida útil de fadiga.

Neste contexto, a verificação da fadiga é realizada a partir de dois passos sucessivos:

- Passo 1: Em primeiro lugar, deve ser aferida a necessidade de verificação da segurança à fadiga, com base, entre outros aspectos, (i) no rácio entre os efeitos da ação causados (no

elemento estrutural ou ligação) pelo modelo de ação de fadiga e a sua resistência estática, e (ii) o número de ciclos da ação de fadiga – Eq. (10.1) da Especificação Técnica;

- Passo 2: Aplicação de uma equação analítica – Eq. (10.3) da Especificação Técnica -, na qual se considera: (i) um factor parcial único para a resistência à fadiga, γ_{Mf} , conforme mencionado acima; (ii) o valor característico da resistência à fadiga (de um elemento ou ligação), obtido a partir de ensaios experimentais, com recurso a carregamento cíclico de amplitude constante; e (iii) os fatores de conversão (temperatura e/ou humidade) para ações estáticas, que se assumem serem também aplicáveis a ações de fadiga.

Os valores do factor parcial γ_{Mf} fornecidos pela Especificação Técnica dependem: (i) do tipo de inspeção e manutenção e da acessibilidade a zonas críticas para efeitos de fadiga (e.g. ligações), e (ii) das consequências do colapso desse elemento ou ligação e da existência de redundância estrutural, ou seja, da sua rotura resultar ou não no colapso da estrutura ou de partes críticas desta, de acordo com os princípios da prEN 1990:2021 [13] e as recomendações de Clarke [15].

Relativamente ao valor característico da resistência à fadiga (a obter por via experimental), a Especificação Técnica fornece as disposições para a realização de ensaios de fadiga (incluindo a concepção do sistema de ensaio, o nível de carregamento e a frequência) e para a aferição dos resultados. Para este efeito, estão previstos dois tipos de ensaios: (i) ensaios de qualificação, associados ao desenvolvimento de um novo produto ou para novas aplicações, e (ii) ensaios de verificação, aplicáveis quando são feitas adaptações ligeiras a um produto existente.

11 Pormenorização

A Secção 11 fornece disposições relativas à pormenorização de elementos estruturais e ligações. São fornecidas recomendações com o objetivo de minimizar os efeitos das concentrações de tensões e das condições ambientais, que são críticos para a resistência à fadiga e para a durabilidade. Estas disposições incluem detalhes de pormenorização para perfis, painéis sanduíche e laminados, bem como para ligações aparafusadas e coladas.

O Anexo E, de caráter informativo, ilustra detalhes genéricos para pontes em compósitos, igualmente críticos para a sua resistência à fadiga e durabilidade. Esses detalhes incluem ligações dos tabuleiros aos apoios e encontros, juntas de dilatação, ligações entre tabuleiros e longarinas, vigas de bordadura/cornijas e fixações de barreiras de proteção.

12 Ligações

A Secção 12 é dedicada ao dimensionamento de ligações, estando subdividida em 3 subsecções, aplicáveis a ligações aparafusadas, ligações coladas e ligações híbridas aparafusadas-coladas.

No que diz respeito às ligações aparafusadas sob ações no plano do laminado do material compósito, a sua resistência deve ser verificada para modos de rotura por tração, por esmagamento, por corte e por corte em bloco.

No caso de ações de tração para fora do plano do laminado do material compósito, deverão ser realizadas verificações de segurança associadas a (i) rotura por arrancamento do laminado, (ii) rotura do parafuso por tração, e (iii) rotura do laminado devido à interação entre forças no plano e forças para fora do plano.

No caso de ligações entre elementos estruturais, deverão ser verificados os modos de rotura associados a forças de corte e de arrancamento das peças de ligação, por exemplo, com recurso a cantoneiras em compósito.

As ligações coladas têm de ser necessariamente concebidas com redundância, ou seja, a sua rotura não deve resultar no colapso da estrutura ou de partes críticas desta. A rotura de uma ligação colada é considerada uma situação acidental de acordo com a prEN 1990:2021 [13]. A rotura de ligações coladas deve ser aferida experimentalmente, devendo ser coesiva, no adesivo ou no material compósito que se pretende ligar. A rotura adesiva, ou seja, na interface compósito-adesivo, não é permitida, podendo ser evitada por intermédio de uma seleção apropriada de materiais (compósito e adesivo, e, se necessário, primário) e uma preparação da superfície adequada.

