

manual de  
**DIMENSIONAMENTO DE  
ESTRUTURAS EM AÇO INOXIDÁVEL**

Versão portuguesa da 4ª edição



Edição  
Aldina Santiago



**cmm**

ASSOCIAÇÃO  
PORTUGUESA  
DE CONSTRUÇÃO  
METÁLICA E MISTA

# MANUAL DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM AÇO INOXIDÁVEL

(versão portuguesa da 4ª edição)



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**Manual de Dimensionamento de Estruturas em Aço Inoxidável**

Versão Portuguesa da 4ª Edição

© CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

Do original: **Design Manual for Structural Stainless Steel – 4<sup>th</sup> Edition**

© 2017 SCI – Steel Construction Institute

Todos os direitos para a língua portuguesa reservados pela

Editora CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista  
Business Center Leonardo da Vinci  
Coimbra iParque Lt. 3  
3040-540 Coimbra  
[www.cmm.pt](http://www.cmm.pt)

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo eletrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Depósito Legal:

ISBN (CMM): 978-989-99226-9-3

ISBN (SCI): 978-1-8594-232-8

(Edição original, ISBN: 978-1-85942-226-7, SCI – Steel Construction Institute)

Novembro de 2017

Impressão: Pantone 4 – Design e Comunicação, Coimbra

# **MANUAL DE DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM AÇO INOXIDÁVEL**

(versão portuguesa da 4ª edição)

**Editor**

Aldina Santiago





# PREFÁCIO

## Quarta Edição

Aço inoxidável é o nome dado à família de aços com resistência elevada à corrosão e temperaturas elevadas, que contém, no mínimo, 10,5 % de cromo na sua composição química. O aço inoxidável tem sido usado na construção desde que foi criado há mais de cem anos. Os produtos em aço inoxidável são atrativos, resistentes à corrosão, requerem poucos requisitos de manutenção e apresentam uma boa resistência mecânica, tenacidade e fadiga. Os aços inoxidáveis podem ser fabricados utilizando uma grande variedade de técnicas de engenharia e são totalmente recicláveis no final do seu ciclo de vida. Este tipo de aço é apropriado para ser aplicado em edifícios situados em ambientes agressivos e em áreas costeiras, áreas expostas a saís de degelo e em áreas poluídas.

Este documento corresponde à tradução para português da 4ª edição do *Design Manual for Structural Stainless Steel* e é resultado do projecto RFCS Purest.

Este Manual de dimensionamento foi preparado para orientar os projetistas já experientes no dimensionamento de estruturas em aço de carbono estrutural, mesmo que não estejam familiarizados com o dimensionamento de estruturas de aço inoxidável. O Manual está dividido em duas partes:

- Parte I - Recomendações de dimensionamento;
- Parte II - Exemplos de cálculo.

As recomendações na Parte I aplicam-se aos aços inoxidáveis austeníticos, duplex e ferríticos tipicamente utilizados em aplicações estruturais. Estas recomendações estão formuladas em termos de estado limite último e em geral estão de acordo com as versões correntes das várias partes do Eurocódigos 3 - *Projeto de estruturas de aço*. Esta informação está organizada em 11 capítulos, que incluem: as propriedades do aço inoxidável, a durabilidade e seleção dos materiais, as bases para dimensionamento, a resistência de secções transversais, cálculo de elementos e ligações, resistência ao fogo, fadiga, dimensionamento por ensaios e aspetos de fabricação.

O Eurocódigo 3 está atualmente em revisão e será publicada uma nova versão, incluindo a EN 1993-1-4, em meados de 2023. Em certas instâncias, este Manual apresenta novas regras ou dados para dimensionamento que muito provavelmente serão incluídas na próxima versão da EN 1993-1-4. Uma caixa sombreada apresenta as diferenças entre as novas regras de dimensionamento e as regras atuais da EN 1993-1-4: 2015.

Este Manual apresenta valores recomendados para determinados fatores. Estes valores podem estar sujeitos a modificação proposta pelos Anexos Nacionais.

Os 15 exemplos de dimensionamento na Parte II demonstram o uso das recomendações da Parte I. Cada exemplo é relacionado com a recomendação correspondente.

Este documento está disponível [www.cmm.pt](http://www.cmm.pt). Adicionalmente está também disponível, na AppStore e em GogglePlay, uma aplicação: EC3 Stainless Steel Calculator, para iOS e Android, respetivamente, que permite de forma expedita o dimensionamento de estruturas em aço inoxidável.

O documento original: 4<sup>th</sup> edition of the *Design Manual for Structural Stainless Steel*, assim como informação adicional sobre as Orientações (*commentary*), estão disponíveis em [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual) e em [www.steelbiz.org](http://www.steelbiz.org).

As recomendações apresentadas no Manual foram baseadas no conhecimento disponível até à data de publicação. No entanto, nenhuma responsabilidade é tomada pelos membros

integrantes neste projeto no caso de qualquer tipo de dano, morte, perda, ou de atraso resultante da utilização das recomendações.

As organizações que participaram no projeto PUREST foram as seguintes:

**Universidade de Coimbra**

Paço das Escolas, Coimbra, 3001 451, Portugal  
[www.uc.pt](http://www.uc.pt)

**The Steel Construction Institute (SCI)**  
*(coordenador)*

Silwood Park, Ascot, SL5 7QN, United Kingdom,  
[www.steel-sci.com](http://www.steel-sci.com)

**Universität Duisburg-Essen (UDE)**

Universitätsstraße 2, Essen 45141, Germany  
[www.uni-due.de](http://www.uni-due.de)

**RINA Consulting – Centro Sviluppo Materiali S.p.A. (CSM)**

Via Di Castel Romano 100, Rome 00128, Italy  
[www.rinaconsulting.org/en/csm](http://www.rinaconsulting.org/en/csm)

**Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza (PRz)**

al. Powstancow Warszawy 12, Rzeszów, 35 959, Poland  
[www.prz.edu.pl](http://www.prz.edu.pl)

**Teräsrakenneyhdistys ry**

Unioninkatu 14 3 krs, Helsinki 00130, Finland  
[www.terasrakenneyhdistys.fi](http://www.terasrakenneyhdistys.fi)

**OneSource Consultoria Informática**

Urbanização Ferreira Jorge - 1º dto Lote 14, Coimbra 3040 016 , Portugal  
[www.onesource.pt](http://www.onesource.pt)

**Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)**

Calle Jordi Girona 31, Barcelona 08034 Spain  
[www.upc.edu](http://www.upc.edu)

**Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven)**

Oude Markt 13, Leuven 3000, Belgium  
[www.kuleuven.be](http://www.kuleuven.be)

**Stalbyggnadsinstitutet (SBI)**

Kungsträdgårdsgatan 10, 111 47 Stockholm, Sweden  
[www.sbi.se](http://www.sbi.se)

**Imperial College of Science Technology and Medicine**

South Kensington Campus Exhibition Road, London, SW7 2AZ, United Kingdom  
[www.imperial.ac.uk](http://www.imperial.ac.uk)

**České vysoké učení technické v Praze (CVUT)**

Zikova 4, Praha 16636, Czech Republic  
[www.cvut.cz](http://www.cvut.cz)

A quarta edição deste Manual foi coordenado por Nancy Badoo (The Steel Construction Institute, UK) e contou com a contribuição de: Sheida Afshan (Brunel University London, UK); Itsaso Arrayago (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain); Leroy Gardner (Imperial College London, UK); Graham Gedge (Arup, UK); Michal Jandera (Czech Technical University of Prague, Czech Republic); Esther Real (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain); Barbara Rossi (KU Leuven, Belgium); Natalie Stranghöner (Universität Duisberg-Essen, Germany); Ou Zhao (Nanyang Technological University, Singapore).

A tradução do Manual para português foi realizada por David Andrade, Eduardo Roque, Francisca Santos e Joel Cunha com a supervisão de Aldina Santiago da Universidade de Coimbra.

# AGRADECIMENTOS

As organizações abaixo mencionadas forneceram apoio financeiro para esta edição do Manual de Dimensionamento e agradecemos o seu apoio:

- The European Union's Research Fund for Coal and Steel;
- Outokumpu; Aperam;
- Industeel;
- AcerInox;
- Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM);
- Nickel Institute;
- Stalalube.



# INTRODUÇÃO

Este Manual de dimensionamento foi preparado para guiar os engenheiros experientes no dimensionamento de aço de carbono estrutural, mesmo que não estejam no campo do dimensionamento de estruturas de aço inoxidável. Não é de qualquer modo pretendido absolver o projetista da responsabilidade de assegurar uma estrutura segura e funcional.

O Manual está dividido em duas partes:

- Parte I - Recomendações;
- Parte II - Exemplos de Dimensionamento.

As recomendações na Parte I estão formuladas em termos de estado limite último e em geral estão de acordo com as versões correntes das seguintes partes do Eurocódigos 3-*Projeto de estruturas de aço*:

EN 1993-1-1 *Projeto de estruturas de aço: Regras gerais e regras para edifícios*

EN 1993-1-2 *Projeto de estruturas de aço: Verificação da resistência ao fogo*

EN 1993-1-3 *Projeto de estruturas de aço: Elementos e chapas finas enformados a frio*

EN 1993-1-4 *Projeto de estruturas de aço: Aço inoxidável*

EN 1993-1-5 *Projeto de estruturas de aço: Estruturas constituídas por placas*

EN 1993-1-8 *Projeto de estruturas de aço: Projeto de ligações*

EN 1993-1-9 *Projeto de estruturas de aço: Fadiga*

EN 1993-1-10 *Projeto de estruturas de aço: Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura*

O Eurocódigo 3 está atualmente em revisão e serão publicadas novas versões, incluindo a EN 1993-1-4, em meados de 2023. Em certas instâncias, o Manual de Dimensionamento apresenta novas regras ou dados para dimensionamento que muito provavelmente serão incluídas na próxima versão da EN 1993-1-4. Uma caixa sombreada explica a diferença entre as novas regras de dimensionamento e as regras atuais da EN 1993-1-4: 2015.

Este Manual apresenta valores recomendados para determinados fatores. Estes valores podem ser sujeitos a modificação a nível nacional ou pelos Anexos Nacionais.

Os exemplos de dimensionamento na Parte II demonstram o uso das recomendações. Um sistema de referência interliga os exemplos com a correspondente recomendação.

As recomendações e exemplos de dimensionamento estão disponíveis em: [www.cmm.pt](http://www.cmm.pt), [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual) e em Steelbiz, o sistema de informação técnica do SCI ([www.steelbiz.org](http://www.steelbiz.org)). Informação adicional sobre as Recomendações (*commentary*), no qual inclui um completo conjunto de referências, estão disponíveis online nos websites apresentados. O propósito do *Commentary* é permitir o acesso dos projetistas às recomendações básicas e facilitar o desenvolvimento de revisões quando são disponibilizados novos dados. Este documento de apoio é também utilizado para apresentar resultados de diversos programas de testes conduzidos especificamente para fornecer dados para o Manual de Dimensionamento.

## INTRODUÇÃO

Nos websites [www.cmm.pt](http://www.cmm.pt), [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual), bem como na AppStore (iOS) ou GooglePlay (Android), há software disponível e aplicações para dispositivos móveis que permite o cálculo das propriedades de secções e resistência de elementos para secções padrão ou secções com dimensões introduzidas pelo utilizador de acordo com as recomendações do Manual de Dimensionamento.

As recomendações apresentadas neste documento foram baseadas no conhecimento disponível até à data de publicação. No entanto, nenhuma responsabilidade é assumida pelos membros integrantes neste projeto no caso de qualquer tipo de dano, morte, perda, ou de atraso resultante da utilização das recomendações.

# ÍNDICE

Página Nº.

|                                |   |    |
|--------------------------------|---|----|
| PREFÁCIO                       | v   |    |
| AGRADECIMENTOS                 | vii   |    |
| INTRODUÇÃO                     | ix  |    |
| <b>PARTE I – RECOMENDAÇÕES</b> |   |    |
| 1                              | INTRODUÇÃO  | 3  |
| 1.1                            | Aços inoxidáveis, o que são?                            | 3  |
| 1.2                            | Aplicações estruturais do aço inoxidável                | 4  |
| 1.3                            | Aplicações do aço inoxidável na indústria da construção | 6  |
| 1.4                            | Objetivo do Manual de Dimensionamento                   | 7  |
| 1.5                            | Simbologia  | 8  |
| 1.6                            | Convenção dos eixos das secções                         | 10 |
| 1.7                            | Unidades  | 11 |
| 2                              | PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL                          | 13 |
| 2.1                            | Relação tensão-extensão do material                     | 13 |
| 2.2                            | Fatores que afetam o comportamento tensão-extensão      | 14 |
| 2.3                            | Normas relevantes e resistências de dimensionamento     | 15 |
| 2.4                            | Propriedades físicas                                    | 23 |
| 2.5                            | Efeito da temperatura                                   | 24 |
| 2.6                            | Galvanização e contacto com zinco fundido               | 24 |
| 2.7                            | Disponibilidade de produtos                             | 24 |
| 2.8                            | Ciclo de vida e impacto ambiental                       | 27 |
| 3                              | DURABILIDADE E SELEÇÃO DE MATERIAIS                     | 29 |
| 3.1                            | Introdução  | 29 |
| 3.2                            | Tipos de corrosão e desempenho das classes de aço       | 30 |
| 3.3                            | Corrosão em ambientes selecionados                      | 33 |
| 3.4                            | Dimensionamento para o controlo da corrosão             | 35 |
| 3.5                            | Seleção de materiais                                    | 37 |
| 4                              | BASES PARA O PROJETO                                    | 43 |
| 4.1                            | Requisitos gerais                                       | 43 |
| 4.2                            | Verificação da segurança aos estados limites            | 43 |
| 4.3                            | Carregamento  | 44 |
| 5                              | RESISTÊNCIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS                    | 45 |
| 5.1                            | Introdução  | 45 |
| 5.2                            | Relação largura/ espessura máxima                       | 45 |
| 5.3                            | Classificação de secções transversais                   | 45 |
| 5.4                            | Larguras efetivas                                       | 49 |
| 5.5                            | Elementos Reforçados                                    | 54 |
| 5.6                            | Cálculo das propriedades geométricas da secção          | 57 |
| 5.7                            | Resistência de secções transversais                     | 60 |
| 6                              | RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS                               | 65 |



## ÍNDICE

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 6.1  | Introdução   | 65  |
| 6.2  | Elementos tracionados  | 65  |
| 6.3  | Elementos comprimidos  | 65  |
| 6.4  | Elementos em flexão  | 69  |
| 6.5  | Elementos sujeitos à combinação de esforço axial e flexão      | 80  |
| 7    | RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES                                       | 85  |
| 7.1  | Recomendações gerais   | 85  |
| 7.2  | Ligações aparafusadas  | 86  |
| 7.3  | Ligadores mecânicos para materiais de espessura fina           | 92  |
| 7.4  | Ligações soldadas  | 92  |
| 8    | RESISTÊNCIA AO FOGO  | 97  |
| 8.1  | Introdução   | 97  |
| 8.2  | Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas                 | 97  |
| 8.3  | Determinação da resistência ao fogo                            | 100 |
| 8.4  | Propriedades térmicas para temperaturas elevadas               | 107 |
| 8.5  | Definição do material a temperaturas elevadas                  | 110 |
| 9    | FADIGA   | 111 |
| 10   | TESTES   | 113 |
| 10.1 | Introdução   | 113 |
| 10.2 | Determinação das curvas tensão-deformação                      | 113 |
| 10.3 | Testes em elementos  | 113 |
| 11   | ASPETOS DE FABRICAÇÃO  | 115 |
| 11.1 | Introdução   | 115 |
| 11.2 | EN-1090 Execução de estruturas em aço e estruturas em alumínio | 115 |
| 11.3 | Classes de execução  | 116 |
| 11.4 | Armazenamento e manuseamento                                   | 117 |
| 11.5 | Operações de enformação  | 118 |
| 11.6 | Soldadura  | 119 |
| 11.7 | Desgaste e emperramento  | 125 |
| 11.8 | Acabamento   | 125 |

## PARTE II – EXEMPLOS DE DIMENSIONAMENTO

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.  | Pilar com secção transversal do tipo CHS                                | 147 |
| 2.  | Viga-coluna com secção transversal I soldada e com travamentos laterais | 149 |
| 3.  | Chapa perfilada com dois vãos   | 153 |
| 4.  | Fadiga numa ligação soldada entre perfis tubulares                      | 161 |
| 5.  | Ligação soldada   | 163 |
| 6.  | Ligação aparafusada   | 171 |
| 7.  | Corte numa viga de alma cheia   | 177 |
| 8.  | Viga sujeita a cargas pontuais  | 183 |
| 9.  | Viga com banzo comprimido não restringido                               | 189 |
| 10. | Pilar sujeito a cargas axiais: Dimensionamento ao fogo                  | 197 |
| 11. | Chapa perfilada com dois vãos   | 205 |

|  |     |
|--|-----|
| 12. Viga com secção transversal C sujeita à flexão                           | 213 |
| 13. Treliza com secção transversal fechada                                   | 221 |
| 14. Aumento da tensão média de cedência para secções enformadas a frio       | 231 |
| 15. Utilização do método da resistência contínua no dimensionamento à flexão | 235 |



## **PARTE I – RECOMENDAÇÕES**



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Aços inoxidáveis, o que são?

Aço inoxidável é o nome dado à família de aços resistentes à corrosão e ao calor que contém, no mínimo, 10,5% de cromo na sua composição química. Do mesmo modo que existe uma grande variedade de aços de carbono com diferentes requisitos de resistência, soldabilidade e tenacidade, também existe uma grande variedade de aços inoxidáveis com diferentes níveis de resistência à corrosão e resistência mecânica. Este conjunto de aços advém da adição de elementos liga que modificam as propriedades mecânicas e a resistência a diferentes ambientes corrosivo. É importante uma escolha adequada do aço consoante a sua futura aplicação.

Com uma quantidade de cromo acima dos 10,5%, numa superfície limpa e quando exposta ao ar ou a outro tipo de ambiente oxidante, forma-se na sua superfície do aço, uma camada aderente fina e transparente de óxido de cromo. Se limparmos ou cortarmos esta película, ela voltará a formar-se na presença de oxigénio. Enquanto o aço inox apresentar uma resistência à corrosão suficiente para o ambiente onde se encontra, este não terá reação com a atmosfera. Por esta razão, diz-se que a película formada na superfície destes aços é uma película passiva. A estabilidade desta película depende da composição química do aço inox, dos tratamentos da superfície e da corrosividade do ambiente onde o aço está inserido. A estabilidade é maior quanto maior for a quantidade de cromo, podendo esta ser ainda aumentada com a adição de elementos de liga de molibdénio e nitrogénio.

O aço inox pode ser classificado em cinco grupos, no qual cada grupo apresenta propriedades únicas e diferentes resistências à corrosão.

### ***Aços inoxidáveis austeníticos***

Os aços austeníticos mais utilizados possuem 17 a 18% de cromo e 8 a 11% de níquel. Atómicamente, estes aços possuem uma estrutura cúbica de face centrada (CFC) enquanto que os aços de carbono apresentam uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC). Como tal, os aços inox austeníticos apresentam, para além da resistência à corrosão, grande ductilidade, boa soldabilidade e são facilmente deformáveis a frio. Em comparação com os aços de carbono, os aços austeníticos possuem também uma melhor tenacidade numa grande gama de temperaturas. Estes aços podem também ser endurecidos por deformação a frio, mas nunca por processos de tratamento a quente. A sua resistência à corrosão pode ser melhorada com níveis mais elevados de cromo e adicionando molibdénio e nitrogénio à sua composição. Este é o grupo de aço inox mais utilizado em construção.

### ***Aços inoxidáveis ferríticos***

Normalmente, os aços inox ferríticos apresentam quantidades de cromo entre 10,5% a 18%. Estes aços não contêm nenhuns ou muito poucos elementos de liga de níquel e a sua estrutura atómica é a mesma que a dos aços carbono. Em relação aos custos, este tipo de aço apresenta custos mais baixos do que os aços inox austeníticos com a mesma classe de resistência à corrosão e apresentam menor volatilidade nos preços. No entanto, são em geral menos dúcteis e apresentam menor soldabilidade do que os aços austeníticos. Os tratamentos e maquinaria dos aços inox ferríticos são idênticos aos usados para a aço carbono S355. Estes aços podem ser endurecidos por processos a frio, mas com uma maior limitação do que os aços inox austeníticos. Da mesma maneira que os aços austeníticos, os aços ferríticos não podem ser endurecidos por tratamentos a quente. Este tipo de aço é aplicado em zonas interiores e exteriores, com

condições atmosféricas amenas. Apresentam boa resistência à corrosão que pode ser aumentada através da adição de elementos de liga de molibdénio. Por esta razão, são uma boa alternativa ao uso de aço galvanizado com espessura reduzida. Os ferríticos são normalmente utilizados em elementos com espessura menor ou igual a 4 mm.

