



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.

Palavras-chave: Eurocódigo 9 / Alumínio / Estruturas

Keywords: Eurocode 9 / Aluminium / Structures

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.

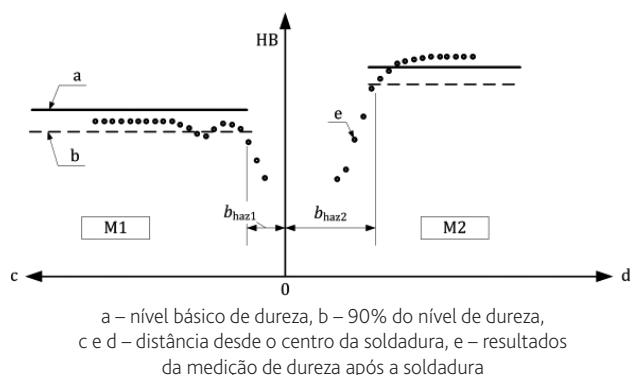


Figura 1 Esquema conceptual da determinação da HAZ através de ensaios de dureza (origem: EN 1999-1-1 [2])

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) A possibilidade de aplicação da teoria convencional do betão armado;
- b) Os pressupostos de verificação das secções planas até ao colapso;
- c) Os efeitos da viscosidade do betão;
- d) 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:

- a) 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).
- b) No que diz respeito aos sistemas de ligação, são propostas algumas soluções específicas, explorando características mecânicas e tecnológicas das ligas de alumínio.
- c) 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.
- d) 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.

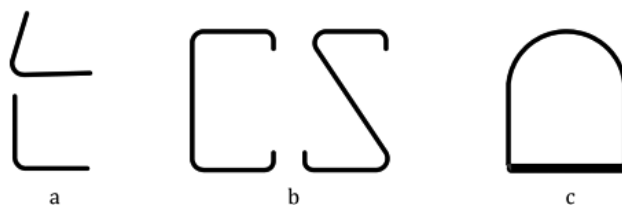


Figura 2 Exemplos de secções de perfis enformados a frio (a e b) e de uma secção transversal de um componente enformado a frio (origem: EN 1999-1-4 [5])

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.