Para a verificação da segurança de ligações coladas, é considerado um fator parcial único para a resistência da ligação colada, γ_{Mac} . Este fator parcial depende (i) do tipo de inspeção e manutenção, bem como da acessibilidade à ligação colada, e (ii) das condições de aplicação, que podem ser totalmente controladas, ou seja, com parâmetros de produção reprodutíveis, ou apenas parcialmente controlados. Devido à falta de resultados experimentais suficientes na literatura existente, a gama de valores de γ_{Mac} indicada na Especificação Técnica baseou-se no EuroComp [15]. Contudo, a origem dos valores dos fatores parciais aí indicados não pôde ser completamente rastreada e, portanto, os mesmos requerem validação adicional.

A Especificação Técnica prevê três métodos para o dimensionamento de ligações coladas, com base: (i) em ensaios experimentais; (ii) em análise de tensões; e (iii) na mecânica da fratura. Para os dois últimos métodos são fornecidos critérios de rotura, sendo necessária validação experimental em ambos os casos.

São ainda incluídas disposições para o dimensionamento de ligações híbridas aparafusadas-coladas. Nestas ligações, dependendo da rigidez relativa da camada de adesivo, as resistências individuais das ligações aparafusadas e coladas podem ou não ser somadas.

13 Resistência ao fogo

O Anexo D da Especificação Técnica aplica-se à verificação da resistência ao fogo de estruturas em compósitos de fibra-polímero sujeitas à situação acidental de incêndio. Para o efeito, são consideradas estruturas em compósitos com função resistente, função de compartimentação ou ambas. A estrutura do Anexo D está em conformidade com as partes referentes à resistência ao fogo dos Eurocódigos aplicáveis a outros materiais estruturais.

A primeira subsecção fornece as bases do dimensionamento, incluindo as curvas de incêndio (fogo nominal e paramétrico), as ações, os valores de cálculo das propriedades dos materiais, os

métodos de verificação, a análise de elementos estruturais, a análise de partes das estruturas, a análise estrutural global e as medidas de proteção contra incêndio.

A segunda subsecção refere-se às propriedades dos materiais, ou seja, as propriedades térmicas (emissividade, condutividade térmica, calor específico, densidade) e as propriedades mecânicas (resistências e módulos, coeficiente de expansão térmica). Para cada propriedade, são fornecidos valores indicativos dependentes da temperatura para determinados materiais em compósito, espumas poliméricas e núcleos de balsa, com base em dados experimentais disponíveis na literatura.

As restantes subsecções referem-se a métodos de dimensionamento tabulares e simplificados (para os quais ainda não são fornecidas orientações específicas), e a métodos de dimensionamento avançados. Para estes últimos, são fornecidas disposições para a análise térmica e mecânica de elementos estruturais em compósitos.

14 'Commentary' e 'Worked Examples'

Os membros do Project Team, em colaboração com membros do WG4 e outros especialistas internacionais, elaboraram também um conjunto de relatórios, agrupados no 'Commentary' [6], e uma coleção de exemplos práticos – 'Worked Examples' [7], ambos referentes à CEN/TS 19101:2022. Estes dois documentos complementares serão publicados em formato de livro, de acesso livre.

O 'Commentary' consiste na compilação de 395 relatórios, que se referem a parágrafos individuais relevantes da CEN/TS 19101:2022. Os relatórios apresentam informação complementar à Especificação Técnica, justificam as opções tomadas e os valores assumidos para determinadas propriedades e factores, indicando as respectivas referências. Cada relatório foi revisto por, pelo menos, dois revisores (membros do WG4 ou especialistas externos).

O documento 'Worked Examples' consiste na coleção de 15 exemplos práticos, com uma metodologia "passo a passo", para casos de projeto típicos, ilustrando a aplicação das disposições da Especificação Técnica. Foram desenvolvidos dois tipos de exemplos: (i) Tipo A – 11 exemplos esquemáticos sobre a aplicação de uma disposição específica da Especificação Técnica ao nível do elemento estrutural ou da ligação; (ii) Tipo B - 4 exemplos mais elaborados sobre o projeto de estruturas integrais ou partes de estruturas. Todos os exemplos práticos foram submetidos à revisão de, pelo menos, dois revisores, que incluíram especialistas em projeto de estruturas em compósito de fibra-polímero.