### **Aços inoxidáveis duplex (austeníticos-ferríticos)**

Os aços inoxidáveis duplex (austeníticos-ferríticos) apresentam uma microestrutura entre a austenite e a ferrite, e por isso são denominados de aços austeníticos-ferríticos. Estes aços contêm entre 20 a 26% de crómio, 1 a 8% de níquel, 0,05 a 5% de molibdénio e 0,05 a 3% de nitrogénio. Devido ao facto de conterem menos quantidade de níquel do que as outras classes de aços austeníticos, apresentam menos variações no seu preço. Estes aços apresentam uma resistência de aproximadamente duas vezes a dos aços austeníticos em condições recozidas o que possibilita uma redução das secções a utilizar na estrutura - fator benéfico em estruturas nas quais o peso próprio é um fator importante como por exemplo pontes e estruturas das plataformas de estruturas *offshore*. São aços com características apropriadas numa vasta gama de ambientes corrosivos.

Comparado com os austeníticos, embora os aços duplex inoxidáveis apresentem boa ductilidade, são menos deformáveis devido a sua alta resistência. A sua resistência pode ser aumentada através de processos a frio, mas não por processos a quente. Apresentam boa soldabilidade e boa resistência a fissuração causada por corrosão. Podem ser vistos como aços complementares aos aços inoxidáveis ferríticos, visto que são mais utilizados em elementos mais pesados.

### **Aços inoxidáveis martensíticos**

Os aços martensíticos tem uma estrutura cúbica de corpo centrado semelhante à dos aços ferríticos e à dos aços estruturais em carbono, mas devido ao facto de possuírem uma maior quantidade de carbono, podem ser endurecidos por tratamentos a quente. Estes aços são geralmente utilizados em condições endurecidas ou temperadas, o que lhes confere grande resistência mecânica e moderada resistência à corrosão. São utilizados em situações onde se tira proveito da resistência ao desgaste, abrasão e dureza, como por exemplo talheres, instrumentos cirúrgicos, facas industriais, placas de desgaste e pás de turbinas. Estes aços são menos dúcteis e mais sensíveis a fendas do que os aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e duplex. Embora a maioria dos aços martensíticos possam ser soldados, este processo requer tratamentos a quente pré e pós soldadura, o que limita o uso deste tipo de aços em componentes soldados.

### **Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação**

Nos aços inoxidáveis endurecidos por precipitação pode-se aumentar a sua resistência por tratamentos a quente, e dependendo da classe podem apresentar três microestruturas diferentes: martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos. Geralmente estes aços não são soldados. A resistência à corrosão deste tipo de aços é em geral, melhor que a dos aços martensíticos e similar aos aços austeníticos com 18% de crómio e 8% de níquel. A aplicação mais comum deste tipo de aços é a indústria aeroespacial, mas também podem ser utilizados em barras à tração, cabos, parafusos e outras aplicações que requerem o uso de materiais com elevada resistência mecânica e moderada resistência à corrosão.

Na Secção 3.5 são dadas orientações sobre a seleção de classes de aço para aplicações particulares.

## **1.2 Aplicações estruturais do aço inoxidável**

Este Manual de Dimensionamento aplica-se aos aços inoxidáveis austeníticos, duplex e ferríticos tipicamente utilizados em aplicações estruturais. A composição e

resistências de algumas das classes de aços inox utilizadas para aplicações estruturais são apresentadas nas Tabela 2.1 e Tabela 2.2, respetivamente.

A EN 1993-1-4 apresenta um maior número de aços austeníticos, mas menor de aços ferríticos do que os que são apresentados no Manual de Dimensionamento. É esperado que o número de aços ferríticos apresentados aumente na próxima revisão da EN 1993-1-4 de modo a incluir todos os apresentados neste Manual de Dimensionamento.

As regras de dimensionamento apresentadas neste Manual podem ser aplicadas a outros tipo de aços inox austeníticos, duplex e ferríticos da EN 10088 (ver Secção 4.2). A opinião do produtor dos aços inox deve ser tida em conta quanto à durabilidade, fabricação, soldabilidade e outros parâmetros do aço.

### ***Aços inoxidáveis austeníticos***

Os aços inox austeníticos são geralmente seleccionados para aplicações estruturais que requerem uma boa combinação entre a resistência, corrosão, deformabilidade (incluindo a possibilidade de criar dobras mais apertadas), soldabilidade e, para aplicações sísmicas, que requerem grandes deformações antes da fratura.

Aços de classes 1.4301 (geralmente conhecidos como 304) e 1.4307 (304L) são os mais utilizados contendo 17,5 a 20% de cromo e 8 a 11% de níquel. Estes aços são apropriados para zonas urbanas e rurais e zonas industriais “moderadas”.

Aços de classes 1.4401 (316) e 1.4404 (316L) contem cerca de 16 a 18 % de cromo, 10 a 14% níquel e 2 a 3% de adição de elemento liga de molibdénio que aumenta a resistência à corrosão. Apresentam um bom desempenho em zonas industriais e zonas costeiras.

Nota: A designação “L” indica um baixo teor em carbono que reduz o risco de sensibilização (de precipitação de cromo) e de corrosão intergranular nas zonas afetadas pelo calor das soldaduras. Tanto as classes “L” como as de aços estabilizados (classe 1.4541 e 1.4571) devem ser especificadas para secções soldadas. O baixo teor em carbono não afeta a resposta à corrosão nas áreas não soldadas. Quando os produtores utilizam métodos de produção modernos, os aços inox comercializados são geralmente de baixo teor em carbono e podem ser classificados para as duas designações (ex: 1.4301/1.4307, com a resistência do 1.4301 e o teor de carbono do 1.4307). Quando é utilizada uma tecnologia menos avançada o mesmo não pode ser assumido e o aço com baixo teor em carbono deve ser explicitamente especificado nos documentos do projeto onde as soldaduras estão envolvidas.

Os aços da classe 1.4318 são de baixo teor em carbono e possuem elevadas quantidades de nitrogénio. Estes aços endurecem rapidamente quando sujeitos a tratamentos a frio. Têm um desempenho satisfatório na indústria ferroviária e são igualmente adequados para a indústria automóvel, aeronáuticas e aplicações arquitetónicas. Apresentam uma resistência à corrosão semelhante à do aço de classe 1.4301 e são mais adequados para aplicações que requerem uma maior resistência do que a do aço 1.4301, quando são necessários grandes volumes. Os profissionais interessados em utilizar 1.4318 devem consultar diretamente o fabricante. Dependendo da quantidade requerida o preço de aços desta classe é ligeiramente superior ao do aço da classe 1.4301.

Os aços das classes com elevado teor em cromo, contendo aproximadamente 20%, estão disponíveis e serão introduzidas na EN 10088 nas próximas revisões. A classe 1.4420 é um exemplo de um aço com grande teor de cromo e nitrogénio com uma



resistência à corrosão similar a classe 1.4401. Possui uma resistência mais elevada do que os austeníticos “standard”, com uma tensão de cedência a volta dos 390 N/mm<sup>2</sup> comparada com 240 N/mm<sup>2</sup> dos aços austeníticos, ao mesmo tempo que apresentam uma boa ductilidade.

### **Aços inoxidáveis duplex**

Aços inox duplex são apropriados para zonas onde é necessária uma alta resistência mecânica, e alta resistência à fissuração por corrosão.

O aço 1.4462 é um aço duplex com elevada resistência à corrosão, apropriado para o uso em ambientes marítimos e outros tipos de ambientes agressivos. O aumento do uso do aço inoxidável em aplicações de suporte levou a uma maior procura de aços inoxidáveis duplex e ao desenvolvimento de novas classes económicas de aço inoxidável duplex. Estas classes são descritas como económicas por apresentarem uma reduzida quantidade de níquel e de molibdénio. Apresentam propriedades mecânicas semelhantes ao aço inoxidável 1.4462 e uma resistência à corrosão comparável com os aços austeníticos. Este fator torna-os apropriados para o uso em diversas exposições ambientais *onshore*. Na emenda de 2005 da EN 1993-1-1 foram introduzidos quatro aços desta classe por se terem tornado economicamente mais acessíveis.

### **Aços inoxidáveis ferríticos**

As duas classes de aços ferríticos apropriadas para o uso estrutural e comumente disponíveis são o aço 1.4003 (aço de classe ferrítica contendo cerca de 11% de crómio) e o aço 1.4016 (contém cerca de 16.5% de crómio, com maior resistência à corrosão do que o 1.4003). A soldadura prejudica substancialmente a resistência à corrosão e a tenacidade do aço de classe 1.4016.

Os aços ferríticos estabilizados, como por exemplo os aços denominados 1.4509 e 1.4521, contêm elementos de liga adicionais tais como nióbio e titânio que melhoram significativamente as características soldabilidade e deformabilidade dos aços ferríticos. A classe 1.4521 contém 2% de molibdénio o que melhora a resistência ao *pitting* e a fissuração por corrosão em ambientes que contém cloro (apresenta uma resistência ao *pitting* semelhante ao aço 1.4401). O aço 1.4621 é uma classe de aço ferrítico recentemente desenvolvida que contém cerca de 20% de crómio, aumentando a resistência ao desgaste em comparação com os aços 1.4509 e 1.4521.

## **1.3 Aplicações do aço inoxidável na indústria da construção**

O aço inoxidável tem sido usado na construção desde que foi criado há mais de cem anos. Os produtos em aço inoxidável são atrativos, resistentes à corrosão, requerem poucos requisitos de manutenção e apresentam uma boa resistência mecânica, tenacidade e fadiga. Os aços inoxidáveis podem ser fabricados utilizando uma grande variedade de técnicas de engenharia e são totalmente recicláveis no fim do seu ciclo de vida. Este tipo de aço é apropriado para ser aplicado em edifícios situados em ambientes agressivos e em áreas costeiras, áreas expostas a saís de degelo e em áreas poluídas.

A alta ductilidade do aço inoxidável é uma propriedade útil em aplicações onde é necessária a resistência a ações sísmicas visto que permitem grande dissipação de energia; no entanto, a aplicação sísmica deste tipo de aços não está incluída neste Manual de Dimensionamento.

As aplicações típicas para os aços inoxidáveis austeníticos e duplex, incluem:

- Vigas, pilares, plataformas e apoios em estações de tratamento de águas, indústrias de papel, nuclear, biomassa, químicas, farmacêuticas e do setor alimentar e de bebidas;
- Vigas e pilares principais, pernos, barreiras, gradeamentos, cabos e juntas de dilatação para pontes;
- Paredões, cais e outras estruturas costeiras;
- Varões para estruturas em betão;
- Revestimentos de paredes, coberturas, revestimentos de tuneis;
- Sistemas de suporte de fachadas, alvenaria, revestimento;
- Barreiras de segurança, corrimões e equipamentos urbanos;
- Ligadores e sistemas de ancoragem em madeira, pedra, alvenaria e rocha;
- Elementos estruturais e ligadores em edifícios de piscinas (devem-se ter precauções especiais para os elementos estruturais em piscinas devido ao risco de aparecimento de fissuras por corrosão nas áreas com maior condensação, ver Secção 3.5.3);
- Ações acidentais, tais como explosões e impacto. Estruturas resistentes tais como paredes de segurança, portões e cabeços de amarração;
- Paredes resistentes ao fogo e a explosões, suporte para cabos e passadiços em plataformas offshore.

Os aços da classe dos ferríticos são utilizados em revestimentos e coberturas. No setor do transporte são utilizados como elementos estruturais, ex: pórticos para paragens de autocarros. Também são utilizados em vagões ferroviários, onde a resistência à abrasão é importante. Embora não sejam muito utilizados como elementos estruturais na indústria da construção, tem potencial para serem mais utilizadas em elementos estruturais de grande a moderada durabilidade com uma superfície metálica atrativa. Em estruturas mistas, onde é exigido uma longa vida útil, ou onde as condições ambientais são moderadamente corrosivas, plataformas em aço ferrítico podem ser soluções mais económicas do que plataformas em aço galvanizado, que podem apresentar dificuldades em manter uma durabilidade adequada para períodos superiores a 25 anos. Para além disso, os aços ferríticos são adequados para substituir os aços galvanizados noutras aplicações, tais como cofragens permanentes, telhados e suporte para cabos. Podem ser utilizados de forma económica em ambientes semi-confinados e não aquecidos (ex.: caminhos de ferro, bancadas, abrigo para bicicletas) e em sistemas de revestimento e suportes de alvenaria.

## 1.4 Objetivo do Manual de Dimensionamento

As recomendações dadas neste Manual de Dimensionamento são aplicáveis a todas as classes de aços inoxidáveis tipicamente utilizadas em aplicações estruturais. As recomendações estão direcionadas principalmente para o dimensionamento de elementos e componentes secundários de edifícios, instalações offshore e estruturas semelhantes. Não devem ser aplicadas a estruturas especiais como instalações nucleares ou reservatórios sob pressão onde já existam regulamentos específicos para a utilização de aços inoxidáveis.

As recomendações dizem respeito ao comportamento do material, dimensionamento de enformados a frio, elementos soldados e laminados a quente e as suas ligações. São aplicáveis a aços inoxidáveis das classes dos austeníticos, duplex e ferríticos. Apenas são aqui consideradas as secções laminadas, em oposto às fundidas. (Note

que as propriedades das secções fundidas podem ser diferentes das laminadas, ex: os aços austeníticos fundidos podem ser um pouco magnéticos).

As recomendações foram formuladas utilizando a filosofia do estado limite e em concordância com cláusulas da *EN 1993-1-4: Eurocódigo 3, Projeto de estruturas de aço: Aço inoxidável*, salvo indicação em contrário.

### 1.5 Simbologia

Em geral, a simbologia utilizada neste manual de dimensionamento é a usada na *EN 1993-1-1: Eurocódigo 3, Projeto de estruturas de aço: Regras gerais e regras para edifícios*.

As dimensões e eixos das secções estão ilustrados na Figura 1.1.

#### **Letras latinas maiúsculas**

|          |   |
|----------|---|
| <i>E</i> | Módulo de Elasticidade; Efeitos das ações |
| <i>F</i> | Ação; Força                               |
| <i>G</i> | Módulo de distorção                       |
| <i>I</i> | Momento de Inércia                        |
| <i>L</i> | Comprimento; Vão                          |
| <i>M</i> | Momento fletor                            |
| <i>N</i> | Esforço normal                            |
| <i>R</i> | Resistência                               |
| <i>V</i> | Esforço transversal                       |
| <i>W</i> | Módulo de flexão                          |

#### **Letras Gregas maiúsculas**

|          |  |
|----------|--|
| $\Delta$ | Diferença do ..... (precede o símbolo principal) |
|----------|--|

#### **Letras Latinas minúsculas**

|          |   |
|----------|---|
| <i>a</i> | Distância entre reforços; Espessura do cordão de soldadura                                  |
| <i>b</i> | Largura;  |
| <i>c</i> | Distância; Elemento saliente  |
| <i>d</i> | Diâmetro; Profundidade  |
| <i>e</i> | Excentricidade; Mudança de eixo neutro; Distância ao bordo lateral; Distância à extremidade |
| <i>f</i> | Resistência (de um material)  |
| <i>g</i> | Afastamento   |
| <i>h</i> | Altura  |
| <i>i</i> | Raio de giração; Inteiro  |
| <i>k</i> | Coeficiente; Fator  |
| <i>l</i> | Comprimento de encurvadura  |
| <i>m</i> | Constante   |
| <i>n</i> | Número de...  |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $p$             | Distância entre os eixos dos furos de peças de ligação; Distância entre eixos |
| $q$             | Força distribuída   |
| $r$             | Raio; Raio de concordância  |
| $s$             | Disposição em quincôncio  |
| $t$             | Espessura   |
| $u-u$           | Eixo principal de maior inércia   |
| $v-v$           | Eixo principal de menor inércia   |
| $w$             | Deformação por <i>curling</i>   |
| $x-x, y-y, z-z$ | Eixos   |

### **Letras Gregas minúsculas**

|               |   |
|---------------|---|
| $\alpha$      | (alpha) Rácio; Fator  |
| $\beta$       | (beta) Rácio; Fator   |
| $\gamma$      | (gamma) Fator parcial   |
| $\varepsilon$ | (epsilon) Extensão; Coeficiente $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\ 000} \right]^{0,5}$ |
| $\lambda$     | (lambda) Esbelteza (uma barra por cima indica normalizado)  |
| $\rho$        | (rho) Fator de redução  |
| $\sigma$      | (sigma) Tensão  |
| $\tau$        | (tau) Tensão tangencial   |
| $\varphi$     | (phi) Rácio   |
| $\chi$        | (chi) Fator de redução (para encurvadura)   |
| $\psi$        | (psi) Índice de tensão; Fator de redução  |

### **Índice**

|         |  |
|---------|--|
| a       | Média                                  |
| b       | Esmagamento; Encurvadura Parafuso      |
| c       | Secção transversal                     |
| cr      | Crítico                                |
| d       | Dimensionamento                        |
| E       | Euler; Força interna; Momento interno  |
| eff     | Efetivo                                |
| e       | Efetivo (seguido pelo índice inferior) |
| el      | Elástico                               |
| f       | Banzo                                  |
| g       | Bruta                                  |
| i, j, k | Índices (substituir por números)       |
| k       | Característico                         |
| LT      | Torção-Lateral                         |

|          |  |
|----------|--|
| M        | Momento fletor   |
| N        | Esforço axial  |
| net      | Útil   |
| o        | Inicial  |
| p        | Proporcionalidade  |
| pl       | Plástico   |
| R        | Resistência  |
| r        | Valor reduzido   |
| S        | Secante  |
| s        | Tensão de tração (área); Reforço   |
| t        | Tensão; Tração; Torção   |
| u        | Eixo de maior inércia de uma secção transversal; ultimo  |
| V        | Esforço transverso   |
| v        | Corte; Eixo de menor inercia de uma secção transversal   |
| w        | Alma; Soldadura; Empenamento   |
| x        | Eixo ao longitudinal de um elemento  |
| y        | Cedência (valor da tensão de elasticidade); Eixo de uma secção transversal (eixos de maior inércia exceto para secções não simétricas) |
| z        | Eixo de uma secção transversal (eixo de menor inércia exceto para secções não simétricas)  |
| $\sigma$ | Tensão normal  |
| $\tau$   | Tensão de corte.   |

## 1.6 Convenção dos eixos das secções

A convenção utilizada para os eixos de um elemento é a seguinte:

|       |   |
|-------|---|
| $xx$  | eixo longitudinal de um elemento;   |
| $y-y$ | eixo da secção transversal perpendicular a alma, ou a aba maior no caso de cantoneiras. |
| $z-z$ | eixo da secção transversal paralela a alma, ou a aba maior no caso de cantoneiras.      |

O eixo  $y-y$  é normalmente o eixo principal de maior inércia da secção enquanto o eixo  $z-z$  é normalmente considerado o eixo principal de menor inércia. No caso de cantoneiras, os eixos principais de maior e menor inércia ( $u-u$  e  $v-v$ ) estão inclinados em relação aos eixos  $y-y$  e  $z-z$ , ver Figura 1.1

A convenção usada para os índices que indicam os eixos dos momentos é a seguinte:

*“Utilizar o eixo em torno do qual atua o momento”*

Como exemplo, para uma secção em I o momento fletor que atua no plano da alma é designado como  $M_y$ , porque atua em torno do eixo perpendicular à alma.

## 1.7 Unidades

Para os cálculos, são recomendadas as seguintes unidades:

- Forças e cargas kN, kN/m, kN/m<sup>2</sup>;
- Unidade de massa kg/m<sup>3</sup>;
- Unidade de peso kN/m<sup>3</sup>;
- Tensões e resistências N/mm<sup>2</sup> (= MN/m<sup>2</sup> ou MPa);
- Momento fletor kNm.

Note-se que, de acordo com a prática Europeia, o símbolo “,” é utilizado para separar a parte inteira de um número da parte decimal.

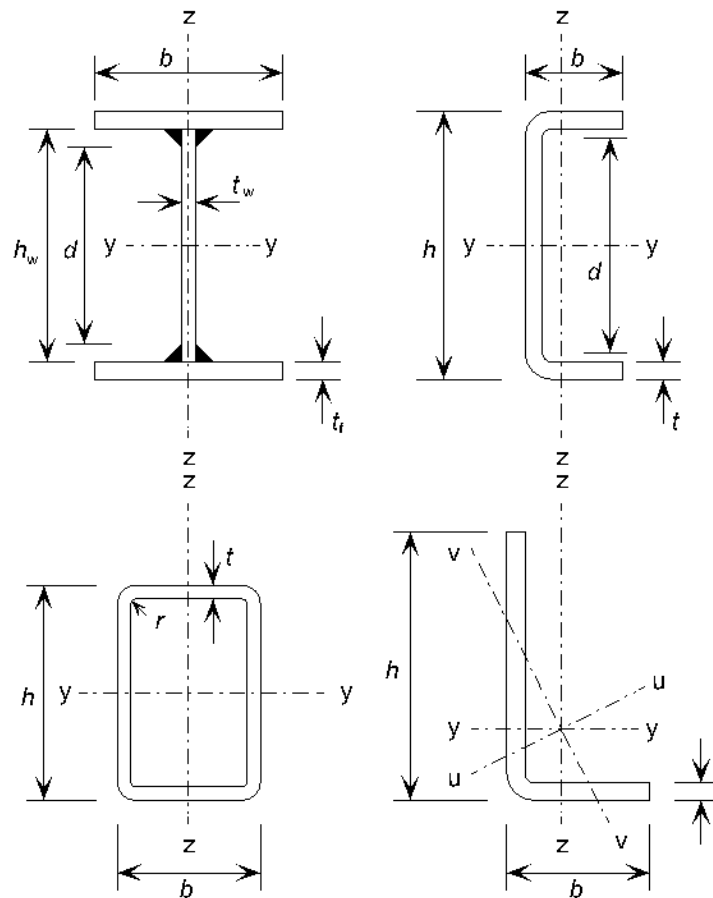


Figura 1.1 Dimensões e eixos das secções



## 2 PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL

### 2.1 Relação tensão-extensão do material

A relação tensão-extensão do aço inoxidável difere em alguns aspectos do aço carbono. O aspecto mais importante é a forma da curva tensão-extensão. Enquanto que o aço carbono exibe um comportamento elástico-linear até atingir a tensão de cedência e um patamar de cedência antes de sofrer endurecimento por deformação, o aço inoxidável apresenta um comportamento não linear sem uma tensão de cedência claramente definida. A Figura 2.1 compara as curvas tensão-extensão características de vários aços inoxidáveis e de carbono para extensões até 0,75% e a Figura 2.2 apresenta curvas tensão-extensão típicas até à fratura.