15 Considerações Finais

O presente artigo descreveu o conteúdo da recente Especificação Técnica CEN/TS 19101:2022, referente ao projeto de estruturas em compósitos de fibra-polímero. Relativamente ao Relatório Científico e Técnico [5] publicado aquando do primeiro passo para o desenvolvimento de um Eurocódigo estrutural para estruturas em compósitos, as seguintes secções ou subsecções foram alvo de revisões importantes ou foram agora adicionadas: (i) bases

de dimensionamento (fatores parciais, fatores de conversão e coeficientes de fluência); (ii) Estados Limite Últimos de estruturas em painéis sanduíche; (iii) rotura por fluência; (iv) fadiga; (v) ligações coladas; (vi) pormenorização; (vii) verificação da resistência ao fogo.

A par da Especificação Técnica, foram produzidos dois documentos complementares de suporte à comunidade técnica e científica: 'Commentary' e 'Worked Examples'. O primeiro documento fornece, para os parágrafos mais relevantes, informação complementar à da Especificação Técnica, incluindo o racional para as decisões que foram tomadas e os valores que foram adoptados. O segundo documento apresenta exemplos de cálculo que ilustram a aplicação da CEN/TS 19101:2022. Ambos os documentos contribuirão para disseminar o uso desta nova Especificação Técnica.

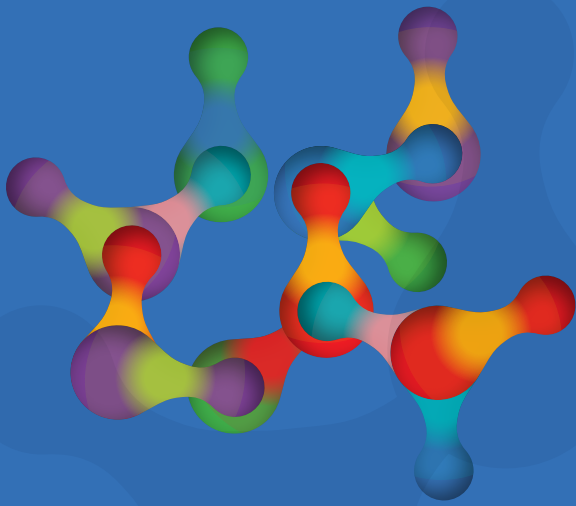
Finalmente, destaca-se o facto de não ter sido possível introduzir regras de execução na Especificação Técnica, pois estas estão fora do âmbito do CEN/TC 250. Em casos especiais, o CEN/TC 250 pode propor o desenvolvimento de regras de execução, caso nenhum outro Comité Técnico assumira esta tarefa, o que deverá envolver contribuições de um número significativo de partes interessadas, incluindo empreiteiros. O CEN/TC 250 acabou por seguir esta opção, tendo-se iniciado, em 2023, a elaboração de disposições relativas à execução de estruturas em compósitos de fibra-polímero.

Agradecimentos

O autor João R. Correia agradece à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento do projeto Reliable-FRP (PTDC/ECI-EGC/3916/2021 / doi.org/10.54499/PTDC/ECI EGC/3916/2021), bem como pelo financiamento da unidade CERIS (UIDB/04625/2020 / doi:10.54499/UIDB/04625/2020). O autor José Sena-Cruz agradece à FCT pelo financiamento da unidade ISISE (UIDB/04029/2020/ doi:10.54499/PTDC/ECI-EGC/4609/2020) e do Laboratório Associado ARISE (LA/P/0112/2020). Estes dois autores agradecem também à FCT pelo financiamento do projeto Durable-FRP (PTDC/ECI-EGC/4609/2020 / doi:10.54499/PTDC/ECI EGC/4609/2020).