A tensão de cedência nos aços inoxidáveis é geralmente associada a uma tensão limite de elasticidade para uma determinada extensão (convencionalmente 0,2%) e adotando o módulo de elasticidade na origem como o módulo de elasticidade característico. A Figura 2.3 define a tensão limite de elasticidade a 0,2%, que é também denominada de tensão de cedência a 0,2%. O limite de proporcionalidade dos aços inoxidáveis varia entre 40 a 70% da tensão limite de elasticidade.

Note-se que os aços inoxidáveis ferríticos apresentam um comportamento entre o comportamento dos aços carbono e aços inoxidáveis austeníticos visto que não são tão não lineares como os austeníticos, mas apresentam maior resistência do que os aços carbono.

Os aços inoxidáveis são capazes de absorver impactos consideráveis sem atingir a fratura devido a sua excelente ductilidade (especialmente os da classe dos austeníticos) e as suas características de endurecimento.

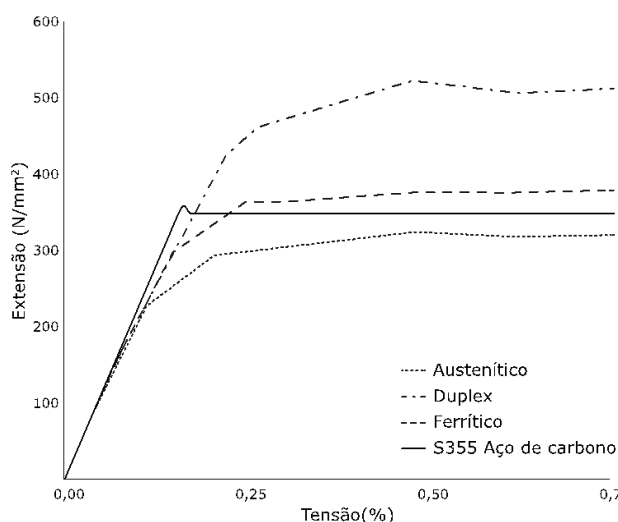


Figura 2.1 Curvas tensão-extensão para o aço inox e aço carbono de 0 a 0,75%



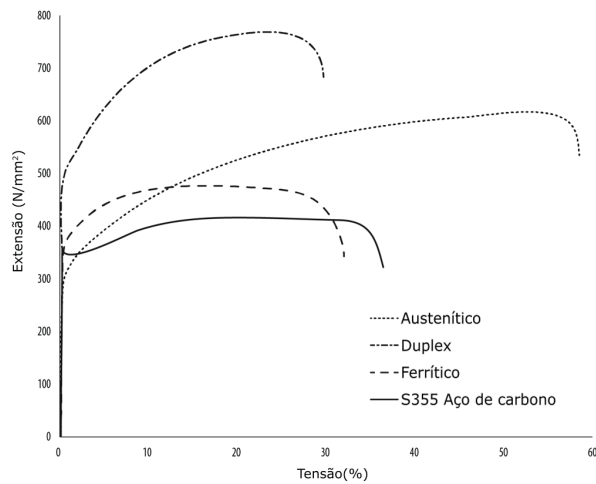


Figura 2.2 Curvas tensão-extensão completas para o aço inox e de aço de carbono

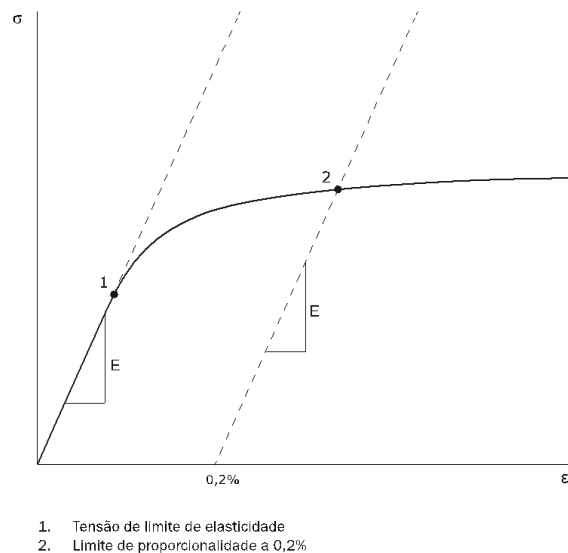


Figura 2.3 Definição da tensão limite de proporcionalidade a 0,2%

## 2.2 Fatores que afetam o comportamento tensão-extensão

Quando comparado com os aços carbono, a metalurgia dos aços inoxidáveis é mais complexa e o processo de produção tem um maior impacto nas propriedades finais do aço.

Para qualquer classe de aço inoxidáveis, alguns fatores podem modificar a forma da curva tensão-extensão característica e são até um certo ponto interdependentes.

### 2.2.1 Enformação a frio

O aço inoxidável é geralmente fornecido na condição recozido, isto é, foi sujeito a um tratamento por calor no qual foi aquecido e tendo sido mantido à mesma temperatura por um determinado período de tempo, e em seguida, arrefecido rapidamente. O recozimento torna o material trabalhável.

Os níveis de resistência do aço inoxidável, especialmente dos aços da gama dos austeníticos, podem ser aumentados por tratamento a frio (adquiridas durante os processos

de deformação a frio incluindo quinagem e durante o fabrico). A este aumento da resistência está associado uma diminuição da ductilidade do aço. No entanto, o decréscimo da ductilidade não tem consequências significativas devido à elevada ductilidade inicial dos aços inoxidáveis, especialmente os da gama austeníticos. É possível adquirir o material em condições enformadas a frio (ver Tabela 2.3). O preço do aço inoxidável enformado a frio é ligeiramente mais elevado do que o equivalente em condições recozidas, dependendo da classe, forma do produto e nível de tratamento a frio.

Como o aço inoxidável é enformado a frio, tende a exibir um aumento da assimetria entre o comportamento à tração e à compressão assim como anisotropia (diferentes características de tensão-extensão paralelamente e transversalmente à direção de laminação). O nível de assimetria e anisotropia depende da classe, nível do tratamento a frio e do processo de fabrico. Secções estruturais de espessura acima dos 3 mm não são constituídas por materiais com tratamentos a frio elevados e para tais secções as diferenças do comportamento tensão-extensão devido à assimetria e anisotropia não são elevadas; a não linearidade tem um efeito mais significativo. A anisotropia e assimetria são mais significativas no dimensionamento de elementos finos, secções com elevados tratamentos a frio.

Nos materiais trabalhados a frio, a resistência à compressão na direção longitudinal é menor do que a resistência à tração nas direções transversais e longitudinal (os valores normalmente fornecidos pelas normas, tais como a EN 10088, são em conformidade pelos fornecedores). É necessário cautela na escolha da resistência de dimensionamento em materiais enformados a frio (ver Tabela 2.3)

Durante o fabrico de uma secção por deformação a frio, ocorrem deformações plásticas que resultam no aumento na tensão limite de elasticidade a 0,2%. Um aumento de cerca de 50% é típico nos cantos das secções transversais enformadas a frio; a resistência nas faces planas também aumenta. No ANexo B são dadas indicações de como tirar vantagem deste aumento da resistência. Em alternativa, o aumento da resistência pode ser obtido através de testes experimentais (ver Secção 10).

Tratamentos térmicos ou soldaduras subsequentes de um elemento de aço inox terão um efeito parcial de tempera (amolecimento) com uma diminuição do aumento da resistência proveniente do tratamento a frio (e também uma redução da anisotropia). A Secção 7.4.4 fornece indicações acerca do dimensionamento de ligações soldadas entre elementos no qual o material foi sujeito a processos de endurecimento a frio.

### **2.2.2 Taxa de deformação**

A sensibilidade a diferentes velocidades de deformação é mais elevada nos aços inoxidáveis do que nos aços carbono. Posto isto, a resistência dos aços inoxidáveis a elevadas taxas de deformação é maior do que a dos aços de carbono.

## **2.3 Normas relevantes e resistências de dimensionamento**

### **2.3.1 Produtos planos e longos**

A norma de produtos a considerar é a EN 10088, *Aços inoxidáveis*. Esta norma é formada por cinco partes, sendo apenas três delas relevantes no setor da construção:

- Parte 1, *Lista de aços inoxidáveis*, fornece a composição química e referências às propriedades destes aços como por exemplo, o módulo de elasticidade,  $E$ ;
- Parte 4, *Condições técnicas de fornecimento de chapas/placas de aços resistentes à corrosão para construção*, fornece as propriedades técnicas e composição química dos materiais utilizados no fabrico de elementos estruturais;

- Parte 5, *Condições técnicas de fornecimento de barras, varões, cabos, secções e produtos polidos de aço resistentes à corrosão para a construção*, fornece as propriedades técnicas e composição química dos materiais utilizados no fabrico de produtos longos.

A EN 10088-4 e -5 são normas uniformizadas e, por conseguinte, os aços inoxidáveis especificados por estas normas tem que ter marcação CE. Com marcação CE, o produtor declara que o aço está adequado para o seu propósito e capaz de realizar sua função. A marcação CE indica que o produto se encontra em conformidade com a norma relevante, respeitando qualquer valor específico indicado pela norma (ex.: espessura mínima ou resistência) e os procedimentos de avaliação de conformidade foram cumpridos.

### **Designação e composição**

As designações adotadas na EN 10088 são o número Europeu para o aço e nome.

Por exemplo, a classe 314L tem o número 1.4307, onde:

|                  |                                      |                                    |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| <b>1.</b>        | <b>43</b>                            | <b>07</b>                          |
| Indicação do aço | Indicação do grupo de aço inoxidável | Identificação individual da classe |

Os grupos de aços inoxidáveis são indicados na EN 10027-2 como:

|        |  |
|--------|--|
| 1.40XX | Aço inoxidável com Ni < 2,5% sem Mo, Nb e Ti       |
| 1.41XX | Aço inoxidável com Ni < 2,5% e Mo mas sem Nb e Ti  |
| 1.43XX | Aço inoxidável com Ni ≥ 2,5% mas sem Mo, Nb e Ti   |
| 1.44XX | Aço inoxidável com Ni ≥ 2,5%, e Mo mas sem Nb e Ti |
| 1.45XX | Aço inoxidável com adições especiais               |
| 1.46XX | Resistência química e alta temperatura, classes Ni |

O Sistema de nomenclatura do aço fornece indicações sobre a composição do aço. O nome do aço 1.4307 é X2CrNi18-9, onde:

|                               |                    |   |                                 |
|-------------------------------|--------------------|---|---------------------------------|
| <b>X</b>                      | <b>2</b>           | <b>CrNi</b>                                     | <b>18-9</b>                     |
| Indicação de aço de alta-liga | 100 x % de carbono | Símbolos químicos dos principais elementos liga | % dos elementos liga principais |

O nome de cada aço inoxidável tem uma correspondência única com o número de aço. O anexo A fornece uma tabela que indica as designações das classes de aços inoxidáveis na Europa e a sua correspondência para as normas US.

A composição química dos aços inoxidáveis mais comuns é dada na Tabela 2.1.

### **Resistência**

No dimensionamento, as tensões características de cedência  $f_y$  e última  $f_u$  são tidas em conta com os valores mínimos especificados para a tensão limite de elasticidade a 0,2% ( $R_{p0,2}$ ) e da tensão última ( $R_m$ ) dadas pela EN 1088-4 e -5 (ver Tabela 2.2). Estes valores são aplicáveis a materiais em condições recozidas e, portanto, representam valores conservativos quando o material ou as secções foram sujeitas a tratamentos a frio durante a fabricação. As secções para uso estrutural são raramente fornecidas em condições recozidas.

É importante ter em conta que a tensão de cedência dos aços inoxidáveis austeníticos pode exceder os valores mínimos especificados, variando entre os 25 a 40%, para chapas com espessuras inferiores ou iguais a 25 mm. A margem para os aços duplex é menor, normalmente entre 5 e 20%. Existe uma relação inversa entre a espessura ou diâmetro e a tensão de cedência; os elementos finos apresentam tipicamente uma tensão de cedência significativamente superior ao mínimo especificado enquanto que, em elementos com espessuras de 25 mm ou superiores a tensão de cedência é próxima dos valores mínimos especificados.

Para estruturas exteriores e expostas a climas muito quentes, deve-se ter em especial consideração a temperatura máxima que o aço inoxidável pode alcançar. Enquanto que elementos pequenos e abrigados podem permanecer à temperatura ambiente, grandes superfícies de aço inoxidável expostas diretamente à luz solar podem alcançar temperaturas 50% superiores à temperatura ambiente. Se a temperatura máxima que o aço inoxidável pode alcançar for cerca de 60 °C, a tensão de cedência à temperatura ambiente deve ser reduzida de 5%; para temperaturas superiores serão necessárias reduções maiores.

Tabela 2.1 Composição química EN 10088

|              | Grupo  | Teor de elementos de liga (máximo ou intervalo permitido) peso % |             |             |           |   |
|--------------|--------|--|-------------|-------------|-----------|---|
|              |        | C  | Cr          | Ni          | Mo        | Outros                                    |
| Austeníticos | 1.4301 | 0,07   | 17,5 – 19,5 | 8,0 – 10,5  |           |   |
|              | 1.4307 | 0,03   | 17,5 – 19,5 | 8,0 – 10,5  |           |   |
|              | 1.4401 | 0,07   | 16,5 – 18,5 | 10,0 – 13,0 | 2,0 – 2,5 |   |
|              | 1.4318 | 0,03   | 16,5 – 18,5 | 6,0 – 8,0   |           | N: 0,1 – 0,2                              |
|              | 1.4404 | 0,03   | 16,5 – 18,5 | 10,0 – 13,0 | 2,0 – 2,5 |   |
|              | 1.4541 | 0,08   | 17,0 – 19,0 | 9,0 – 12,0  |           | Ti: 5xC – 0,7 <sup>1</sup>                |
|              | 1.4571 | 0,08   | 16,5 – 18,5 | 10,5 – 13,5 | 2,0 – 2,5 | Ti: 5xC – 0,7 <sup>1</sup>                |
| Duplex       | 1.4062 | 0,03   | 21,5 – 24,0 | 1,0 – 2,9   | 0,45      | N: 0,16 – 0,28                            |
|              | 1.4162 | 0,04   | 21,0 – 22,0 | 1,35 – 1,7  | 0,1 – 0,8 | N: 0,2 – 0,25<br>Cu: 0,1 – 0,8            |
|              | 1.4362 | 0,03   | 22,0 – 24,0 | 3,5 – 5,5   | 0,1 – 0,6 | N: 0,05 – 0,2<br>Cu: 0,1 – 0,6            |
|              | 1.4462 | 0,03   | 21,0 – 23,0 | 4,5 – 6,5   | 2,5 – 3,5 | N: 0,1 – 0,22                             |
|              | 1.4482 | 0,03   | 19,5 – 21,5 | 1,5 – 3,5   | 0,1 – 0,6 | N: 0,05 – 0,2<br>Cu: 1,0                  |
|              | 1.4662 | 0,03   | 23,0 – 25,0 | 3,0 – 4,5   | 1,0 – 2,0 | N: 0,2 – 0,3<br>Cu: 0,1 – 0,8             |
| Ferríticos   | 1.4003 | 0,03   | 10,5 – 12,5 | 0,3 – 1,0   | -         |   |
|              | 1.4016 | 0,08   | 16,0 – 18,0 | -           | -         |   |
|              | 1.4509 | 0,03   | 17,5 – 18,5 | -           | -         | Ti: 0,1 – 0,6<br>Nb: [3xC+0,3] – 1,0      |
|              | 1.4521 | 0,025  | 17,0 – 20,0 | -           | 1,8 – 2,5 | Ti: [4x(C+N)+0,15] – 0,8 <sup>2</sup>     |
|              | 1.4621 | 0,03   | 20,0 – 21,5 | -           | -         | N: 0,03<br>Nb: 0,2 – 1,0<br>Cu: 0,1 – 1,0 |

Nota:

<sup>1</sup>. É adicionado titânio para estabilizar o carbono e melhorar o desempenho à corrosão em zonas afetadas pelo calor das soldaduras. No entanto, com exceção de construções que utilizem secções muito pesadas, o uso do titânio foi substituído pelos os aços com teor baixo em carbono, os aços 1.4307 e 1.4404.

<sup>2</sup>. A estabilização pode ser conseguida com titânio, nióbio e zircónio. De acordo com a massa atómica destes elementos e o teor de carbono e nitrogénio a correspondência deve ser a seguinte: Nb (% massa) = Zr (% massa) = 7/4 Ti (% massa)

Tabela 2.2: Valores nominais da tensão de cedência  $f_y$  e da tensão última  $f_u$  para aços inoxidáveis comuns de acordo com a EN 10088 (N/mm<sup>2</sup>)

|              | Classe | Tipologia do produto     |                  |                           |                  |                           |                  |                           |                  |
|--------------|--------|--------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
|              |        | Chapas enformadas a frio |                  | Chapas laminadas a quente |                  | Placas laminadas a quente |                  | Barras, varões e secções  |                  |
|              |        | Espessura nominal $t$    |                  |                           |                  |                           |                  |                           |                  |
|              |        | $t \leq 8$ mm            |                  | $t \leq 13,5$ mm          |                  | $t \leq 75$ mm            |                  | $t$ or $\phi \leq 250$ mm |                  |
|              |        | $f_y$                    | $f_u$            | $f_y$                     | $f_u$            | $f_y$                     | $f_u$            | $f_y$                     | $f_u$            |
| Austeníticos | 1.4301 | 230                      | 540              | 210                       | 520              | 210                       | 520              | 190                       | 500              |
|              | 1.4307 | 220                      | 520              | 200                       | 520              | 200                       | 500              | 175                       | 500              |
|              | 1.4318 | 350                      | 650              | 330                       | 650              | 330                       | 630              | -                         | -                |
|              | 1.4401 | 240                      | 530              | 220                       | 530              | 220                       | 520              | 200                       | 500              |
|              | 1.4404 | 240                      | 530              | 220                       | 530              | 220                       | 520              | 200                       | 500              |
|              | 1.4541 | 220                      | 520              | 200                       | 520              | 200                       | 500              | 190                       | 500              |
|              | 1.4571 | 240                      | 540              | 220                       | 540              | 220                       | 520              | 200                       | 500              |
| Duplex       | 1.4062 | 530 <sup>1</sup>         | 700 <sup>1</sup> | 480 <sup>2</sup>          | 680 <sup>2</sup> | 450                       | 650              | 380 <sup>3</sup>          | 650 <sup>3</sup> |
|              | 1.4162 | 530 <sup>1</sup>         | 700 <sup>1</sup> | 480 <sup>2</sup>          | 680 <sup>2</sup> | 450                       | 650              | 450 <sup>3</sup>          | 650 <sup>3</sup> |
|              | 1.4362 | 450                      | 650              | 400                       | 650              | 400                       | 630              | 400 <sup>3</sup>          | 600 <sup>3</sup> |
|              | 1.4462 | 500                      | 700              | 460                       | 700              | 460                       | 640              | 450 <sup>3</sup>          | 650 <sup>3</sup> |
|              | 1.4482 | 500 <sup>1</sup>         | 700 <sup>1</sup> | 480 <sup>2</sup>          | 660 <sup>2</sup> | 450                       | 650              | 400 <sup>3</sup>          | 650 <sup>3</sup> |
|              | 1.4662 | 550 <sup>1</sup>         | 750 <sup>1</sup> | 550 <sup>4</sup>          | 750 <sup>4</sup> | 480                       | 680              | 450 <sup>3</sup>          | 650 <sup>3</sup> |
| Ferríticos   | 1.4003 | 280                      | 450              | 280                       | 450              | 250 <sup>5</sup>          | 450 <sup>5</sup> | 260 <sup>6</sup>          | 450 <sup>6</sup> |
|              | 1.4016 | 260                      | 450              | 240                       | 450              | 240 <sup>5</sup>          | 430 <sup>5</sup> | 240 <sup>6</sup>          | 400 <sup>6</sup> |
|              | 1.4509 | 230                      | 430              | -                         | -                | -                         | -                | 200 <sup>7</sup>          | 420 <sup>3</sup> |
|              | 1.4521 | 300                      | 420              | 280                       | 400              | 280 <sup>8</sup>          | 420 <sup>8</sup> | -                         | -                |
|              | 1.4621 | 230 <sup>5</sup>         | 400 <sup>9</sup> | 230 <sup>8</sup>          | 400 <sup>8</sup> | -                         | -                | 240 <sup>7</sup>          | 420 <sup>7</sup> |

Os valores nominais de  $f_y$  e  $f_u$  dados nesta tabela podem ser utilizados no dimensionamento que não tenha em conta a anisotropia ou efeitos do endurecimento do aço. Para aços ferríticos, a EN 10088-4 fornece valores para  $f_y$  na direção transversal e longitudinal. Esta tabela fornece os valores longitudinal que são normalmente inferiores aos valores na direção transversal em cerca de 20 N/mm<sup>2</sup>.  
1.4621, 1.4482, 1.4062 e 1.4662 estão abrangidos na EN 10088-2 e -3.  
Barras em aço 1.4509 são apenas abrangidos na EN 10088-3.

|  |  |                                       |
|--|--|---------------------------------------|
| <sup>1</sup> $t \leq 6,4$ mm           | <sup>4</sup> $t \leq 13$ mm            | <sup>7</sup> $t$ ou $\phi \leq 50$ mm |
| <sup>2</sup> $t \leq 10$ mm            | <sup>5</sup> $t \leq 25$ mm            | <sup>8</sup> $t \leq 12$ mm           |
| <sup>3</sup> $t$ or $\phi \leq 160$ mm | <sup>6</sup> $t$ ou $\phi \leq 100$ mm | <sup>9</sup> $t \leq 6$ mm            |

Os aços enformados a frio podem ser especificados de acordo com a EN 10088, quer em termos do valor mínimo do limite de elasticidade a 0,2% (ex.: condições de tratamento a frio CP350, CP500 etc.) ou tensão última (ex.: condições de tratamento a frio CP700, CP850 etc.), mas apenas um dos parâmetros referidos pode ser utilizado. Visto que o dimensionamento estrutural exige quase sempre o valor mínimo da tensão de cedência,  $f_y$ , a EN 1993-1-4 permite apenas o dimensionamento de aços inoxidáveis com as condições de tratamento CP350 e CP500 (Tabela 2.3). A tensão de cedência característica  $f_y$  é tomada como o valor mínimo de 350 N/mm<sup>2</sup> para o material nas condições CP350. De modo a ter em conta a assimetria do material enformado a frio nos casos onde a compressão na direção longitudinal é uma condição de tensão relevante (ex.: comportamento coluna ou flexão), a resistência característica do material CP500 é reduzida de 500 para 460 N/mm<sup>2</sup> (ver Secção 2.2). Valores mais elevados podem ser utilizados, quando suportados por dados experimentais.

Para condições de tratamentos a frio superiores a CP500, o dimensionamento deve ser feito através de testes de acordo com a Secção 10.

Secções tubulares retangulares estão disponíveis em materiais enformados a frio para resistência intermédias entre CP350 e CP500 com as tensões de cedência e última garantida pelo produtor (a tensão de cedência deve ser validade à tração e compressão).

**Tabela 2.3** Valores nominais da tensão de cedência  $f_y$  e da tensão última  $f_u$  para aços inoxidáveis comuns de acordo com a EN 10088 enformados a frio

| Classe | Aços enformados a frio     |   |                            |   |
|--------|----------------------------|---|----------------------------|---|
|        | CP350                      |   | CP500                      |   |
|        | $f_y$<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_u$ <sup>1</sup><br>N/mm <sup>2</sup> | $f_y$<br>N/mm <sup>2</sup> | $f_u$ <sup>1</sup><br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1.4301 | 350                        | 600                                     | 460                        | 650                                     |
| 1.4318 | <sup>2</sup>               | <sup>2</sup>                            | 460                        | 650                                     |
| 1.4541 | 350                        | 600                                     | 460                        | 650                                     |
| 1.4401 | 350                        | 600                                     | 460                        | 650                                     |
| 1.4571 | 350                        | 600                                     | 460                        | 650                                     |

<sup>1</sup> De acordo com a EN 10088, a classificação CP define apenas a tensão limite de elasticidade a 0,2%,  $f_y$ , exigida. Os aços utilizados devem propriedades que vão de em conta com os valores conservativos tabelados para a tensão última,  $f_u$ , salvo se forem usados testes que demonstrem que são admissíveis valores mais baixos.

<sup>2</sup> A classe 1.4318 apresenta uma tensão limite de elasticidade a 0,2% igual a 350 N/mm<sup>2</sup> em condições recozidas; ver Tabela 2.2

### **Módulo de elasticidade**

No dimensionamento estrutural é recomendado o valor  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> para o módulo de elasticidade em todos os aços inoxidáveis.

EN 1993-1-4 e 10088-1 fornecem o valor  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> para o módulo de elasticidade em todos os aços inoxidáveis das classes austeníticos e duplex tipicamente utilizados em estruturas. Para a classe dos ferríticos, é indicado o valor de  $220 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>. No entanto, testes em aços ferríticos indicam o valor  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> como o mais indicado e como tal, é expectável que na próxima revisão da EN 1993-1-4 seja esse o valor recomendado para todos os tipos de aços inoxidáveis.

Para estimar a deformação, a secante do modulo de elasticidade é mais apropriado, ver Secção 6.4.6. O valor 0,3 pode ser utilizado para o coeficiente de Poisson e o valor  $76,9 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> para o modulo de distorção  $G$ .

### **2.3.2 Secções ocas**

Existem duas normas para secções circulares ocas constituídas por aço inoxidável, que fornecem as propriedades técnicas e composições químicas:

EN 10296-2 Tubos de aço circulares soldados para fins mecânicos e de engenharia em geral. Condições técnicas de fornecimento. Parte 2: Aço inoxidáveis.

EN 10297-2 Tubos de aço laminado a quente para fins mecânicos e de engenharia em geral. Condições técnicas de fornecimento. Parte 2: Aço inoxidáveis.

Não existe uma norma equivalente para secções retangulares tubulares.

A norma Europeia que diz respeito às secções tubulares em aço inoxidável (retangulares e circulares) para fins de construção está em preparação. Até esta ser

disponibilizada, deve recorrer-se à EN 10088 para especificar a composição e resistência; para as tolerâncias, deve recorrer-se às normas relevantes que dizem respeito às secções retangulares tubulares dos aços carbono.

### 2.3.3 Parafusos

Os parafusos em aço inoxidável são abrangidos pela EN ISO 3506, *Ligadores em aço inoxidável resistentes à corrosão*. A informação abaixo diz respeito a revisão da EN ISO 3506 que deverá ser publicada em 2017. Esta norma fornece informação sobre a composição química e as propriedades mecânicas para ligadores em aço inoxidável da gama dos austeníticos, martensíticos, ferríticos e duplex. São também permitidos, materiais alternativos que não estejam especificados por esta norma, se as suas propriedades físicas e mecânicas corresponderem ao requerido e tiverem uma resistência à corrosão equivalente.

Na EN ISO 3506, os materiais dos parafusos e das porcas são classificados pelas seguintes letras: “A” para austeníticos, “F” para ferríticos, “C” para martensíticos e “D” para duplex. É recomendado o uso de parafusos da gama dos austeníticos ou duplex para aplicações estruturais. A letra referida anteriormente é seguida de um número (1,2,3,4,5,6 ou 8) que reflete o nível de resistência à corrosão: 1 representa o material menos resistente à corrosão e o 8 o mais resistente. A Tabela 2.4 fornece as designações mais comuns para os aços inoxidáveis de cada classe utilizados em conectores.

Tabela 2.4 Composição química dos parafusos segundo a EN ISO 3506

| Classe       | Composição química <sup>a</sup> |      |     |     |       |           |         |                |         |           | Outros elementos e notas |   |
|--------------|---------------------------------|------|-----|-----|-------|-----------|---------|----------------|---------|-----------|--------------------------|---|
|              | Peso, %                         |      |     |     |       |           |         |                |         |           |                          |   |
|              | C                               | Si   | Mn  | P   | S     | Cr        | Mo      | Ni             | Cu      | N         |                          |   |
| Austeníticos | A1                              | 0,12 | 1,0 | 6,5 | 0,020 | 0,15-0,35 | 16-19   | 0,7            | 5-10    | 1,75-2,25 | —                        | b, c, d   |
|              | A2                              | 0,10 | 1,0 | 2,0 | 0,050 | 0,03      | 15-20   | — <sup>e</sup> | 8-19    | 4         | —                        | f, g  |
|              | A3                              | 0,08 | 1,0 | 2,0 | 0,045 | 0,03      | 17-19   | — <sup>e</sup> | 9-12    | 1         | —                        | 5C ≤ Ti ≤ 0,8 e/ou<br>10C ≤ Nb ≤ 1,0              |
|              | A4                              | 0,08 | 1,0 | 2,0 | 0,045 | 0,03      | 16-18,5 | 2,0-3,0        | 10-15   | 4         | —                        | g, h  |
|              | A5                              | 0,08 | 1,0 | 2,0 | 0,045 | 0,03      | 16-18,5 | 2,0-3,0        | 10,5-14 | 1         | —                        | 5C ≤ Ti ≤ 0,8 e/ou<br>10C ≤ Nb ≤ 1,0 <sup>h</sup> |
|              | A8                              | 0,03 | 1,0 | 2,0 | 0,040 | 0,03      | 19-22   | 6,0-7,0        | 17,5-26 | 1,5       | —                        | —   |
| Duplex       | D2                              | 0,04 | 1,0 | 6,0 | 0,040 | 0,030     | 19-24   | 0,10-1,0       | 1,5-5,5 | 3         | 0,05-0,20                | Cr+3,3Mo+16N ≤<br>24 <sup>i</sup>                 |
|              | D4                              | 0,04 | 1,0 | 6,0 | 0,040 | 0,030     | 21-25   | 0,10-2,0       | 1,0-5,5 | 3         | 0,05-0,30                | 24 <<br>Cr+3,3Mo+16N <sup>i</sup>                 |
|              | D6                              | 0,03 | 1,0 | 2,0 | 0,040 | 0,015     | 21-26   | 2,5-3,5        | 4,5-7,5 | —         | 0,08-0,35                | —   |
|              | D8                              | 0,03 | 1,0 | 2,0 | 0,035 | 0,015     | 24-26   | 3,0-4,5        | 6,0-8,0 | 2,5       | 0,20-0,35                | W ≤ 1,0   |

<sup>a</sup> Valores máximos exceto se indicado o contrário.

<sup>b</sup> Pode ser usado selênio para substituir o enxofre. No entanto, as regulamentações Nacionais devem ser tidas em consideração nos Países ou regiões para as quais se está a dimensionar.

<sup>c</sup> Se o teor em níquel for abaixo de 8% o teor mínimo de manganês deverá ser de 5%.

<sup>d</sup> Se o teor em níquel for maior que 8%, não existe um teor mínimo para o cobre.

<sup>e</sup> Molibdénio pode estar presente a critério do fabricante. No entanto, se a limitação do molibdénio for essencial, deverá ser indicado pelo comprador na altura da solicitação.

<sup>f</sup> Se o teor em cromo for abaixo de 17%, o teor mínimo de níquel deverá ser de 12%.

<sup>g</sup> Para os aços austeníticos que tenham um teor máximo de carbono de 0,030%, o nitrogénio pode estar presente mas não deve exceder 0,22%.

<sup>h</sup> O teor em carbono pode ser superior ao requerido, de forma a obter as propriedades mecânicas especificadas para diâmetros superiores. No entanto o teor de carbono não deverá ser superior a 0,12% para os aços austeníticos.

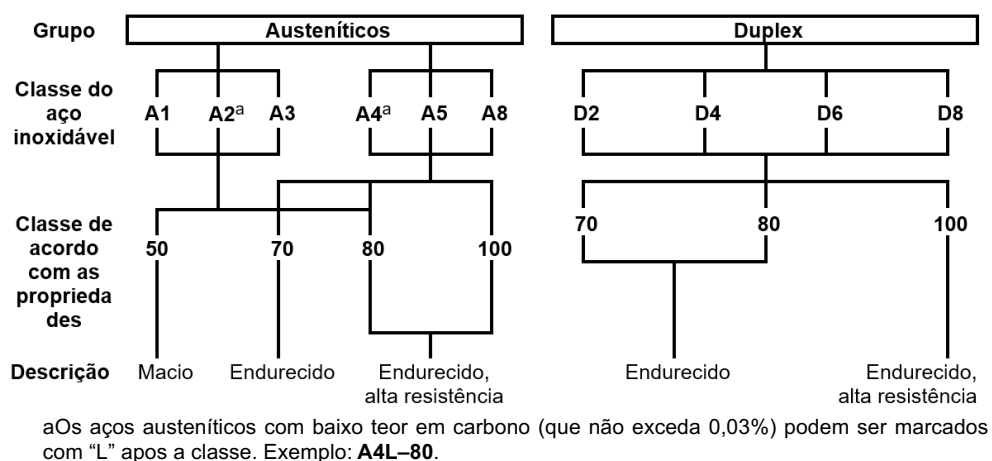
<sup>j</sup> Esta fórmula é utilizada para classificar os aços duplex de acordo com esta norma; não se pretende que seja utilizada como critério de seleção para a resistência à corrosão.

**Tabela 2.5** Designações comuns para aços inoxidáveis utilizados em ligadores

| Tipo         | ISO 3506 classe | Designações comuns para os aços inoxidáveis usados em conectores | Comentários                                |
|--------------|-----------------|--|--|
| Austeníticos | A1              | 1.4570, 1.4305   | Dimensionados para maquinação <sup>1</sup> |
|              | A2              | 1.4301, 1.4307   | Austeníticos básicos                       |
|              | A3              | 1.4541, 1.4550   | Austeníticos estabilizados básicos         |
|              | A4              | 1.4401, 1.4404   | Molibdênio contendo austenítico            |
|              | A5              | 1.4571   | Molibdênio austenítico estabilizado        |
|              | A8              | 1.4529, 1.4547   | Super austenítico                          |
| Duplex       | D2              | 1.4482, 1.4362   | Lean duplex                                |
|              | D4              | 1.4162, 1.4062   | Lean duplex                                |
|              | D6              | 1.4462   | Standard duplex                            |
|              | D8              | 1.4410, 1.4501, 1.4507   | Super duplex                               |

<sup>1</sup> O alto teor em enxofre diminui a resistência à corrosão comparado com os aços com teor normal de enxofre.

A Figura 2.4 mostra o sistema de designação e níveis de resistência (classes de propriedades) disponíveis para os conectores austeníticos e duplex. As diferentes propriedades mecânicas são normalmente conseguidas por endurecimento e dependem das velocidades de deformação do tratamento a frio. A Tabela 2.6 fornece as propriedades mecânicas para cada classe. Os parafusos austeníticos que são fabricados com as propriedades da classe de 50 são não magnéticos, mas os fabricados com as especificações de classes mais altas podem ter algumas propriedades magnéticas.



**Figura 2.4** Designação do sistema para as classes de aços inoxidáveis e propriedades para os ligadores

Um aço no qual o parafuso seja classificado como pertencendo à classe 50 é designado como macio. Os conectores de classe 70 são fabricados com aços endurecidos a frio enquanto que nos de classe 80 o endurecimento é feito em condições mais severas de endurecimento a frio. Os processos de endurecimento podem ter efeitos na resistência à corrosão. Os parafusos de classe 50 com as rosca maquinadas são mais propensos a moer a rosca, ver Secção 11.7.

A resistência à corrosão de um ligador em aço inoxidável deve ser pelo menos equivalente à do material que está a ser ligado, isto é, um parafuso de classe A2 (ou melhor) pode ser utilizado para ligar um material de classe 1.4301, mas um parafuso de classe A4 (ou melhor) deve ser usado para ligar um material de classe 1.4401.



Para calcular a resistência de um parafuso sujeito a tração ou corte ou combinação tração e corte, a tensão  $f_{ub}$  deve ser tida como a tensão mínima  $R_m$  dada na Tabela 2.6 para a classe apropriada.

O aumento da fragilidade pela presença de hidrogénio não se verifica nos aços austeníticos nem nos aços duplex que são fabricados e utilizados de acordo com normas de controlo de qualidade. Nos poucos casos em que este fenómeno acontece nos aços duplex, está associado ou a fraco controlo na produção ou à exposição do aço a condições ambientais de serviço pouco usuais. O risco da fragilidade do material pela presença de hidrogénio deve ser tido em conta para componentes de alta resistência, tais como parafusos com resistência superior aos da classe 80.

**Tabela 2.6 Especificações mínimas para as propriedades mecânicas dos parafusos, porcas e pinos austeníticos e duplex**

| Grupo        | Classe do aço inoxidável | Classe de acordo com as propriedades | Tensão última, $R_m$ | Tensão a 0,2% de alongação não-proporcional, $R_{pf}$ | Elongação após fractura<br>mm |
|--------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------|---|-------------------------------|
|              |                          |                                      | MPa                  | MPa   |                               |
| Austeníticos | A1, A2, A3, A5           | 50                                   | 500                  | 210   | 0,6 $d$                       |
|              |                          | 70                                   | 700                  | 450   | 0,4 $d$                       |
|              |                          | 80                                   | 800                  | 600   | 0,3 $d$                       |
|              | A4                       | 50                                   | 500                  | 210   | 0,6 $d$                       |
|              |                          | 70                                   | 700                  | 450   | 0,4 $d$                       |
|              |                          | 80                                   | 800                  | 600   | 0,3 $d$                       |
|              |                          | 100                                  | 1000                 | 800   | 0,2 $d$                       |
|              | A8                       | 70                                   | 700                  | 450   | 0,4 $d$                       |
|              |                          | 80                                   | 800                  | 600   | 0,3 $d$                       |
|              |                          | 100                                  | 1000                 | 800   | 0,2 $d$                       |
| Duplex       | D2, D4 D6, D8            | 70                                   | 700                  | 450   | 0,4 $d$                       |
|              |                          | 80                                   | 800                  | 600   | 0,3 $d$                       |
|              |                          | 100                                  | 1000                 | 800   | 0,2 $d$                       |

### 2.3.4 Resistência à fratura

Os aços austeníticos não exibem transição de comportamento dúctil para frágil; a sua tenacidade reduz gradualmente com o decréscimo da temperatura. São normalmente usados em aplicações criogénicas e demonstram uma tenacidade adequada a temperaturas de serviço abaixo dos  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Os aços duplex e ferríticos exibem uma transição entre comportamento dúctil e frágil. Os aços do grupo duplex simples apresentam uma tenacidade adequada a temperaturas de serviço abaixo dos  $-40^{\circ}\text{C}$ , enquanto que os aços do grupo duplex com maior quantidade de elementos de liga, como o 1.4462, exibem ainda melhor ductilidade.

Testes já realizados demonstraram que os aços ferríticos mantêm a ductilidade a temperatura mínima de serviço em ambientes interiores. A classe 1.4003 possui uma microestrutura modificada que permite um aumento significativo da tenacidade; é a classe mais adequada para aplicações estruturais em secções de maior espessura. Não

é recomendável o uso da classe 1.4016 para secções com espessura superior a 3 mm onde seja previsível que a temperatura de serviço seja inferior a 0°C. Para as classes 1.4059, 1.4521 e 1.4621, a espessura máxima recomendada em zonas com temperaturas abaixo dos 0°C é de 2 mm.

Não existe nenhuma evidência que sugira a ocorrência de rotura lamelar nos aços inoxidáveis.

## 2.4 Propriedades físicas

A Tabela 2.7 fornece as propriedades físicas em condições recozidas à temperatura ambiente de todas as classes de aços abrangidas neste Manual de Dimensionamento. Estas propriedades podem variar ligeiramente com a forma do produto, mas geralmente essas variações não são significativas.

*Tabela 2.7 Propriedades físicas à temperatura ambiente, condições recozidas*

| Tipo         | Classe | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Expansão térmica 20 - 100°C (10 <sup>-6</sup> /°C) | Condutividade térmica (W/m°C) | Calor específico (J/kg°C) |
|--------------|--------|--------------------------------|--|-------------------------------|---------------------------|
| Austeníticos | 1.4301 | 7900                           | 16   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4307 | 7900                           | 16   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4401 | 8000                           | 16   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4318 | 7900                           | 16   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4404 | 8000                           | 16   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4541 | 7900                           | 16   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4571 | 8000                           | 16,5   | 15                            | 500                       |
| Duplex       | 1.4062 | 7800                           | 13   | 15                            | 480                       |
|              | 1.4162 | 7700                           | 13   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4362 | 7800                           | 13   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4482 | 7800                           | 13   | 13                            | 500                       |
|              | 1.4462 | 7800                           | 13   | 15                            | 500                       |
|              | 1.4662 | 7700                           | 13   | 15                            | 500                       |
| Ferríticos   | 1.4003 | 7700                           | 10,4   | 25                            | 430                       |
|              | 1.4016 | 7700                           | 10   | 25                            | 460                       |
|              | 1.4509 | 7700                           | 10   | 25                            | 460                       |
|              | 1.4521 | 7700                           | 10,4   | 23                            | 430                       |
|              | 1.4621 | 7700                           | 10   | 21                            | 460                       |
| Aço Carbono  | S355   | 7850                           | 12   | 53                            | 440                       |

O coeficiente de expansão térmica dos aços austeníticos é cerca 30% superior aos do aço carbono. No dimensionamento de elemento que utilizem aço carbono e aço inoxidável em conjunto, os efeitos dos coeficientes diferenciais de expansão térmica

devem ser tidos em consideração. A condutividade térmica dos aços austeníticos e duplex é cerca de 30% do valor da do aço carbono. As classes ferríticas possuem uma condutividade térmica superior, cerca de 50% da do valor de aço carbono. A expansão térmica dos ferríticos é muito mais baixa do que a dos aços austeníticos e aproximadamente igual à dos aços carbono.