Referências

- [1] M/515, 2012 – Mandate for amending existing Eurocodes and extending the scope of Structural Eurocodes. Ref. Ares (2012)1516834 - 18/12/2012. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General.
- [2] Correia, J.R. – "Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites", em *Materials for Construction and Civil Engineering*. Eds. M.C. Gonçalves, F. Margarido, Springer, 2015.
- [3] CEN/TC 250 – Structural Eurocodes N 1250. Policy Guidelines and Procedures, 2021.
- [4] Ascione, L., et al. – "Prospect for New Guidance in the Design of FRP". EUR 27666, 2016. DOI: 10.2788/22306
- [5] CEN/TS 19101:2022 – Design of Fibre-Polymer Composite Structures.
- [6] Correia, J.R.; Ascione, L.; Keller, T.; Mottram, T.; Knippers, J.; Paulotto, C.; Sena-Cruz, J. – "Design of Fibre-Polymer Composite Structures: Commentary to European Technical Specification CEN/TS 19101:2022", Taylor & Francis, 2024 (in press).
- [7] Ascione, L.; Correia, J.R.; Keller, T.; Mottram, T.; Knippers, J.; Paulotto, C.; Sena-Cruz, J. – "Design of Fibre-Polymer Composite Structures: Worked Examples for European Technical Specification CEN/TS 19101:2022", Taylor & Francis, 2024 (in press).
- [8] FprEN 1992-1-1:2022 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Annex R. Embedded FRP reinforcement.
- [9] FprEN 1992-1-1:2022 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Annex J. Strengthening of Existing Concrete Structures with CFRP.
- [10] ISO 6721-11:2019 – Plastics – Determination of dynamic mechanical properties. Part 11: Glass transition temperature.
- [11] Sa, M.F.; Pacheco, P.; Correia, J.R.; Silvestre, N.; Sørensen, J.D. – "Structural safety of pultruded FRP profiles for global buckling. Part 1: Approach to material uncertainty, resistance models, and model uncertainties". *Composite Structures*, 2021, 257, 113304.
- [12] Pacheco, J.; Sa, M.F.; Correia, J.R.; Silvestre, N.; Sørensen, J.D. – "Structural safety of pultruded FRP profiles for global buckling. Part 2: Reliability-based evaluation of safety formats and partial factor calibration". *Composite Structures*, 2021, 257, 113147.
- [13] prEN 1990:2021 – Eurocode 0. Basis of structural and geotechnical design.
- [14] ISO 2394:2014 – General principles on reliability for structures.
- [15] Clarke, J.L. – "Structural Design of Polymer Composites: Eurocomp Design Code and Handbook". London: E & FN Spon, 1996.
- [16] Garrido, M.; Sousa, J.M.; Correia, J.R.; Cabral-Fonseca, S. – "Prediction of long-term performance and definition of a moisture conversion factor for the durability design of pultruded GFRP profiles under hygrothermal exposure". *Construction and Building Materials*, 2022, 326, 126856.
- [17] Correia, J.R.; Keller, T.; Garrido, M.; Sá, M.; Firmo, J.P.; Shahid, M.A.; Machado, M. – "Mechanical properties of FRP materials at elevated temperature - Definition of a temperature conversion factor for design in service conditions". *Construction and Building Materials*, 2023, 367, 130298.
- [18] Benmokrane, B.; Brown, V.L.; Mohamed, K.; Nanni, A.; Rossini, M.; Shield, C. – "Creep-rupture limit for GFRP bars subjected to sustained loads". *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(6), 06019001.
- [19] EN 1991-2:2023 – Eurocode 1. Actions on structures - Traffic loads on bridges and other civil engineering works.



LNEC LISBON CONFERENCE

Urban Risks and Societal Resilience

14 - 15 October 2024
LNEC, Lisbon, Portugal

SAVE THE DATE
SAVE THE DATE
SAVE THE DATE

PROGRAMME

Urban Risks and Societal Resilience is the theme of the second edition of the LNEC Lisbon Conference.

The conference goals are:

- Exploring science-based solutions and innovative approaches to manage systemic risks related to geohazards
- Identifying stakeholders' needs to inform research agendas on fields related to urban risk management and societal resilience
- Promoting stakeholders' involvement on the exchange of knowledge and expertise

The Conference will consist of three half-day technical-scientific sessions on:

- 1. Geohazard risk assessment**
- 2. Urban risk management**
- 3. Building societal resilience**

Keynote
lectures

Stakeholders'
strategies and
challenges

Roundtable
discussions

Technical
visits

ATIC

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA DA INDÚSTRIA DE CIMENTO

A ATIC - Associação Técnica da Indústria de Cimento, tem como associadas a CIMPOR e a SECIL. Foi criada na década de 60 para promover uma melhor utilização do cimento, e ao seu cariz técnico e científico acresceram aspetos institucionais e de representação da indústria cimenteira nacional. A Indústria Cimenteira é fundamental para a economia local e nacional com um elevado efeito multiplicador na economia: estima-se que por cada euro de valor acrescentado na fileira de cimento e betão são gerados cerca de 3 euros na economia, efeito particularmente relevante para a economia local dado esta indústria estar sediada longe dos centros urbanos. O setor emprega, direta e indiretamente, 5.100 pessoas, e as suas exportações representaram 1,8 mil M€ entre 2005 e 2020, contribuindo assim para o equilíbrio da Balança de Pagamentos. Neste período, a indústria procedeu a investimentos significativos - 209M€ - em medidas de redução do impacto ambiental e em Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D&I) que se materializaram numa redução superior a 14% nas emissões específicas de CO2 por tonelada de cimento desde 1990.