Os aços duplex e ferritos são magnéticos, enquanto que os aços austeníticos em condições recozidas são essencialmente não-magnéticos. Nos casos onde é necessária baixa permeabilidade magnética, existem austeníticos específicos que se podem utilizar, para além disso, deve-se ter cautela na escolha do consumíveis para soldadura de modo a eliminar o teor de ferrite na soldadura. Estes consumíveis fornecem uma solidificação a 100% no metal soldado. A permeabilidade magnética pode aumentar devidos aos elevados tratamentos de endurecimento a frio, em particular os aços austeníticos simples; da mesma forma, a têmpera restaura as propriedades não-magnéticas.

## **2.5 Efeito da temperatura**

A classe dos austeníticos é utilizada para aplicações criogénicas. No outro limite da escala de temperaturas, os aços austeníticos retêm uma maior porção da sua resistência acima de 550°C, quando comparados com os aços carbono. No entanto, o dimensionamento de estruturas sujeitas a longo prazo de exposição a temperaturas criogénicas ou a altas temperaturas está fora do âmbito deste Manual de Dimensionamento. Pode dizer-se então que outras propriedades mecânicas e tipos de corrosão que as consideradas na Secção 3 são de maior importância. Outros aços inoxidáveis para além dos aqui apresentados são mais adequados para serem utilizados a altas temperaturas.

Os aços duplex não devem ser utilizados durante longos períodos a temperaturas superiores entre 250-300°C, devido à possibilidade de fragilização.

A Secção 8 trata o dimensionamento ao fogo e fornece informação acerca das propriedades mecânicas e físicas dos aços inoxidáveis a altas temperaturas.

## **2.6 Galvanização e contacto com zinco fundido**

A galvanização a quente de componentes de aço inoxidável não é permitida porque o contacto com zinco fundido pode causar fragilidade no aço. Devem ser tomadas precauções para que, no caso de incêndio, o zinco fundido proveniente da galvanização do aço não entre em contacto com o aço inoxidável. Adicionalmente, existe risco de fragilização do aço inoxidável se este estiver ligado a um aço carbono que foi galvanizado a quente.

## **2.7 Disponibilidade de produtos**

### **2.7.1 Tipos de produtos**

As classes de aço inoxidáveis consideradas neste Manual de Dimensionamento existem em várias chapas, placas e barras. As classes ferríticas estão apenas disponíveis em espessuras até 4 mm.

Os produtos tubulares estão disponíveis em aços austeníticos e para alguns aços duplex tais como os aços 1.4462 e 1.4162. As secções tubulares estão amplamente disponíveis nas classes ferríticas 1.4003 e 1.4016. As secções tubulares enformadas a frio são geralmente utilizadas em aplicações estruturais; também há disponível

produtos laminados a quente. As secções retangulares podem ser construídas a partir de duas secções em U soldadas.

As secções abertas são geralmente produzidas por enformação a frio, soldadura (arco ou laser) ou laminadas a quente. Existe uma diversa gama de dimensões de secções cantoneiras, em U, I e T; estas secções encontram-se disponíveis em dimensões iguais às dimensões padrão do aço de carbono (Exemplo IPE, IPN, etc); as secções mais pequenas são laminadas a quente e as dimensões superiores são soldadas. Estas estão disponíveis nas classes austeníticas padrão 1.4301 e 1.4401; as secções da classe duplex são normalmente produzidas apenas por encomenda. As secções laminadas a quente apenas estão disponíveis nas classes 1.4301 e 1.4401.

As dimensões de secções tubulares e secções aberta padrão estão disponíveis no software e aplicações móveis (disponível no website [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)).

Os materiais endurecidos a frio da classe dos aços austeníticos estão disponíveis em placas, chapas, rolos, tiras, barras e secções tubulares:

- Placas, chapas, rolos, tiras (com espessuras  $\leq 6,0$  mm)
- Barras (diâmetros entre 5 mm a 60 mm)
- Secções retangulares tubulares (secções transversais com dimensões até 400 mm, espessuras desde 1,2 a 12 mm).

### **2.7.2 Enformação a frio**

É importante uma discussão previa com os fabricantes de modo a determinar a gama de espessuras de chapas que podem ser enformadas a frio. O aço inoxidável exige o uso de cargas de deformação mais elevadas do que os aços carbono e tem propriedades elásticas diferentes. O comprimento das secções prensadas a frio é necessariamente limitado pelo tamanho da máquina ou pela capacidade da mesma no caso de materiais com espessuras mais elevadas ou mais resistentes. Os aços duplex requerem aproximadamente o dobro das cargas de deformação utilizadas para os aços austeníticos e conseqüentemente, a variedade de secções duplex é mais limitada. No entanto, a alta resistência destes aços facilita a utilização de secções com espessuras mais baixas. Para além disso, devido à baixa ductilidade desta classe de aços, devem ser utilizados raios de curvatura menos acentuados. As secções tubulares de paredes finas são normalmente produzidas por laminagem a quente ou soldadura. As chapas em aços austeníticos laminadas a quente com espessuras até 13 mm podem ser enformadas a frio de modo a formarem secções como por exemplo, cantoneiras. Na Secção 11.5.2 encontra-se informação adicional.

### **2.7.3 Laminagem a quente**

As placas de aço inoxidável com espessuras demasiado elevadas para serem enformadas a frio são aquecidas e laminadas até a sua forma final. Este método é geralmente mais económico para produções em grande escala. Para produzir componentes estruturais médias a grandes são utilizadas uma grande variedade de placas com espessuras e larguras diversas. As cantoneiras e secções UPN são normalmente produzidas por desta técnica. Esta técnica pode ser combinada em conjunto com soldadura para criar diferentes secções estruturais. Por exemplo, soldando duas secções em T pode produzir-se uma secção em I. As secções tubulares de paredes espessas são normalmente produzidas através de laminagem a quente e soldadura.

#### **2.7.4 Extrusão**

As extrusões a quente em aço inoxidável são produzidos a partir de barras. No caso da forma requisitada não ser comum, poderá ser necessária uma maior produção para justificar os custos associados. O tamanho máximo varia de acordo o fabricante, mas ronda os 330 mm de diâmetro. As secções são geralmente fornecidas com um comprimento até 10 m. Adicionalmente às secções habituais, com o processo extrusão é possível produzir uma vasta gama de secções, que de outra maneira exigia maquinaria ou soldadura. De forma a obter mais informações acerca de espessuras mínimas e ângulos de cantos deve-se contactar os fornecedores.

#### **2.7.5 Chapas soldadas**

As secções fabricadas por chapas soldadas são tipicamente utilizadas quando é necessárias pequenas quantidades de uma determinada secção, banzos sem variação de espessura ou se o elemento for consideravelmente grande.

Quando um projeto exige pequenas quantidades de um componente de grandes dimensões ou com uma forma inusual, os fabricantes experientes produzem-nas por soldadura utilizando os métodos aprovados pelas normas.

O armazenamento de cantoneiras soldadas por laser, vigas, secções UPN, secções em T e secções tubulares de tamanhos comuns tem vindo a aumentar. As cantoneiras, vigas e secções UPN até 400 mm de largura podem ser encontrados em aço inoxidável austeníticos. Secções maiores e secções em aço inoxidável duplex podem também ser produzidos.

#### **2.7.6 Acabamento das superfícies**

Em certas aplicações, o bom acabamento das superfícies e uma aparência uniforme são importantes para a boa resposta à corrosão, estética ou limpeza da superfície. A EN 10088-4 e -5 especificam diversos tipos de acabamentos de superfície, desde acabamentos mate até polidos brilhantes. Cada acabamento é designado por um número (1 para acabamentos de laminados a quente e 2 para acabamentos de laminados a frio), seguido de uma letra. As secções abertas de paredes espessas possuem geralmente um acabamento 1D (laminado a quente, tratamento a quente e decapagem<sup>1</sup>).

Em aplicações estruturais, as superfícies laminadas a frio são normalmente escolhidas devido ao facto de serem mais macias que os acabamentos laminados a quente, por exemplo, um acabamento 2B (laminado a frio, tratamento a quente, decapagem e polimento) é um acabamento superficial económico. Os acabamentos de superfície especialmente projetados para uso arquitetónico também estão disponíveis. É de notar que variabilidade no processamento introduz diferenças na aparência entre fabricantes ou até entre um único fabricante. Como tal, os fornecedores devem ter consciência dos requisitos de acabamentos exigidos. É recomendado que o comprador e o fornecedor tenham uma amostra de referência. Acabamentos brilhantes tornam as superfícies mais atraentes. Os acabamentos mais opacos tornam a superfície mais plana. Existe uma pequena variação da cor prateada natural de cada grupo de aço inoxidável (austeníticos, duplex, ferríticos) que necessita de se ter em conta durante o dimensionamento.

---

<sup>1</sup> Decapagem é a remoção de uma camada fina de metal da superfície do aço inoxidável, usualmente aplicando uma mistura de nítrico e ácido fluorídrico. Alternativamente, estão também disponíveis, em fornecedores especializados, combinações menos agressivas.

### **2.7.7 Parafusos**

Os parafusos austeníticos da EN ISO 3506 classe 70 são os mais utilizados. A EN ISO 3506 refere certas limitações referentes ao tamanho e comprimento destes parafusos.

Os parafusos podem ser produzidos a partir de várias técnicas, ex. por maquinação, laminagem a frio e por forjamento. As roscas laminadas apresentam uma maior resistência que as maquinadas devido ao endurecimento do material que ocorre durante o processo de laminagem. As tensões de compressão à superfície das roscas laminadas melhoram a resistência à fadiga e, em alguns casos, a resistência à fendilhação por corrosão (SCC). O fabrico de roscas por laminagem é a técnica mais comumente utilizada no fabrico de parafusos de porca e parafusos, especialmente para produções em larga escala em dimensões comercialmente comuns. Para parafusos de maior dimensão (de M36 para cima) e em especial para parafusos em aço duplex de maior resistência, as roscas são normalmente cortadas.

## **2.8 Ciclo de vida e impacto ambiental**

Existe uma preocupação crescente relativamente aos custos associados ao ciclo de vida útil dos materiais, ou seja, quando selecionamos um material não devemos ter apenas em atenção os custos iniciais. As experiências têm demonstrado que a utilização de materiais resistentes à corrosão de modo a evitar manutenções futuras, inatividade e substituição, podem ser uma solução mais económica, mesmo que os custos iniciais sejam mais elevados. Os custos de ciclo de vida devem ter em conta:

- Custos iniciais;
- Custos de manutenção;
- Diferença entre aterros e material reciclado;
- Vida útil e ambiente a que está sujeito.

Dependendo da classe do aço inoxidável o custo inicial do material para um elemento estrutural é consideravelmente mais elevado que o custo de um produto equivalente em aço carbono. No entanto, podem existir poupanças iniciais por não ser necessário revestimento contra a corrosão. O uso de aço inoxidável de alta resistência pode reduzir a quantidade de material necessário, por permitir a diminuição dos tamanhos das secções e o peso total da estrutura, havendo assim, um corte nos custos iniciais. Adicionalmente, por não ser necessário manutenção dos revestimentos ou substituição de componentes por corrosão, existe poupanças a longo prazo na manutenção da estrutura.

A excelente resistência à corrosão do aço inoxidável oferece uma redução na frequência de inspeções e custos, reduzindo assim os custos de manutenção e aumentando a vida útil da estrutura.

O aço inoxidável apresenta um valor residual alto de resíduos sólidos (valor no fim de vida de uma estrutura), apesar de este fator ser raramente um fator determinante numa estrutura com vida útil elevada (mais de 50 anos). No entanto, devido ao alto valor residual de resíduos sólidos, estes são desviados dos aterros e reciclados, produzindo taxas de reciclagem elevadas. Os produtores de aço inoxidável utilizam bastantes os resíduos sólidos, mas a vida útil de 20 a 30 anos limita a existência de resíduos sólidos. O teor em aço inoxidável tipicamente reciclado é de pelo menos 60%. O aço inoxidável é 100% reciclável e pode ser indefinidamente transformado numa nova e melhorada qualidade de aço inoxidável.

No cálculo dos custos de ciclo de vida é utilizado o princípio do fluxo de caixa descontado, trazendo para o presente, através de uma taxa de desconto, todos os custos associados ao ciclo de vida. A taxa de desconto tem em conta a inflação, as taxas de juro bancárias, impostos e, possivelmente, o fator risco. Isto permite uma comparação realística das opções disponíveis e dos potenciais benefícios a longo prazo usando aço inoxidável em comparação com outros materiais.

## 3 DURABILIDADE E SELEÇÃO DE MATERIAIS

### 3.1 Introdução

Os aços inoxidáveis são geralmente muito resistentes à corrosão e podem ser utilizados satisfatoriamente na maioria dos ambientes. O limite de resistência à corrosão de um dado aço inoxidável é dependente dos seus elementos constituintes, o que significa que cada classe tem uma resposta ligeiramente diferente quando exposto a um ambiente corrosivo. Para seleccionar a classe de aço inoxidável para uma determinada aplicação é necessário ter em conta este aspeto. Geralmente, quanto maior o nível de resistência à corrosão, maior o custo do material. Por exemplo, a classe de aço 1.4401 custa mais do que a classe 1.4301 devido à adição de molibdênio. O aço inoxidável duplex possibilita uma maior resistência à corrosão a um custo inferior ao do preço *premium*. Para além disso, a sua maior resistência possibilita a redução das secções e, portanto, o custo do material.

O material austenítico trabalhado a frio tem uma resistência à corrosão semelhante à do estado recozido.

As razões mais comuns para um metal apresentar um tempo de vida inferior ao esperado em relação à resistência à corrosão são:

- (a) Avaliação incorreta do ambiente ou exposição a condições inesperadas, isto é, contaminação imprevista de iões de cloreto ou da superfície superior ao expectável.
- (b) Técnicas inadequadas de fabricação do aço inoxidável (por exemplo soldaduras, tratamento térmico e calor gerado durante a conformação do material), remoção incompleta da matriz de calor da soldadura, ou contaminação superficial.
- (c) Acabamento demasiado rugoso ou incorretamente orientado.

Mesmo quando existem manchas ou corrosão superficiais, é improvável que a integridade estrutural seja comprometida. No entanto, pode considerar-se as manchas de ferrugem, nas superfícies externas, como uma falha. A seleção cuidadosa da classe do material, a boa fabricação e a correta pormenorização podem reduzir significativamente a probabilidade da ocorrência de manchas e corrosão; na Secção 11 são fornecidas orientações práticas. A experiência sugere que qualquer problema grave associado com a corrosão é mais provável de ocorrer nos primeiros dois ou três anos de serviço.

Em alguns ambientes agressivos, algumas classes de aço inoxidável serão suscetíveis a ataques localizados. Na próxima secção são descritos seis mecanismos, embora os últimos três sejam raramente encontrados em edifícios.

Deve ser enfatizado que para ocorrer corrosão é necessário a presença de humidade (incluindo a que é devida à condensação).



## 3.2 Tipos de corrosão e desempenho das classes de aço

### 3.2.1 Corrosão por picadas

Como o próprio nome indica, a corrosão por picadas toma a forma de covas localizadas. Ocorre como resultado da degradação local da camada passiva, normalmente devido a íons de cloreto, embora outros halogenetos e aniões possam ter um efeito semelhante. Durante o desenvolvimento da corrosão superficial, as substâncias resultantes da corrosão podem levar à criação de uma solução muito corrosiva, com elevadas taxas de propagação. Na maior parte das aplicações estruturais, a extensão da picada é superficial e a redução da secção do componente desprezável. No entanto, os produtos de corrosão podem levar a imperfeições nas características geométricas. Deve ser adotada uma visão menos tolerante para aplicações como condutas, tubos e estruturas de contenção. Uma vez que o íon de cloreto é a causa mais comum da corrosão por picada em aplicações exteriores, as zonas costeiras e ambientes carregados com sais de degelo são considerados bastante agressivos. Para além do teor em cloreto, a probabilidade de um ambiente de serviço causar corrosão por picadas depende de fatores como a temperatura, partículas e poluentes corrosivos, acidez ou alcalinidade, teor de agentes oxidantes e também a presença ou ausência de oxigénio. A resistência à corrosão por picadas de um aço inoxidável depende da sua composição química. Crómio, molibdénio e nitrogénio aumentam a resistência à corrosão por picadas.

A Resistência Equivalente à Picada (PRE) fornece uma estimativa derivada empiricamente da resistência à picada e é definida como:

$$PRE = \% \text{ wt Cr} + 3,3(\% \text{ wt Mo}) + 16(\% \text{ wt N})$$

O valor de PRE de um aço inoxidável é um bom indicador para avaliar a sua resistência à corrosão relativamente a outros aços inoxidáveis, mas apenas deverá ser utilizado como uma primeira aproximação. Pequenas diferenças no valor de PRE podem ser facilmente ofuscadas por outros factos que também influenciam a resistência à corrosão por picadas. Assim sendo, o valor de PRE não deve ser o único fator na seleção.

A classe 1.4301 apresenta o valor de PRE mais baixo das classes austeníticas cobertas neste Manual de Dimensionamento. Aços desta classe apresentam corrosão superficial em aplicações com baixa ou moderada exposição a sal costeiro ou de degelo e não são adequados para ambientes com pulverização, salpicos e imersão. A classe 1.4301 pode também apresentar valores inaceitáveis de resistência à corrosão por picadas em atmosferas industriais.

Para uma exposição baixa a moderada à poluição industrial, ou a sais de cloreto costeiros ou de descongelamento, são preferidos os aços inoxidáveis 1.4401 ou 1.4362 duplex ou 1.4162. Quando a exposição à poluição ou aos sais é superior, é preferido o aço duplex 1.4462 ou mesmo aços inoxidáveis com maior resistência à corrosão.

### 3.2.2 Corrosão intersticial

A corrosão intersticial ocorre em fendas apertadas, não vedadas onde exista um fluxo contínuo de água dentro e fora da fenda. A fenda deve ser estreita o suficiente para permitir a entrada de água e cloreto dissolvido, mas impedir a difusão de oxigénio na fenda.

A corrosão intersticial pode ser evitada selando as fendas ou eliminando-as. A severidade de uma fenda depende fortemente da sua geometria: quanto mais estreita e profunda for a fenda, mais severas são as condições de corrosão.

As ligações que não estão submersas devem ser projetadas de forma a evitar a humidade. Alguns aços inoxidáveis, incluindo os aços 1.4301 e 1.4401, são suscetíveis à corrosão intersticial quando existem cloretos ou sais no ambiente. Os aços austeníticos e duplex mais resistentes são menos suscetíveis e o seu desempenho será dependente de várias condições, nomeadamente da temperatura.

A severidade da corrosão em fendas submersas é geralmente pior do que em ambientes corrosivos atmosféricos acima da água que têm ciclos molhados e secos, ou que estão regularmente húmidos. As fendas estreitas submersas são mais agressivas porque a difusão necessária de oxidantes para manter a película passiva é restrita.

As fendas podem resultar de uma junta de metal com metal, de incrustações, de depósitos superficiais (por exemplo partículas, alimentos, detritos), e de danos superficiais como ferro incorporado. É importante eliminar estas fendas, sendo que muitas vezes não é possível eliminá-las completamente.

Tal como na corrosão por picadas, os elementos de liga como o cromo, o molibdénio e o nitrogénio aumentam a resistência ao ataque e, assim, a resistência à corrosão intersticial para as classes 1.4301 passando por 1.4401 até 1.4462.

### **3.2.3 Corrosão bimetálica (galvânica)**

Quando dois metais dissimilares estão em contacto elétrico por um eletrólito (isto é, um condutor elétrico líquido como a água do mar ou água impura), flui uma corrente do metal anódico para o catódico, ou metal nobre, através do eletrólito. Como resultado, o metal menos nobre sofre corrosão.

Os aços inoxidáveis são normalmente utilizados como o metal catódico e, portanto, não sofrem corrosão adicional. Os aços inoxidáveis e as ligas de cobre estão muito próximos na série galvânica, e quando expostos a condições atmosféricas moderadas podem ser geralmente colocados em contacto direto sem grandes preocupações.

Esta forma de corrosão é particularmente relevante quando se considera a junção de aços inoxidável e aços carbono ou aços de baixa liga, aço corten, ou alumínio. É importante assegurar que o metal de adição é pelo menos tão nobre quanto o material mais resistente à corrosão (normalmente aço inoxidável). Da mesma forma, se se utilizarem fixadores, o material dos parafusos deve ser equivalente ao metal mais resistente à corrosão. A corrosão galvânica entre diferentes tipos de aços inoxidáveis não é muito preocupante, apenas em condições de imersão total.