Em março de 2021, apresentámos o Roteiro da Indústria Cimenteira para a Neutralidade Carbónica 2050 no qual estão explícitos o compromisso formal e o nosso alinhamento com as metas de descarbonização e sustentabilidade nacionais estabelecidas no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 do Governo Português, em consonância com os princípios do Pacto Ecológico Europeu, o qual reconhece que certos setores industriais com utilização intensiva de energia, como as cimenteiras, são indispensáveis para a economia europeia, visto fornecerem várias cadeias de valor fundamentais.

Visite-nos em www.atic.pt.

Associação Técnica da Indústria de Cimento

Rua Central Park, Edifício 3, N.º6, 4ºC, 2795 - 242 Linda-a-Velha

Tel. +351 213 510 830 – Email: cimento.atic@atic.pt



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

PORTUGUESE GROUP OF IABSE

CORPOS SOCIAIS

Realizou-se no passado dia 12 de julho a Assembleia Geral da APEE no decurso da qual foram eleitos os Corpos Sociais para o triénio 2023-2025.

DIREÇÃO

Presidente:	Luís Oliveira Santos
Vice-Presidente:	Elsa Caetano
Tesoureiro:	João Almeida Fernandes
Secretário:	João Ramôa Correia
Secretário:	Hélder S. Sousa
Vogal:	António Carrasquinho de Freitas
Vogal:	José Campos e Matos
Suplente:	Luís Carvalho Machado
Suplente:	Rita Moura

ASSEMBLEIA-GERAL

Presidente:	Fernando Branco
Vice-Presidente:	Álvaro Cunha
Secretário:	Teresa Oliveira Santos
Secretário:	Jorge de Brito
Suplente	Pedro Cabral

CONSELHO FISCAL

Presidente:	António Reis
Secretário:	Luís Simões da Silva
Relator:	Válter Lúcio
Suplente:	António Perry da Câmara



Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas

12ª EDIÇÃO DO PRÉMIO FERRY BORGES

Prémio FERRY BORGES 2024

Colaboração de
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Ordem dos Engenheiros

Submissão de candidaturas até **30-06-2024**

Regulamento e informações complementares:

www.apee.org.pt

APEE, a/c LNEC, Av. Brasil 101, 1700-066 LISBOA
Tel: 218 443 260 / e-mail: apee@lnecc.pt

Prémio

FERRY BORGES 2024

A 12ª edição do Prémio Ferry Borges, cujo prazo de apresentação de candidaturas terminou a 30 de junho de 2024, despertou um grande interesse no meio técnico e científico nacional. Com efeito, foram submetidas 88 candidaturas, resultantes de trabalhos desenvolvidos nas universidades e politécnicos nacionais, no LNEC e também em gabinetes de projeto, evidenciando a internacionalização da atividade desenvolvida e a cooperação com diversas entidades europeias e americanas.

As 88 candidaturas ao Prémio Ferry Borges 2024 vão agora ser analisadas pelo respetivo júri.



IABSE

International Association for
Bridge and Structural Engineering

Próximos eventos

IABSE
Congress 2024
San Jose, Costa Rica

Beyond Structural Engineering

Costa Rica Convention Centre
25 - 27 September 2024

Mais informações em: www.iabse.org/Sanjose2024

IABSE
Symposium
Tokyo 2025

May 18 - May 21, 2025
Waseda University and Rihga Royal Hotel, Tokyo

on Environmentally Friendly Technologies and Structures - Focusing on Sustainable Approaches

Submissão de resumos até 31 de julho de 2024
Mais informações em: www.iabse.org/tokyo2025

IABSE Congress
Ghent 2025
27 - 29 August 2025

The Essence of Structural Engineering for Society

Submissão de resumos até 12 de setembro de 2024
Mais informações em: www.iabse.org/Ghent2025



ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL

13—15
NOV FEUP
PORTO

O Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL BE2024 decorrerá na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) de 13 a 15 de novembro de 2024, dando continuidade aos Encontros Nacionais promovidos bianualmente pelo Grupo Português de Betão Estrutural (GPBE).