A corrosão bimetálica por ser prevenida eliminando o fluxo de corrente através de:

- isolamento dos materiais dissimilares, isto é, quebrando o caminho metálico (ver Secção 7.1.1);
- prevenção da ligação do eletrólito, isto é, quebra do percurso eletrólito utilizando tinta ou outro revestimento. Quando se utiliza este tipo de proteção e é impraticável revestir ambos os metais, então é preferível revestir o mais nobre (isto é, o aço inoxidável no caso de uma ligação de aço inoxidável/carbono).

O risco de um ataque por corrosão é maior se a área do metal mais nobre (isto é, do aço inoxidável) for grande em comparação com a área do metal menos nobre (isto é, do aço carbono). Deve ser dada especial atenção ao uso de tintas ou outros revestimentos nos aços carbono. Se existirem pequenos poros ou furos no revestimento, a área de carbono desprotegida proporciona um rácio cátodo/ânodo muito grande, e pode ocorrer corrosão no aço carbono.

Este fenómeno é provável que seja mais severo em condições de imersão. Nesse caso, é também preferível pintar os aços inoxidáveis até uma distância de pelo menos 75 mm desde a zona de contacto entre os metais, de modo a que quaisquer poros conduzam a rácios de áreas pequenas.

Junto aos fixadores e nas juntas é provável que ocorram rácios de área adversos. Devem ser evitados parafusos em aço carbono em componentes de aço inoxidável, porque a proporção da área do aço inoxidável para o aço carbono é elevada e os parafusos ficarão sujeitos a ataques agressivos. Por outro lado, a taxa de ataque sobre um aço carbono ou um componente em alumínio, devido a um parafuso em aço inoxidável, é desprezável. Geralmente, é útil tirar proveito da experiência anterior em locais semelhantes, porque metais dissimilares podem ser acoplados com segurança em condições de condensação ou humidade ocasionais sem efeitos adversos, especialmente quando a condutividade do eletrólito é baixa.

A previsão destes efeitos é difícil porque a taxa de corrosão é determinada por um número complexo de variáveis. As tabelas de potencial elétrico desprezam a presença de fluxos de óxido superficiais, os efeitos de rácios de área e a composição química de soluções (eletrólitos) diferentes. Portanto, o uso desinformado dessas mesmas tabelas pode produzir resultados errôneos. Elas devem ser usadas com cuidado e apenas para uma avaliação inicial.

O comportamento geral dos metais em contato bimetálico em ambientes rurais, urbanos, industriais e costeiros está totalmente documentado em BS PD 6484 *Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation*.

### **3.2.4 Fragilização por corrosão sob tensão**

O desenvolvimento de fragilização por corrosão sob tensão (SCC) requer a presença simultânea de esforços de tensão e fatores ambientais específicos improváveis de serem encontrados em ambientes típicos de construção. As tensões não precisam de ser muito elevadas relativamente à tensão limite de plasticidade do material e podem ser devidas ao carregamento ou efeitos residuais de processos de fabricação, tais como soldadura ou flexão. Os aços inoxidáveis ferríticos não são suscetíveis à SCC. Os aços inoxidáveis duplex têm geralmente resistência superior à corrosão sob tensão à dos aços inoxidáveis austeníticos referidos neste manual. Os aços inoxidáveis austeníticos de liga mais elevada, tais como as classes 1.4539, 1.4529, 1.4547 e 1.4565, foram desenvolvidos para aplicações em que a SCC é apresentada como uma possível forma de corrosão.

Deve-se ter precaução na utilização de componentes em aço inoxidável com tensões residuais elevadas (por exemplo, tensões devido ao trabalho a frio) em ambientes ricos em cloretos (por exemplo: piscinas interiores, marinas e estruturas em ambiente offshore). De igual forma os cabos altamente solicitados, em ambientes ricos em cloretos, podem ser suscetíveis a SCC, dependendo da classe do aço inoxidável.

A Secção 3.5.3 fornece orientações sobre a seleção das classes de aço inoxidável a utilizar em piscinas de forma a evitar a SCC.

### **3.2.5 Corrosão geral (uniforme)**

Em condições normais, os aços inoxidáveis não são danificados pela perda de secção que é característica da corrosão em ferros e aços não ligados.

### **3.2.6 Corrosão intergranular e decaimento de soldadura**

Quando os aços inoxidáveis austeníticos estão sujeitos a um aquecimento prolongado numa gama entre 450 °C a 850 °C, o carbono começa a difundir-se para as fronteiras de grão e precipita carbonetos de cromo. Isto remove o cromo da solução sólida e deixa um menor teor de cromo adjacente aos limites de grão. As fronteiras de grão tornam-se zonas preferenciais aos ataques, quando expostas a ambientes corrosivos. Esse fenómeno é conhecido como "decaimento de soldadura" quando ocorre na zona afetada pelo calor de uma soldadura.

Há três maneiras de evitar a corrosão intergranular:

- utilizar aço com baixo teor em carbono;
- utilizar aço estabilizado com titânio ou nióbio (por exemplo 1.4541, 1.4571, 1.4509, 1.4521 ou 1.4621), porque estes elementos combinam preferencialmente com o carbono para formar partículas estáveis, reduzindo assim o risco de formação de carboneto de cromo;
- utilizar tratamento térmico, porém na prática, este método raramente é utilizado na prática.

No caso dos aços austeníticos ou duplex, para evitar sensibilização e a corrosão intergranular, deve ser especificado um aço inoxidável com baixo teor de carbono (0.03% no máximo) quando se realiza a soldadura das secções. A corrosão intergranular é agora pouco comum nos aços inoxidáveis austeníticos ou duplex porque as práticas atuais de fabricação de aço asseguram baixos teores de carbono.

Os aços inoxidáveis ferríticos são mais suscetíveis à sensibilização (devido à soldadura) que os aços inoxidáveis austeníticos. Portanto, mesmo com baixo teor de carbono, é importante usar uma classe ferrítica estabilizada para secções soldadas.

## **3.3 Corrosão em ambientes selecionados**

### **3.3.1 Ar**

Os ambientes atmosféricos variam, assim como o seu efeito nos aços inoxidáveis. Ambientes rurais, não contaminados por poluentes industriais ou sal costeiro, são muito suaves em termos de corrosividade, mesmo em áreas de alta humidade. Atmosferas costeiras e indústrias de sal de descongelação são consideravelmente mais graves. Deve ser consultada a Secção 3.5 para orientação sobre a escolha adequada dos tipos de aços inoxidáveis.

As causas mais comuns de corrosão atmosférica são a contaminação da superfície com partículas de ferro metálicas, decorrentes de operações de fabricação ou durante a construção, cloretos provenientes do mar, sais de degelo, poluição industrial e produtos químicos (por exemplo, lixívia e ácido clorídrico). Algumas partículas depositadas (poeira, areia, vegetação ou detritos), embora inertes, criam fendas e são capazes de absorver sais, produtos químicos e soluções ácidas fracas provenientes de chuvas ácidas. Uma vez que também retêm a humidade por períodos mais longos de tempo, o resultado pode ser um ambiente local mais corrosivo.

O acabamento superficial tem um efeito significativo sobre o aspecto geral do aço inoxidável exposto (por exemplo, acumulação de sujidade), na eficácia da limpeza e sobre a taxa de corrosão (acabamentos mais suaves têm melhor resistência à corrosão).

### 3.3.2 Água do mar

A água do mar, incluindo água salobra, contém altas concentrações de cloreto e, portanto, é corrosiva. Pode ocorrer corrosão superficial severa nas classes 1.4301 e 1.4401. Além disso, estas classes podem sofrer ataques em fendas, se estes resultam dos detalhes construtivos ou de organismos incrustantes como cracas.

Em algumas aplicações, o aço duplex 1.4462 pode ser adequado em situações onde a corrosão pode ser tolerada, se a vida útil esperada for definida e os componentes inspecionados. Para instalações de longo prazo devem ser especificadas as classes super-austeníticas, super-ferríticas ou super-duplex. Estes aços contêm níveis mais elevados de elementos como cromo, níquel, molibdênio, cobre e nitrogênio, exibindo um nível de resistência à corrosão que os torna adequados para um ambiente marítimo e com elevada concentração de acidez. As classes típicas super-austeníticas são as 1.4565, 1.4529 e 1.4547 e as classes típicas super-duplex são as 1.4410, 1.4501 e 1.4507.

A pulverização regular de sais ou salpicos podem causar ataque similar ao obtido por imersão completa porque a concentração de cloreto superficial aumenta com a evaporação da água. A alta concentração de cloreto da água proveniente do escoamento do sal de degelo, pode causar problemas de corrosão semelhantes em componentes de drenagem para tempestades.

Se o aço inoxidável for utilizado com outros metais na presença de água do mar deve ser considerado a possibilidade de corrosão bimetálica grave.

### 3.3.3 Outras águas

Os aços inoxidáveis austeníticos e duplex convencionais geralmente funcionam satisfatoriamente em águas destiladas, de canalização e de caldeiras. Se o nível de pH da água for inferior a 4, deve-se procurar aconselhamento especializado sobre a seleção da classe do aço.

A água de rio ou de lago não tratada, assim como a água usada em processamento industrial, pode às vezes ser muito corrosiva. Deve ser realizada uma análise completa da composição química da água, incluindo o nível de pH, o teor de sólidos e o tipo e o nível de cloreto. A gama de temperatura típica, o tipo de atividade biológica ou microbiológica e a concentração e natureza dos produtos químicos corrosivos também são relevantes. Se a água não atende aos padrões de qualidade da água potável, deve-se procurar aconselhamento especializado sobre a seleção da classe do aço.

A possibilidade de erosão-corrosão deve ser considerada para águas que contêm partículas abrasivas.

### 3.3.4 Ambientes químicos

Como o aço inoxidável é resistente a muitos produtos químicos, é frequentemente utilizado para a sua contenção. A gama de aplicação do aço inoxidável em ambientes químicos é ampla, no entanto não é aqui abordado este assunto em detalhe. Os ambientes químicos estão fora do âmbito da orientação para a seleção das classes dada em EN 1993-1-4. Deve notar-se, contudo, que em muitas aplicações, poderão ser mais adequados aços diferentes dos que foram considerados neste Manual. Deve ser procurado o conselho de um engenheiro especializado em corrosão.

Gráficos publicados por fabricantes, onde são demonstrados os resultados dos testes de corrosão em vários produtos químicos exigem uma interpretação cuidadosa.

Embora eles sirvam de guia para a resistência de uma determinada classe, as condições de serviço (temperaturas, pressões, concentrações, etc) variam e geralmente diferem das condições de teste. Além disso, o efeito das impurezas e o grau de aeração podem ter um efeito significativo nos resultados.

### 3.3.5 Solos

Os solos diferem na sua corrosividade dependendo do nível de humidade, pH, arejamento, presença de contaminantes químicos, atividade microbiológica e drenagem superficial. Os aços inoxidáveis geralmente funcionam bem em vários solos e especialmente bem em solos com alta resistividade, embora tenha sido verificada alguma corrosão superficial em solos húmidos de baixa resistividade. A presença de espécies químicas agressivas, tais como iões de cloreto, bem como alguns tipos de bactérias e corrente elétrica parasita (causada por sistemas de transporte de corrente elétrica, como sistemas ferroviários) pode causar corrosão localizada. O desenvolvimento de corrente elétrica parasita pode ser suprimido através da utilização de isolamento elétrico apropriado (revestimentos ou invólucros) e/ou proteção catódica.

Para a seleção da classe, recomenda-se considerar a resistência à corrosão do aço inoxidável enterrado em primeiro lugar em relação à presença de iões cloreto e em segundo lugar de acordo com a resistividade do solo e pH, assumindo solos mal drenados em todos os casos. A Tabela 3.1 recomenda as classes adequadas para diferentes condições do solo.

**Tabela 3.1** Classes de aço inoxidável para uso em diferentes condições de solo

| Localização típica   | Condição do solo           | Classe do aço inoxidável         |
|--|----------------------------|----------------------------------|
| Inland   | Cl < 500 ppm               | 1.4301, 1.4307<br>1.4401, 1.4404 |
|  | Resistividade >1000 ohm.cm |                                  |
|  | pH > 4,5                   |                                  |
| Cloretos<br>(sal costeiro/de degelo)<br>Zona sem maré  | Cl < 1500 ppm              | 1.4401, 1.4404                   |
|  | Resistividade >1000 ohm.cm |                                  |
|  | pH > 4,5                   |                                  |
| Cloretos<br>(sal costeiro/de degelo)<br>Zona de maré   | Cl < 6000 ppm              | 1.4410, 1.4547, 1.4529           |
|  | Resistividade >500 ohm.cm  |                                  |
|  | pH > 4,5                   |                                  |
| Nota:<br>1.4410 é um super duplex e 1.4547 e 1.4529 são super austeníticos. Geralmente estas classes não são utilizadas em aplicações de construção e estão fora do âmbito deste Manual. |                            |                                  |

## 3.4 Dimensionamento para o controlo da corrosão

O passo mais importante na prevenção de problemas associados à corrosão é a seleção de um aço inoxidável com a resistência e com procedimentos de fabrico adequados para o ambiente em questão. No entanto, depois de se especificar um determinado aço, é ainda possível aumentar o potencial do mesmo se se prestar uma atenção aos detalhes construtivos. As ações anticorrosivas devem ser consideradas na fase de planeamento e de dimensionamento.

A Tabela 3.2 fornece uma lista de considerações. Nem todos os pontos dariam os melhores detalhes do ponto de vista de resistência estrutural e nem são destinados a ser aplicados a todos os ambientes. Em particular, em ambientes de baixa corrosividade ou em que a manutenção é regular, muitos destes pontos não seriam necessários. A

Figura 3.1 ilustra as melhores e piores detalhes construtivos para se obter uma maior durabilidade. O Anexo Nacional pode especificar se é permitido uma limpeza com menos frequência (por exemplo o Anexo Nacional do Reino Unido não permite).

**Tabela 3.2** *Detalhes construtivos e especificações para o controlo da corrosão*

|   |
|---|
| <b>Evitar sujidade, humidade e deposição de depósitos corrosivos</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>orientar os ângulos e os canais dos perfis de forma a minimizar a probabilidade de retenção de água ou de humidade</li> <li>providenciar furos para a drenagem, garantindo que eles são de tamanho suficiente para evitar o seu bloqueio</li> <li>evitar superfícies horizontais</li> <li>especificar um pequeno declive sobre os reforços que se situam nominalmente num plano horizontal</li> <li>usar secções tubulares e barras (vedar os tubos de aço com gás seco ou ar onde existe o risco de formação de condensados nocivos)</li> <li>especificar acabamentos lisos ou, se os acabamentos mais rugosos forem inevitáveis, orientar o grão verticalmente, se possível.</li> </ul>  |
| <b>Evitar ou selar fendas</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Sempre que possível usar ligações soldadas ao invés de aparafusadas</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>utilizar soldaduras fechadas ou massa de enchimento</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>preferencialmente soldaduras de perfil para alisar a superfície</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>evitar bio-incrustações</li> </ul>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>usar anilhas flexíveis ou selantes de alta qualidade para ligações aparafusadas acima do solo, não imersas.</li> </ul>   |
| <b>Reduzir a probabilidade de fissuração por corrosão sob tensão em ambientes específicos onde possa ocorrer (ver Secção 3.2.4):</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>minimizar os esforços de fabricação através da escolha cuidadosa da sequência de soldadura</li> <li><i>shot peening</i> (evitar o uso de ferro/aço carbono para minimizar a inclusão de partículas de aço carbono na superfície).</li> </ul>   |
| <b>Reduzir a probabilidade por picadas (ver Secção 11):</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>remover salpicos de soldadura</li> <li>decapar o aço inoxidável para remover a matriz de calor. Devem ser evitados reagentes que contêm cloretos fortemente oxidantes, tais como cloreto de ferro; em vez disso, deve ser utilizado um banho de decapagem ou uma pasta decapante, ambos contendo uma mistura de ácido nítrico e ácido fluorídrico. As soldaduras devem ser sempre limpas para restaurar a resistência à corrosão. Também podem ser utilizados outros meios, tais como limpeza mecânica com abrasivos ou grânulos de vidro, ou eletrólise local para limpar a matriz de calor e as soldaduras</li> <li>evitar a captação de partículas de aço carbono (por exemplo, usar uma área da oficina e ferramentas dedicadas apenas ao aço inoxidável)</li> <li>seguir um programa de manutenção adequado.</li> </ul> |
| <b>Reduzir a probabilidade de corrosão bimetálica (ver Secção 3.2.3):</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>fornecer isolamento elétrico entre os metais aparafusados com materiais inertes, tais como o neoprene</li> <li>usar tintas adequadas</li> <li>minimizar os períodos de humidade</li> <li>usar metais que estejam próximos em termos de potencial elétrico.</li> </ul>  |

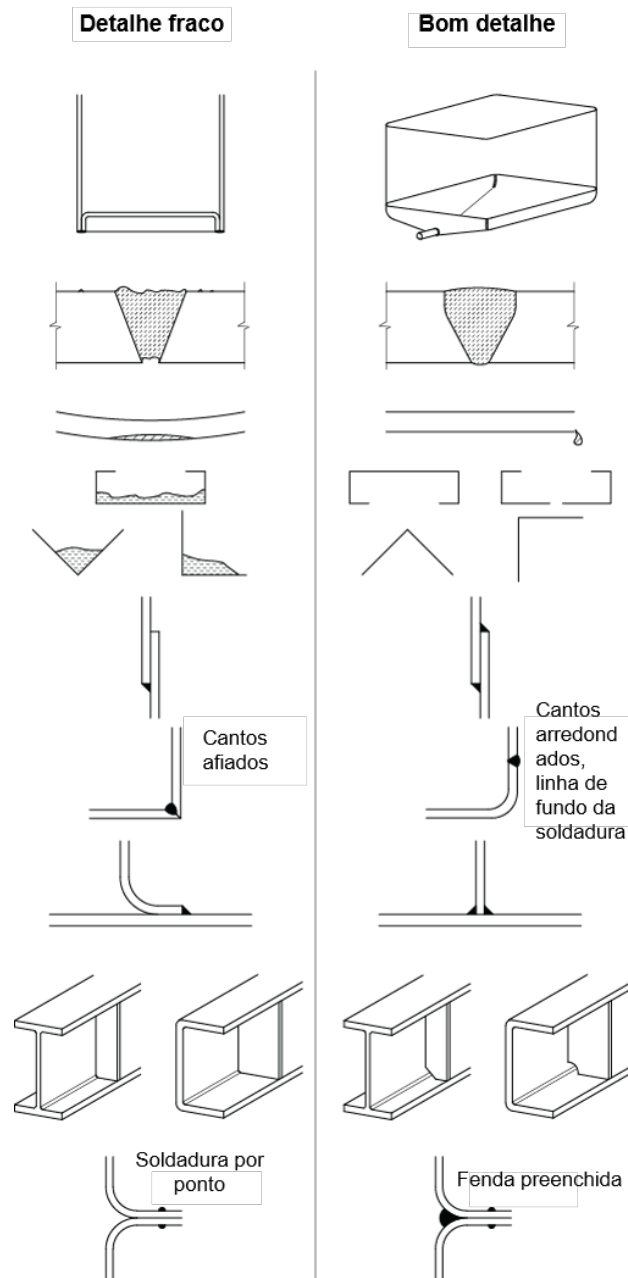


Figura 3.1 Detalhes construtivos inadequados e recomendados

## 3.5 Seleção de materiais

### 3.5.1 Introdução

Na grande maioria das aplicações estruturais que utilizam aço inoxidável, é a resistência à corrosão do metal, que é mais explorada, seja por razões estéticas, manutenção mínima ou durabilidade a longo prazo. A resistência à corrosão deve, portanto, ser o principal fator na escolha de uma classe adequada.

A seleção de um aço inoxidável apropriado deve ter em conta o ambiente de serviço, os requisitos de fabricação como raios de curvatura e soldaduras, o acabamento superficial e a manutenção da estrutura. Adicionalmente, o projetista deve determinar os critérios para a falha por corrosão. Se o componente deve manter a sua resistência durante um período de tempo e a aparência não é importante, pode ser aceitável a seleção de um aço inoxidável menos resistente. No entanto, se uma



aparência intacta sem corrosão for importante, poderá ser necessário um aço inoxidável mais resistente à corrosão, com um acabamento superficial mais suave ou uma limpeza mais frequente. A manutenção mínima, apenas lavar o aço inoxidável, mesmo de forma natural pela ação chuva, pode manter ou melhorar a aparência inicial e ajudar a prolongar o tempo de vida útil.

O primeiro passo nesta avaliação é caracterizar o ambiente de serviço, incluindo desvios em relação às condições de projeto. Além da exposição a substâncias corrosivas, devem ser consideradas as especificidades de funcionamento, climáticas e de projeto que podem influenciar o desempenho, bem como a vida útil esperada. Por exemplo, em aplicações industriais, combinações e concentrações químicas corrosivas, tempos de exposição, acumulações de depósitos superficiais, acidez e manutenção podem influenciar o desempenho da estrutura. Em aplicações externas deve ser considerada, a exposição à chuva intensa, níveis de humidade (por exemplo: humidade, chuva, nevoeiro), níveis de partículas no ar, pulverização de sais (por exemplo, de uma costa rochosa ou de uma estrada), salpicos ou imersão em água com cloretos (sal), e outros fatores semelhantes. Em todas as aplicações o desempenho da estrutura pode ser afetado por detalhes de projeto como fendas não vedadas, contato com outros metais e especificações de acabamento. Eventuais desenvolvimentos futuros ou mudanças de utilização também devem ser considerados. Deve-se notar que instalações próximas, podem apresentar níveis de exposição muito diferentes.