PALESTRAS CONFIRMADAS

Recent UHPFRC applications to make reinforced concrete bridges sustainable

Eugen Brühwiler (Professor Emeritus EPFL)

Precast Concrete in Tall Buildings

George Jones (Member of fib Commission 6 for prefabrication)

Ponte Ferreirinha sobre o Rio Douro: do concurso internacional de conceção ao projeto de execução

Gustavo Capellan (Arenas & Associados) e Filipe Vasques (Edgar Cardoso)

DATAS LIMITE

Submissão de resumos	31/07/2024
Submissão de artigos	31/07/2024
Notificação da aceitação de artigos	15/09/2024
Submissão final	30/09/2024

EXPOSIÇÃO TÉCNICA

As empresas interessadas em participar na Exposição Técnica podem desde já contactar o secretariado: be2024@fe.up.pt

Mais informações: <https://www.fe.up.pt/be2024>

ORGANIZAÇÃO



PRÉMIO JOVENS MESTRES

No seguimento do sucesso obtido em anos anteriores, o GPBE lança, com o apoio da SECIL, mais uma edição do "Prémio Jovens Mestres". Esta iniciativa visa premiar as melhores Dissertações de Mestrado finalizadas nos anos letivos de 2022-23 ou 2023-24, no domínio do Betão Estrutural.

As cinco melhores Dissertações de Mestrado submetidas ao concurso "Prémio Jovens Mestres" serão apresentadas oralmente pelos respetivos autores, numa sessão especial do Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL – BE2024.

DATAS LIMITE

Pré-inscrição dos candidatos: 31 julho 2024

Submissão das candidaturas: 20 setembro 2024

Mais informações disponíveis em:

<https://www.fe.up.pt/be2024/premio-jovens-mestres>

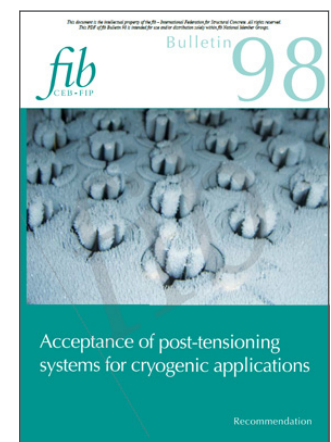
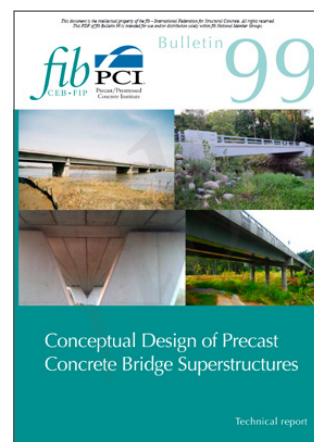
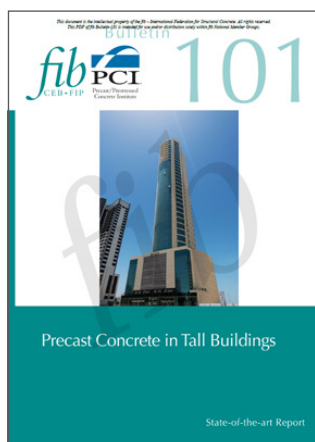
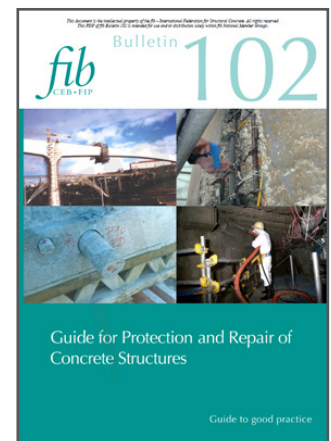
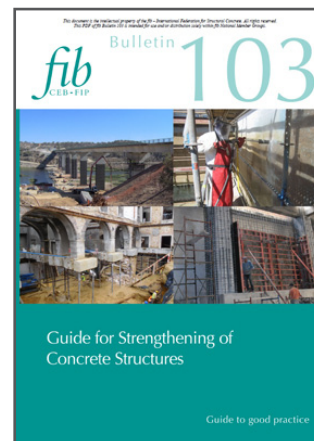
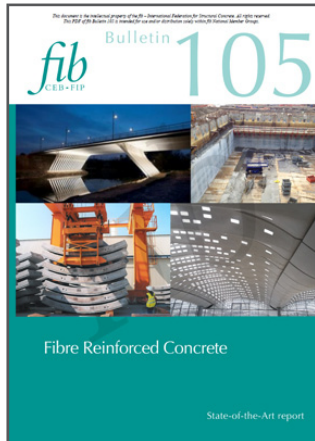
Com o apoio de:



Dá forma às ideias

ÚLTIMOS BOLETINS DA *fib* DISPONÍVEIS NA **ÁREA RESERVADA A SÓCIOS DO GPBE**

<http://www.gpbe.pt/index.php/consulta-de-boletins-da-fib>



Vantagens de ser Sócio do GPBE

Os associados do GPBE beneficiam de **uma redução no valor da inscrição nas ações organizadas pelo GPBE**, ou nos eventos que contem com o apoio do Grupo (os sócios coletivos podem inscrever 3 participantes ao valor reduzido).