As classes dos aços inoxidáveis possíveis devem ser escolhidas de forma a dar uma resistência global à corrosão satisfatória no ambiente antecipado. A seleção de um aço adequado deve considerar quais as possíveis formas de corrosão que podem ocorrer. Deve-se então considerar as propriedades mecânicas, facilidade de fabricação, disponibilidade de configurações do produto, acabamento superficial e custos.

### **3.5.2 Procedimento para seleção dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex de acordo com EN 1993-1-4**

O anexo A da EN 1993-1-4 estabelece um procedimento para a seleção de um aço inoxidável para aplicações de suporte de cargas. O procedimento é aplicável às estruturas metálicas e deve ser feita referência à EN 1992 e à EN 1996 para orientação sobre a seleção de materiais para fixação no betão e na alvenaria, respetivamente. O procedimento não tem em consideração:

- a classe e disponibilidade do produto,
- os requisitos de acabamento superficial, por exemplo por razões arquitetónicas ou de higiene,
- os métodos para a junção/conexão.

O procedimento pressupõe que serão atendidos os seguintes critérios:

- o ambiente de serviço apresenta-se no intervalo de pH quase neutro (pH 4 a 10),
- as partes estruturais não estão diretamente expostas a, ou parte de uma corrente de fluxo de um processo químico,
- o ambiente de serviço não está permanentemente ou frequentemente imerso em água do mar.

Se estas condições não forem cumpridas, deve-se procurar aconselhamento especializado.

O procedimento é adequado apenas para ambientes localizados na Europa. Pode ser particularmente enganoso para outras partes do mundo, como no Médio Oriente, Extremo Oriente e América Central.

O procedimento envolve as seguintes etapas:

- Determinação do **Fator de Resistência à Corrosão (CRF)** para o ambiente (Tabela 3.3);
- Determinação da **Classe de Resistência à Corrosão (CRC)** a partir do CRF (Tabela 3.4).

A Tabela 3.5 lista as classes para cada CRC. A escolha de uma classe específica dentro de uma CRC dependerá de outros fatores para além da resistência à corrosão, tal como a resistência de cálculo e disponibilidade do produto requerida. A especificação do material pela CRC e resistência de cálculo, isto é, CRC II e  $f_y = 450 \text{ N/mm}^2$ , é suficiente para permitir que o fornecedor determine o grau real da CRC.

O procedimento aplica-se a componentes expostos em ambientes externos. Para componentes em ambientes internos controlados, a CRF é 1,0. Um ambiente interno controlado é aquele em que é ou ar-condicionado, aquecido ou contido dentro de portas fechadas. Parques de estacionamento de vários andares, plataformas de carga ou outras estruturas com grandes aberturas devem ser considerados como ambientes externos. As piscinas interiores são casos especiais de ambientes internos (Secção 3.5.3).

A CRF depende da severidade do ambiente e é calculado da seguinte forma:

$$\text{CRF} = F_1 + F_2 + F_3$$

Onde

$F_1$  = Risco de exposição a cloretos de água salgada ou sais de degelo;

$F_2$  = Risco de exposição ao dióxido de enxofre;

$F_3$  = Regime de limpeza ou exposição à limpeza pela chuva.

O valor de  $F_1$  para aplicações na zona litoral depende da localização particular na Europa e é derivado da experiência com outras estruturas existentes, de dados de testes de corrosão e de dados de distribuição de cloretos. Dada a vasta gama de ambientes na Europa, em alguns casos, a CRF é calculada de forma conservativa.

Os Anexos Nacionais podem especificar um valor para CRF menos severo, que pode ser escolhido quando a experiência de operação local é validada ou quando os dados de teste apoiam tal escolha. O Anexo Nacional do Reino Unido permite o uso de um CRF menos severo quando a experiência operacional local, de pelo menos 5 anos de duração, demonstra a adequação de um grau adjacente inferior da CRF. Contudo, o valor máximo permitido para o CRF é de +5. Os dados de desempenho devem ser obtidos a partir de uma localização a menos de 5 km do local proposto e, para locais costeiros, a menos de 1 km. A avaliação do desempenho deve considerar a classe do material, a qualidade do acabamento superficial, a orientação dos componentes e a exposição a contaminantes aéreos (particularmente cloretos), do modo a garantir que estes sejam comparáveis ao projeto proposto.

Diferentes partes da mesma estrutura podem ter diferentes condições de exposição: uma parte pode estar totalmente exposta e outra parte completamente protegida. Cada caso de exposição deve ser avaliado separadamente.

O procedimento pressupõe que os requisitos da norma EN 1090-2 são seguidos em relação aos procedimentos de soldadura e limpeza pós-soldadura, e remoção e limpeza das superfícies contaminadas do aço inoxidável após corte térmico ou mecânico. Se não se fizer tal procedimento, poder-se-á reduzir a resistência à corrosão das peças soldadas.

### 3.5.3 Ambientes de piscinas

Em ambientes de piscinas interiores, para evitar o risco de fissuração por corrosão sob tensão (SCC), apenas devem ser usadas as classes de aço indicadas na Tabela 3.6 para peças de suporte.

Tabela 3.3 Determinação do fator de resistência à corrosão CRF

$$CRF = F_1 + F_2 + F_3$$

| <b>F<sub>1</sub> Risco de exposição a cloretos de água salgada ou sais de degelo</b>   |   |  |
|--|---|--|
| NOTA: M é a distância ao mar e S é a distância das estradas com sais do degelo.  |   |  |
| 1  | Ambiente controlado internamente                                |  |
| 0  | Baixo risco de exposição  | M > 10 km ou S > 0,1 km  |
| -3   | Médio risco de exposição  | 1 km < M ≤ 10 km ou 0,01 km < S ≤ 0,1 km   |
| -7   | Alto risco de exposição   | 0,25 km < M ≤ 1 km ou S ≤ 0,01 km  |
| -10  | Muito alto risco de exposição                                   | Túneis rodoviários onde são utilizados sais de degelo ou túneis rodoviários onde os veículos podem transportar sais de degelo  |
| -10  | Muito alto risco de exposição                                   | M ≤ 0,25 km  |
|  |   | Mar do Norte da Alemanha e todas as zonas costeiras do Báltico   |
| -15  | Muito alto risco de exposição                                   | M ≤ 0,25 km  |
|  |   | Costa Atlântica de Portugal, Espanha e França.<br>Canal da Mancha e Litoral do Mar do Norte do Reino Unido, França, Bélgica, Países Baixos e Sul da Suécia.<br>Todas as outras zonas costeiras do Reino Unido, Noruega, Dinamarca e Irlanda.<br>Costa Mediterrânea |
| <b>F<sub>2</sub> Risco de exposição ao dióxido de enxofre</b>  |   |  |
| NOTA: Para ambientes costeiros europeus, a concentração de dióxido de enxofre é geralmente baixa. Para ambientes interiores a concentração de dióxido de enxofre é baixa ou média. É incomum associar uma classificação elevada a locais industriais particularmente pesados ou ambientes específicos, como túneis rodoviários. A concentração de dióxido de enxofre pode ser avaliada de acordo com o método da norma ISO 9225.   |   |  |
| 0  | Baixo risco de exposição  | <10 µg/m <sup>3</sup> , concentração média de gases  |
| -5   | Médio risco de exposição  | 10 - 90 µg/m <sup>3</sup> , concentração média de gases  |
| -10  | Alto risco de exposição   | 90 - 250 µg/m <sup>3</sup> , concentração média de gases   |
| <b>F<sub>3</sub> Regime de limpeza ou exposição à limpeza pela chuva (se F<sub>1</sub> + F<sub>2</sub> ≥ 0, então F<sub>3</sub>=0)</b>   |   |  |
| 0  | Totalmente exposto à limpeza pela chuva                         |  |
| -2   | Regime de limpeza especificado                                  |  |
| -7   | Sem limpeza pela chuva ou nenhum regime de limpeza especificada |  |
| NOTA: se o componente é regularmente inspecionado para detetar sinais de corrosão e de seguida limpo, isso deve ser dito por escrito ao utilizador. A inspeção, método de limpeza e frequência devem ser especificados. Com quanto mais frequência a limpeza for realizada, maior será o benefício. A frequência não deve ser inferior a cada 3 meses. Quando a limpeza é especificada, deve aplicar-se a todas as partes da estrutura, e não apenas aquelas facilmente acessíveis e visíveis. |   |  |

Tabela 3.4 Determinação da Classe de Resistência à Corrosão CRC

| Fator de Resistência à Corrosão (CRF) | Classe de Resistência à Corrosão (CRC) |
|---------------------------------------|--|
| CRF = 1                               | I                                      |
| $0 \geq \text{CRF} > -7$              | II                                     |
| $-7 \geq \text{CRF} > -15$            | III                                    |
| $-15 \geq \text{CRF} \geq -20$        | IV                                     |
| CRF < -20                             | V                                      |

Tabela 3.5 Graus em cada Classe de Resistência à Corrosão CRC

| Classe de resistência à corrosão CRC |        |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| I                                    | II     | III    | IV     | V      |
| 1.4003                               | 1.4301 | 1.4401 | 1.4439 | 1.4565 |
| 1.4016                               | 1.4307 | 1.4404 | 1.4462 | 1.4529 |
| 1.4512                               | 1.4311 | 1.4435 | 1.4539 | 1.4547 |
|                                      | 1.4541 | 1.4571 |        | 1.4410 |
|                                      | 1.4318 | 1.4429 |        | 1.4501 |
|                                      | 1.4306 | 1.4432 |        | 1.4507 |
|                                      | 1.4567 | 1.4162 |        |        |
|                                      | 1.4482 | 1.4662 |        |        |
|                                      |        | 1.4362 |        |        |
|                                      |        | 1.4062 |        |        |
|                                      |        | 1.4578 |        |        |

NOTA 1: as Classes Resistentes à Corrosão destinam-se apenas a ser utilizadas com este procedimento de seleção de graus e são adequadas apenas a aplicações estruturais.

NOTA 2: um grau de uma classe mais alta pode ser usado no lugar da classe indicada pela CRF.

Tabela 3.6 Classes de aço para ambientes de piscinas interiores

| Componentes em ambientes de piscinas                           | Classe de resistência à corrosão CRC                            |
|--|---|
| Elementos solicitados que são regularmente limpos <sup>1</sup> | CRC III ou CRC IV<br>(excluindo 1.4162, 1.4662, 1.4362, 1.4062) |
| Elementos solicitados que não são regularmente limpos          | CRC V<br>(excluindo 1.4410, 1.4501 and 1.4507)                  |
| Todos os sistemas de fixação, parafusos e peças roscadas       | CRC V<br>(excluindo 1.4410, 1.4501 and 1.4507)                  |

NOTA 1: caso o componente seja regularmente inspecionado para detetar sinais de corrosão e de seguida limpo, isso deve ser dito por escrito ao utilizador. A inspeção, método de limpeza e frequência devem ser especificados. Com quanto mais frequência a limpeza for realizada, maior será o benefício. A frequência não deve ser inferior a uma semana. Quando a limpeza é especificada, ela deve se aplicar a todas as partes da estrutura, e não apenas aquelas facilmente acessíveis e visíveis.

### 3.5.4 Procedimento para a seleção das classes de aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são apropriados para uso em ambientes moderadamente corrosivos com exposição limitada a poluentes atmosféricos e cloretos. Há um risco de coloração destes aços em muitos ambientes, mas muitas vezes isso é apenas um problema estético que não afeta a integridade da estrutura. A Tabela 3.7 fornece uma orientação conservadora sobre a seleção das classes dos aços inoxidáveis ferríticos.

Tabela 3.7 Seleção da classe para aços inoxidáveis ferríticos

| Seleção da classe para um excelente acabamento final (isto é, sem tolerância de manchas visíveis na superfície exposta)   |   |     |   |  |    |
|---|---|-----|---|--|----|
| Classe  | C1  | C2  | C3  | C4   | C5 |
| 1.4003  | ✓   | ✖   | ✖   | Não é fornecida nenhum tipo de orientação devido à escassez de dados de corrosão |    |
| 1.4509  | ✓   | ✖   | ✖   |  |    |
| 1.4621, 1.4521  | ✓   | ✓   | ✖   |  |    |
| Seleção da classe para tolerância à corrosão estética (isto é, coloração e pequenas picaduras, mas que não afetarão a integridade estrutural do componente)   |   |     |   |  |    |
| Classe  | C1  | C2  | C3  | C4   | C5 |
| 1.4003  | ✓   | (✓) | ✖   | Não é fornecida nenhum tipo de orientação devido à escassez de dados de corrosão |    |
| 1.4509  | ✓   | ✓   | (✓)   |  |    |
| 1.4621, 1.4521  | ✓   | ✓   | ✓   |  |    |
| As categorias de corrosividade são retiradas da EN ISO 12944-2: 2009 e são definidas abaixo:  |   |     |   |  |    |
| Categoria de corrosividade e risco  | Exemplos de ambientes típicos em clima temperado  |     |   |  |    |
|   | Exterior  |     | Interior  |  |    |
| C1<br>Muito baixo   |   |     | Edifícios aquecidos com atmosferas limpas, por exemplo, escritórios, lojas, escolas, hotéis                                       |  |    |
| C2<br>baixo   | Atmosferas com baixo nível de poluição. Principalmente áreas rurais   |     | Edifícios não aquecidos onde pode ocorrer condensação, por exemplo: u armazéns, pavilhões desportivos                             |  |    |
| C3<br>médio   | Atmosferas urbanas e industriais, poluição moderada de dióxido de enxofre. Área costeira com baixa salinidade       |     | Salas de produção com humidade elevada, por exemplo: fábricas de processamento de alimentos, lavandarias, cervejarias, laticínios |  |    |
| C4<br>alto  | Áreas industriais e áreas costeiras com salinidade moderada   |     | Fábricas de produtos químicos, piscinas, navios e estaleiros  |  |    |
| C5<br>Muito alto  | Áreas industriais com elevada humidade e atmosfera agressiva. Áreas <i>offshore</i> e costeiras com alta salinidade |     | Edifícios ou áreas com condensação quase permanente e elevada poluição  |  |    |
| Notas   |   |     |   |  |    |
| ✓ Indica que o grau é apropriado para a classificação ambiental.  |   |     |   |  |    |
| ✖ Indica que o grau é inadequado para o ambiente de serviço.  |   |     |   |  |    |
| (✓) Indica que é necessária cautela para estas combinações de classe e ambiente. Existe o risco de manchas e corrosão localizada em soldaduras e nos sistemas de fixação expostos. Este risco é maior quando se acumulam águas estagnadas e/ou poluentes atmosféricos (particularmente cloretos). |   |     |   |  |    |
| 1. A classificação C1 pressupõe que a condição de serviço é num ambiente interno sem exposição direta ao meio ambiente ou a cloretos. Isso inclui áreas de edifícios como telhados, paredes de perímetro e aço atrás do revestimento.   |   |     |   |  |    |
| 2. Soldaduras e sistemas de fixação mecânicos produzem fendas que podem ser mais suscetíveis à corrosão em painéis expostos. Este risco é tanto maior quando as superfícies permitem a acumulação de água ou de poluentes atmosféricos.   |   |     |   |  |    |
| 3. A classificação ISO considera os cloretos soprados pelo vento do mar, mas não os que são provenientes das estradas devido aos sais de degelo. O utilizador deve ter isso em consideração caso a estrutura esteja próxima de estradas em que são utilizados sais de degelo.                     |   |     |   |  |    |

## 4 BASES PARA O PROJETO

### 4.1 Requisitos gerais

Uma estrutura deve ser dimensionada e fabricada de modo a:

- Permanecer em serviço durante a vida útil da estrutura;
- Resistir às ações que podem surgir durante a construção, instalação e uso da estrutura;
- Resistir a dano localizado na eventualidade de cargas acidentais;
- Possuir uma durabilidade adequada para os custos de manutenção;

Os requisitos acima referidos podem ser satisfeitos através da utilização de materiais adequados, um dimensionamento rigoroso e detalhado e através da especificação dos procedimentos de controlo da qualidade para a construção e manutenção.

As estruturas devem ser dimensionadas considerando todos os estados limites

### 4.2 Verificação da segurança aos estados limites

Estados limites são condições que, quando excedidas, tornam a estrutura incapaz de cumprir os requisitos de dimensionamento. Consideram-se aqui três estados limites: Estados limites últimos, Estados limites de serviço e Estados limites de durabilidade. Os Estados limites últimos se excedidos, podem levar ao colapso de parte ou da totalidade da estrutura, pondo em risco a segurança das pessoas. Os estados limites de serviço correspondem a estados para além dos quais os critérios de serviço especificados deixam de ser cumpridos. Os estados limites de durabilidade podem ser vistos como subconjuntos dos estados limites últimos e de serviço dependendo se, por exemplo, os efeitos da corrosão afeta a resistência da estrutura ou a sua aparência estética.

Para os Estados limites últimos, tem que se ser verificado o seguinte critério:

$$E_d \leq R_d \quad (4.1)$$

onde:

$E_d$  é o valor de cálculo do efeito das ações;

$R_d$  é o correspondente valor de cálculo da resistência.

O valor de cálculo da resistência,  $R_d$ , é geralmente dado por  $R_k/\gamma_M$ , onde  $R_k$  é o valor característico da resistência e  $\gamma_M$  é um fator parcial, que pode tomar vários valores. Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores para  $\gamma_M$  utilizados ao longo deste manual (estes valores foram retirados da EN 1993-1-4 e EN 1993-1-8). Os valores para  $\gamma_M$  devem ser usados para o aço inoxidável em regras de dimensionamento apresentadas noutras partes da EN 1993, por exemplo pontes (EN 1993-2), torres, postes e chaminés (EN 1993-3).

Os Anexos Nacionais da EN 1993-1-4 e a outras partes relevantes da EN 1993 relativas ao País para o qual a estrutura está a ser dimensionada, podem recomendar valores diferentes de  $\gamma_M$  dos fornecidos pela Tabela 4.1 e que devem ser tidos em consideração. O Anexo Nacional do Reino Unido para a EN 1993-1-4 e EN 1993-1-8 adota os valores recomendados da Tabela 4.1 (no caso de não existir Anexo Nacional, os fatores de  $\gamma_M$  devem ser acordados com as entidades reguladoras relevantes).

Como alternativa, a resistência pode ser demonstrada através de testes nos materiais, componentes e estruturas (para orientação ver Secção 10).

Tabela 4.1 Valores recomendados para  $\gamma_M$

| Para a resistência de:  | Símbolo       | Valor<br>(EN 1993-1-4) |
|---|---------------|------------------------|
| Secções (independentemente da classe)   | $\gamma_{M0}$ | 1,10                   |
| Instabilidade de elementos, avaliada através de verificações individuais de cada elemento | $\gamma_{M1}$ | 1,10                   |
| Resistência à rotura de secções transversais tracionadas                                  | $\gamma_{M2}$ | 1,25                   |
| Parafusos, soldaduras, pinos e chapas ao esmagamento                                      | $\gamma_{M2}$ | 1,25                   |

Para classes de aços inoxidáveis não especificados na Tabela 2.1 da EN1993-1-4, os valores de  $\gamma_M$  devem ser aumentados em 10%.

### 4.3 Carregamento

As cargas a serem consideradas em estruturas de aço inox devem ser determinadas de acordo com a EN 1991 do mesmo modo que para as estruturas em aço carbono.

## 5 RESISTÊNCIA DAS SECÇÕES TRANSVERSAIS

### 5.1 Introdução

As recomendações das Secções 5 e 6 aplicam-se às secções transversais de elementos que cumpram os limites dimensionais da Secção 5.2

As relações entre a largura e a espessura de elementos da secção transversal que estão parcialmente ou totalmente comprimidos, determinam se estão sujeitas a encurvadura local, com conseqüente redução da resistência da secção transversal. Os elementos e secções transversais são classificados como Classe 1, 2, 3 ou 4, dependendo da suscetibilidade à encurvadura local e da sua capacidade de rotação (Classe 1 e 2), ver Secção 5.3.

A resistência reduzida das secções transversais da Classe 4 pode ser permitida na conceção através da utilização de larguras efetivas de elementos, ver Secção 5.4.1.

As dimensões medidas a partir da linha média só podem ser usadas para calcular as propriedades de secção de elementos enformados a frio e chapas. Para outras secções, devem ser utilizadas as dimensões totais. A EN 1993-1-3 e EN 1993-1-5 permitem que as dimensões da linha média sejam utilizadas no cálculo das resistências. A EN 1993-1-1 permite também a utilização de dimensões da linha média no cálculo das resistências em certos casos (ver 6.2.1 (9), mas também 6.2.5 (2) da EN 1993-1-1).

### 5.2 Relação largura/ espessura máxima

A Tabela 5.1 apresenta a relação largura/espessura máxima para elementos de aço inoxidável.