A qualidade de sócio permite também o **acesso a uma área reservada no portal do GPBE** (www.gpbe.pt) onde é disponibilizada diversa informação científica e técnica, nomeadamente dos Encontros Betão Estrutural e, em especial, os boletins da *fib* - *International Federation for Structural Concrete*, da qual o GPBE é membro nacional.

Se ainda não é sócio e deseja associar-se ao Grupo registre-se **aqui**.

Quota de sócio individual: € 25,00

Quota de sócio coletivo: € 250,00

Se já é sócio do GPBE e não tem a sua situação regularizada, por favor regularize as suas quotas para manter os benefícios de sócio.



SOCIEDADE
PORTUGUESA DE
ENGENHARIA
SÍSMICA



A Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica (SPES) foi criada em 1973, com o apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, na continuidade do Grupo Português de Engenharia Sísmica.

A SPES é uma associação de carácter cultural e científico de pessoas individuais e coletivas, com os propósitos de fomentar o desenvolvimento da engenharia sísmica, sismologia e prevenção e defesa contra os sismos em Portugal, promovendo a divulgação da informação, o intercâmbio científico e técnico entre os seus associados e na sociedade, assegurar a representação portuguesa nas Associações Europeia e Internacional de Engenharia Sísmica (EAEE e IAEE).

Av. do Brasil, 101 1700-066
Lisboa • Portugal
Tel. (+351) 21 844 32 91
spes@lnec.pt
<http://spessismica.pt/>



Sismar, o podcast da SPES. Para descomplicar e dar resposta a questões sobre o risco sísmico em Portugal.

Sismar



spessismica.pt/sismar-podcast/

SPES





INOVAÇÃO EM CASCAS DE BETÃO ULTRAFINAS



BREVEMENTE

A SPRAL, em colaboração com cinco instituições de ensino superior e com o apoio financeiro da ANI, apresenta o projeto inovador I&I (Investigação & Inovação) Pre-Shell. Este projeto ambicioso está prestes a ser inaugurado e promete revolucionar o setor da construção civil através do desenvolvimento de tecnologias avançadas e economicamente viáveis para cascas ultrafinas de betão pré-fabricado.

O projeto Pre-Shell visa revitalizar e modernizar as cascas de betão ultrafinas. O objetivo é torná-las competitivas, não apenas do ponto de vista tecnológico e científico, mas também económico, reduzindo os custos de construção em pelo menos 25% em comparação com os métodos tradicionais.

Além disso, procura oferecer soluções estruturais pré-fabricadas que promovam formas arquitetónicas modernas e sustentáveis, alinhando-se com as tendências e necessidades contemporâneas do setor.

A combinação de inovação, vasta experiência e compromisso com a excelência coloca a SPRAL na vanguarda desta transformação tecnológica. O projeto Pre-Shell não representa apenas uma promessa de avanço, mas sim uma garantia de criação de espaços arquitetónicos deslumbrantes, eficientes e sustentáveis.

Com a data de inauguração próxima, este projeto abrirá caminho para uma nova era de possibilidades estruturais e estéticas na construção civil. Acompanhe o futuro da construção, onde a inovação encontra a sustentabilidade, transformando o impossível em realidade.



Rua Lagoa do Junco, 119 Moitinhos
3830-265 Ílhavo
PORTUGAL

T: (+351) 234 329 450
www.spral.pt
spral@spral.pt



Mais sobre o Pre-Shell





Instituto para a Construção Sustentável



Missão

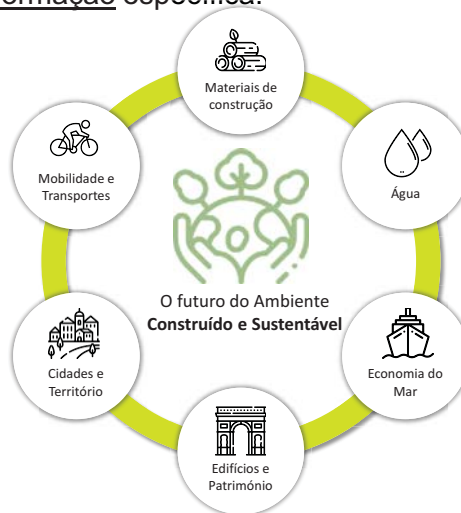
O **ICS** é uma associação privada, científica e técnica, sem fins lucrativos, tendo como missão estabelecer a **ligação** entre a **academia**, a **indústria** e a **sociedade** nas áreas da **Engenharia Civil** e áreas conexas para a promoção da Construção Sustentável, através da transferência de novos conhecimentos e de tecnologias inovadoras que resultem de atividades de investigação, desenvolvimento e inovação, prestação de serviços avançados de consultoria, assistência técnica, ensaios e formação específica.



Domínios de atividade

O **ICS** tem como visão ser uma interface científica e tecnológica multidisciplinar reconhecida pela sua capacidade de responder a **desafios sociais** e complexos nos seguintes **domínios**:

Materiais Ecoeficientes; Água e Economia do Mar; Edifícios e Património; Cidades e Território; Mobilidade e Transportes; Circularidade e Eficiência Energética; Digitalização e Sistemas Avançados de Produção; Riscos, Segurança e Resiliência.



R. Dr. Roberto Frias, s/n
Campus da FEUP
Edifício G – Piso 1
4200-465 Porto
+351 22 508 1856
+351 22 508 2190
+351 22 508 1907
+351 22 041 4877

www.fe.up.pt/ics
ics@fe.up.pt



Sistema CONSOLIDAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL

FASSAFER MONO

Tratamento cimentício mono-componente para a proteção ativa de armaduras



GEOACTIVE TOP B 525

Argamassa cimentícia monocomponente, tixotrópica, fibrorreforçada, de retração compensada



GEOACTIVE EASY REPAIR 500

Argamassa cimentícia monocomponente rápida, tixotrópica, fibro-reforçada, de baixíssima retração



C 285 BETON-E

Pintura elastomérica para proteção de betão



www.fassabortolo.com

FASSA BORTOLO

Consolidação e reforço estrutural

Betão armado, paredes de enchimento, alvenarias resistentes

As combinações das matrizes Kerakoll com os tecidos em fibra de aço e em fibra de basalto constituem os inovadores sistemas de reforço estrutural de baixa espessura, que oferecem múltiplas vantagens tais como: simplicidade de aplicação e comportamento resistente, módulo de elasticidade menor e tenacidade superior aos dos sistemas compostos de reforço estrutural mais comuns.



kerakoll



SOLUÇÕES PARA REPARAÇÃO E PROTEÇÃO DE BETÃO



É TUDO OK COM A MAPEI

Para mais informações em mapei.pt



ISOLAMENTO DE BASE



FIPMEC

Falhar não é opção!

- A forma mais eficaz de proteger infra-estruturas críticas a sismos
- Operacionalidade garantida e comprovada
- Baixo custo em relação ao valor da estrutura

Apoio local da Pretensa

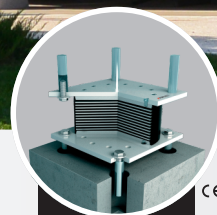
- Representante FIP MEC em Portugal
- Juntas de dilatação Sísmicas
- Monitorização Estrutural



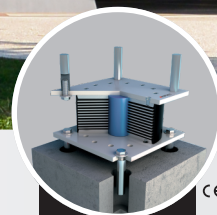
PRETENSA, LDA - Rua Eng. Frederico Ulrich 3210 - Sala 314
4470-605 Moreira da Maia - PORTUGAL
+351 229 416 633 | comercial@pretensa.com.pt
www.pretensa.com.pt



Pêndulo FIP-D



HDRB



LRB

Inovação Reforço Sismico com FRP's



A S&P é uma empresa líder no campo do reforço de estruturas com compósitos. Disponibilizamos soluções de reforço para estruturas em betão armado, aço alvenarias, madeira e pavimentos betuminosos.

Saiba mais: www.sp-reinforcement.pt

S&P

A Simpson Strong-Tie® Company

COM O APOIO DE:

A400

Projetistas e Consultores de Engenharia

ARMANDO ARITO
ENGENHARIA

ATIEC

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA DA
INDÚSTRIA DE CIMENTO

B| Betar
CONSULTORES

CACAO
CIVIL ENGINEERING

**FASSA
BORTOLO**
QUALIDADE PARA CONSTRUÇÃO

ICS Instituto para
a Construção
Sustentável

kerakoll

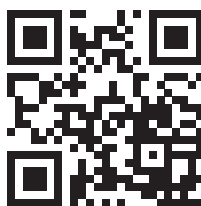
MAPEI

NCR CONSULTORIA
EM REABILITAÇÃO
DO EDIFICADO
E PATRIMÔNIO
EP

P **PRETENSA**

S&P
A Simpson Strong-Tie® Company

SPRAL



<http://rpee.lnec.pt/>