### 5.3 Classificação de secções transversais

#### 5.3.1 Generalidades

Por princípio, as secções transversais de aço inoxidável podem ser classificadas da mesma forma que as de aço carbono. São definidas quatro classes de secção transversal como segue:

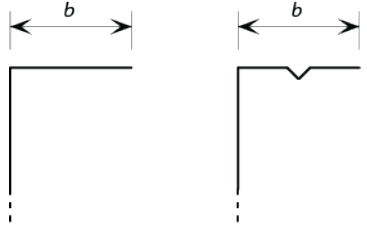
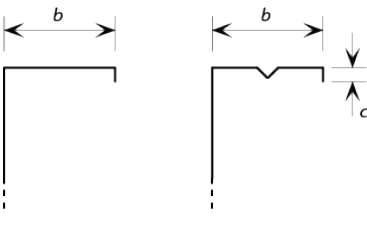
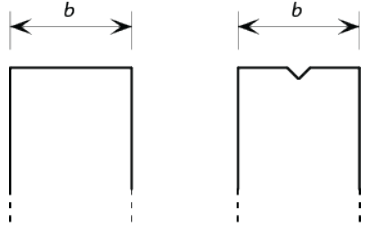
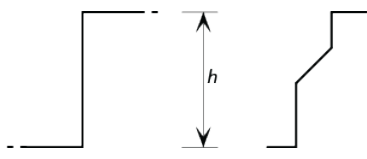
- |          |  |
|----------|--|
| Classe 1 | secções em que se pode formar uma rótula plástica com a capacidade de rotação requerida para análises plásticas.   |
| Classe 2 | secções em que se pode desenvolver o seu momento plástico resistente, mas têm capacidade de rotação limitada pela encurvadura local.   |
| Classe 3 | secções em que a tensão calculada na fibra de compressão extrema do elemento de aço pode atingir a sua tensão de cedência, mas a encurvadura local é suscetível de impedir o desenvolvimento do momento plástico resistente. |



Classe 4 secções em que a encurvadura local ocorrerá antes de atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

A classificação de uma secção transversal depende da classe mais elevada (menos favorável) das suas partes constituintes que estão parcialmente ou totalmente comprimidas. Deve notar-se que a classificação da secção transversal depende da proporção de momento ou carga axial presente e, assim, pode variar ao longo do comprimento de um elemento.

Tabela 5.1 Relação largura-espessura máxima

|  |                                |   |
|--|--------------------------------|---|
| <p>a) Elemento plano ou elemento intermédio reforçado ligado a uma alma ao longo de uma aresta com a outra aresta sem suporte:</p>   | $b/t \leq 50$                  |    |
| <p>b) Elemento plano ou elemento intermédio reforçado ligado a uma alma ao longo de uma aresta e provido de uma pequena aba simples ao longo da outra aresta.</p>  | $b/t \leq 60$<br>$c/t \leq 50$ |   |
| <p>c) Elemento plano ou elemento intermédio reforçado ligado ao longo de ambas as arestas a almas ou banzos:</p>   | $b/t \leq 400$                 |  |
|  | $h/t \leq 400$                 |  |
| <p>Nota: Os elementos planos suportados como em a) com relações <math>b/t</math> superiores a aproximadamente 30 e elementos planos suportados de outra forma com relações <math>b/t</math> superiores a aproximadamente 75 são suscetíveis de desenvolver distorção visual para estados limites de serviço.</p> |                                |   |

### 5.3.2 Limites de classificação para partes de secções transversais

As secções são classificadas como Classe 1, 2 ou 3 dependendo dos limites estabelecidos na Tabela 5.2. As secções que não satisfazem os critérios para as secções da Classe 3 são classificadas como Classe 4.

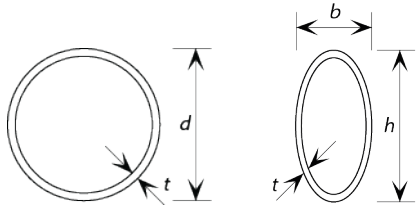
Tabela 5.2 Relação largura/espessura máxima para peças em compressão

| Partes internas comprimidas  |                            |                               |  |        |
|--|----------------------------|-------------------------------|--|--------|
|  |                            |                               |  |        |
| Classe   | Elemento sujeito a flexão  | Elemento sujeito a compressão | Elemento sujeito a flexão e esforço axial  |        |
| 1  | $c/t \leq 72,0\epsilon$    | $c/t \leq 33,0\epsilon$       | quando $\alpha > 0,5$ :<br>$c/t \leq 396,0\epsilon/(13\alpha - 1)$<br>quando $\alpha \leq 0,5$ :<br>$c/t \leq 36,0\epsilon/\alpha$ |        |
| 2  | $c/t \leq 76,0\epsilon$    | $c/t \leq 35,0\epsilon$       | quando $\alpha > 0,5$ :<br>$c/t \leq 420,0\epsilon/(13\alpha - 1)$<br>quando $\alpha \leq 0,5$ :<br>$c/t \leq 38,0\epsilon/\alpha$ |        |
| 3  | $c/t \leq 90,0\epsilon$    | $c/t \leq 37,0\epsilon$       | $c/t \leq 18,5\epsilon\sqrt{k_\sigma}$<br>para $k_\sigma$ ver 4.4.1  |        |
| $\epsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$   | Classe                     | 1.4301                        | 1.4401   | 1.4462 |
|  | $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 210                           | 220  | 460    |
|  | $\epsilon$                 | 1,03                          | 1,01   | 0,698  |
| <p>Notas:</p> <p>Para secções ocas, <math>c</math> pode ser obtido por <math>(h - 3t)</math> or <math>(b - 3t)</math></p> <p><math>E = 200 \times 10^3</math> N/mm<sup>2</sup></p> <p><math>\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)</math> para secções que são simétricas em relação ao eixo de maior inércia</p> |                            |                               |  |        |

Tabela 5.2 Relação largura/espessura máxima para peças em compressão  
( continuação)

| Banzos salientes  |  |   |  |  |
|---|--|---|--|--|
|   |  | Distribuição de tensões (compressão + ve)<br>ponta em compressão      ponta em tração<br> |  |  |
| Classe  | Tipo de secção   | Elemento sujeito a compressão   | Elemento sujeito a flexão e esforço axial                              |  |
|   |  |   | Extremidade em compressão  | Extremidade em tração                                  |
| 1   | Enformados a frio e soldados   | $c/t \leq 9,0\varepsilon$   | $c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$                                 | $c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$    |
| 2   | Enformados a frio e soldados   | $c/t \leq 10,0\varepsilon$  | $c/t \leq \frac{10,0\varepsilon}{\alpha}$                              | $c/t \leq \frac{10,0\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ |
| 3   | Enformados a frio e soldados   | $c/t \leq 14,0\varepsilon$  | $c/t \leq 21,0\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$<br>Para $k_\sigma$ ver 5.4.1 |  |
| Cantoneiras<br>Refere-se também a banzos salientes<br>Não se aplica a cantoneiras em contacto contínuo com outros elementos.  |  |   |  |  |
| Classe  | Secção em compressão   |   |  |  |
| 3   | $\frac{h}{t} \leq 15,0\varepsilon ; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$ |   |  |  |
| $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$   | Classe   | 1.4301  | 1.4401   | 1.4462   |
|   | $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )   | 210   | 220  | 460  |
|   | $\varepsilon$  | 1,03  | 1,01   | 0,698  |
| Notas:<br>Para secções U enformadas a frio, uma abordagem menos conservadora consiste em assumir $c = b_p$ , onde $b_p$ é a distância desde a extremidade do banzo ao centro do raio de canto (veja-se Figura 5.5)<br>$E = 200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$<br>$\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)$ para secções que são simétricas em relação ao eixo de maior inércia |  |   |  |  |

**Tabela 5.2** Relação largura-espessura máxima para elementos comprimidos (continuação)

| Secções tubulares   |   |        |  |        |
|---|---|--------|--|--------|
|   |   |        |  |        |
| Classe  | Secções em flexão   |        | Secções em compressão  |        |
| 1   | $d_e/t \leq 50\varepsilon^2$  |        | $d_e/t \leq 50\varepsilon^2$   |        |
| 2   | $d_e/t \leq 70\varepsilon^2$  |        | $d_e/t \leq 70\varepsilon^2$   |        |
| 3   | $d_e/t \leq 280\varepsilon^2$<br>Para $d_e > 240$ mm e/ou<br>$d_e/t > 280\varepsilon^2$ , ver EN 1993-1-6 |        | $d_e/t \leq 90\varepsilon^2$<br>Para $d_e/t > 90\varepsilon^2$ , ver EN 1993-1-6 |        |
| $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$   | Classe  | 1.4301 | 1.4401   | 1.4462 |
|   | $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )  | 210    | 220  | 460    |
|   | $\varepsilon$   | 1,03   | 1,01   | 0,698  |
| <p>Notas:</p> <p><math>E = 200 \times 10^3</math> N/mm<sup>2</sup></p> <p><math>d_e</math> é o diâmetro equivalente. Para secções circulares tubulares (CHS) <math>d_e = d</math>.</p> <p>Para secções tubulares elípticas (EHS), <math>d_e</math> varia com a forma de carregamento:</p> <p>Em EHS em compressão:</p> $d_e = h \left[ 1 + \left\{ 1 - 2,3 \left( \frac{t}{h} \right)^{0,6} \right\} \left( \frac{h}{b} - 1 \right) \right] \quad \text{ou, conservativamente} \quad d_e = \frac{h^2}{b}$ <p>Para EHS em flexão em torno do eixo principal de maior inércia (y-y):</p> <p>Quando <math>\frac{h}{b} \leq 1,36</math> <math>d_e = \frac{b^2}{h}</math></p> <p>Quando <math>\frac{h}{b} &gt; 1,36</math> <math>d_e = 0,4 \frac{h^2}{b}</math></p> <p>Para EHS em flexão em torno do eixo principal de menor inércia (z-z) ou compressão e flexão em torno do eixo principal menor inércia: <math>d_e = \frac{h^2}{b}</math></p> <p>Para EHS em compressão e flexão em torno do eixo principal de maior inércia (y-y), <math>d_e</math> pode ser determinado por interpolação linear entre o diâmetro equivalente para compressão e o de flexão, baseado em <math>\alpha</math> para secções transversais de Classe 1 e 2 e em <math>\psi</math> para secções transversais de Classe 3 e 4.</p> |   |        |  |        |

## 5.4 Larguras efetivas

### 5.4.1 Larguras efetivas de elementos em secções transversais de Classe 4

As propriedades das secções transversais da Classe 4 podem ser estabelecidas por cálculo, utilizando as larguras efetivas das partes dos componentes em compressão total ou parcial. Alternativamente, podem ser obtidas experimentalmente. Ver a Secção 10.

A área efetiva de uma secção transversal de Classe 4 em compressão total ou parcial,  $A_{\text{eff}}$  é a área bruta da secção transversal reduzida da soma das áreas não eficazes de cada elemento esbelto que compõe a secção transversal. A área efetiva de cada elemento de Classe 4 é a largura efetiva  $b_{\text{eff}}$  (calculado na Tabela 5.3 e Tabela 5.4) multiplicado pela espessura do elemento. Quando a secção transversal está sujeita a flexão, também são calculados o momento de inércia efetivo  $I_{\text{eff}}$  e módulo de secção efetivo  $W_{\text{eff}}$ .

As larguras efetivas de elementos em compressão total ou parcial podem ser obtidas da Tabela 5.3 para elementos internos, e da Tabela 5.4 para elementos salientes.

As larguras efetivas dos elementos de banzo em compressão podem ser baseadas na relação de tensões  $\psi$  determinada para a secção transversal bruta ( $\psi$  é definido na Tabela 5.3 e Tabela 5.4). A largura efetiva da alma deve basear-se na relação de tensão  $\psi$  determinada para a secção transversal que compreende a área efetiva do banzo em compressão, mas considerando a área bruta da alma e banzo tracionado.

O fator de redução  $\rho$  pode ser calculado da seguinte forma:

Partes internas comprimidas (enformados a frio ou soldados):

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{mas } \leq 1,0 \quad (5.1)$$

Partes salientes comprimidas (enformados a frio ou soldados):

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{mas } \leq 1,0 \quad (5.2)$$

onde  $\bar{\lambda}_p$  é a esbelteza do elemento definido como:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (5.3)$$

onde:

$t$  é a espessura relevante.

$k_\sigma$  é o fator de encurvadura correspondente à relação entre tensões  $\psi$  da Tabela 5.3 ou Tabela 5.4, conforme apropriado.

$\bar{b}$  é a largura relevante como segue:

$\bar{b} = d$  para almas, exceto para secções retangulares ocas (RHS);

$\bar{b} =$  largura do elemento plano para almas de RHS, que pode ser assumido como  $h - 3t$ ;

$\bar{b} = b$  para elementos internos de banzo (exceto RHS);

$\bar{b} =$  largura do elemento plano para banzos de RHS, que pode ser tomado como  $b - 3t$ ;

$\bar{b} = c$  para banzos salientes;

$\bar{b} = h$  para cantoneiras de lados iguais e cantoneiras de lados desiguais;

$\epsilon$  é o fator de material definido na Tabela 5.2.

A EN 1993-1-4 indica que  $\bar{b}$  para almas e banzos de RHS pode ser tomado de forma conservativa como  $h - 2t$  e  $b - 2t$ , respetivamente. Na próxima revisão da EN 1993-1-4 é expectável que isto seja alterado para  $h - 3t$  e  $b - 3t$ , de modo a ficar alinhado com a definição presente na EN 1993-1-5.

Para secções abertas enformadas a frio, deve-se definir uma abordagem menos conservativa  $\bar{b} = b_p$ , onde  $b_p$  é a largura plana nominal do elemento plano, medida a partir dos pontos médios dos elementos de canto adjacentes, ver a Figura 5.5.

Geralmente, o eixo neutro da secção efetiva irá deslocar-se uma dimensão  $e$  em relação ao eixo neutro da secção bruta, ver a Figura 5.1 e Figura 5.2. Isso deve ser tido em conta no cálculo das propriedades da secção transversal efetiva.

Quando a secção transversal está sujeita a compressão axial, as recomendações da Secção 6.5.2 têm em conta o momento adicional  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N$ , onde  $e_N$  é a mudança do eixo neutro quando a secção transversal está sujeita a compressão uniforme, ver a Figura 5.2.

Tabela 5.3 Elementos internos comprimidos

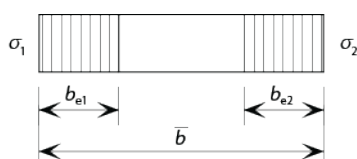
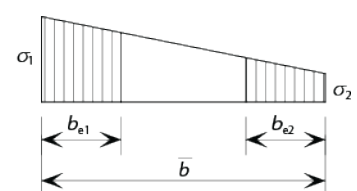
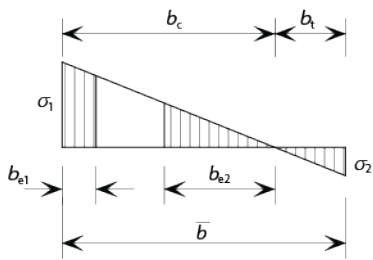
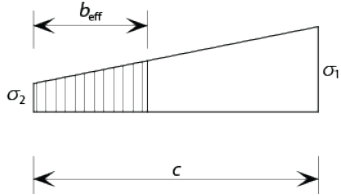
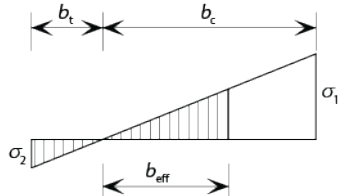
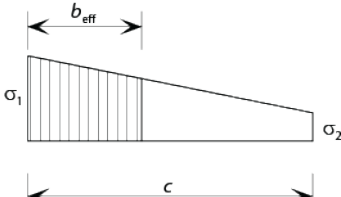
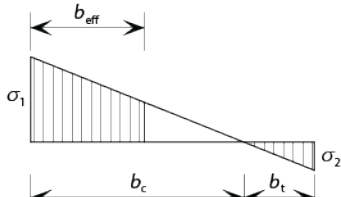
| Distribuição de tensão (compressão positiva)  |     |                       |      | Largura efetiva $b_{eff}$  |      |                     |
|---|-----|-----------------------|------|--|------|---------------------|
|   |     |                       |      | $\psi = 1:$<br>$b_{eff} = \rho \bar{b}$<br>$b_{e1} = 0,5 b_{eff}$<br>$b_{e2} = 0,5 b_{eff}$                            |      |                     |
|  |     |                       |      | $1 > \psi \geq 0:$<br>$b_{eff} = \rho \bar{b}$<br>$b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$<br>$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$ |      |                     |
|  |     |                       |      | $\psi < 0:$<br>$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$<br>$b_{e1} = 0,4 b_{eff}$<br>$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$    |      |                     |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$  | 1   | $1 > \psi > 0$        | 0    | $0 > \psi > -1$  | -1   | $-1 > \psi \geq -3$ |
| fator de encurvadura $k_\sigma$   | 4,0 | $8,2 / (1,05 + \psi)$ | 7,81 | $7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$   | 23,9 | $5,98 (1 - \psi)^2$ |

Tabela 5.4 Elementos salientes comprimidos

| Distribuição de tensão (compressão positiva)  |      |                         | Largura efetiva $b_{eff}$                                 |                                |      |
|---|------|-------------------------|---|--------------------------------|------|
|    |      |                         | $1 > \psi \geq 0:$<br>$b_{eff} = \rho c$                  |                                |      |
|    |      |                         | $\psi < 0:$<br>$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$ |                                |      |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$  | 1    | 0                       | -1  | $+1 \geq \psi \geq -3$         |      |
| Fator de encurvadura $k_\sigma$   | 0,43 | 0,57                    | 0,85  | $0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$ |      |
|  |      |                         | $1 > \psi \geq 0:$<br>$b_{eff} = \rho b_c$                |                                |      |
|  |      |                         | $\psi < 0:$<br>$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$ |                                |      |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$  | 1    | $1 > \psi > 0$          | 0   | $0 > \psi > -1$                | -1   |
| Fator de encurvadura $k_\sigma$   | 0,43 | $0,578 / (\psi + 0,34)$ | 1,70  | $1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$     | 23,8 |

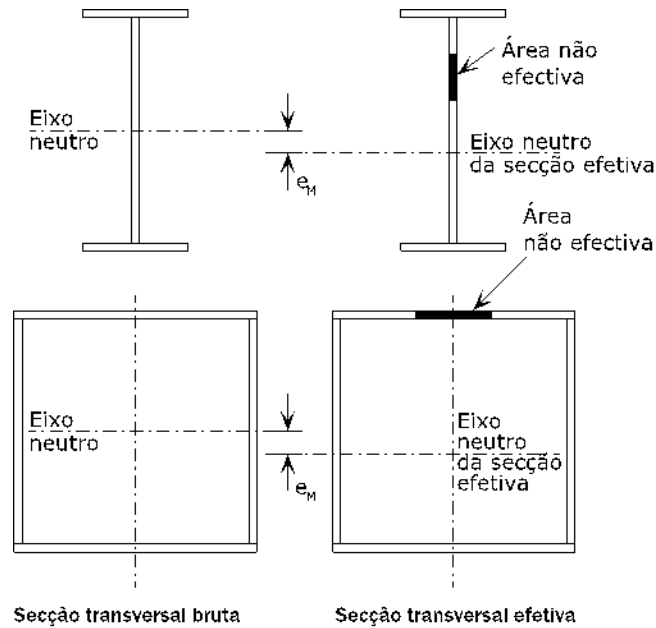


Figura 5.1 Seção transversal de classe 4 sujeita a momento fletor

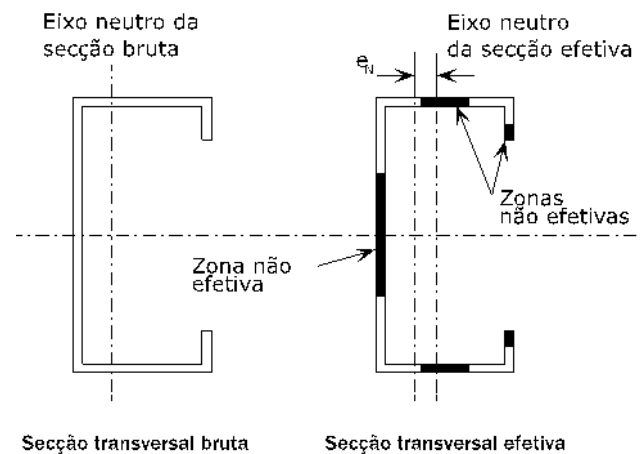


Figura 5.2 Seção transversal de classe 4 sujeita a compressão

#### 5.4.2 Efeitos de *shear lag*

O *shear lag* em banzos pode ser desprezado se  $b_0 < L_e / 50$ , onde  $b_0$  é considerado igual ao banzo saliente ou metade da largura de um elemento interno e  $L_e$  é o comprimento entre os pontos de momento de flexão nulos. Quando este limite  $b_0$  for excedido, devem ser considerados os efeitos de *shear lag* em banzos, e aplica-se a metodologia para aço carbono presente na EN 1993-1-5. Note-se que a EN 1993-1-5 exige que o *shear lag* seja tido em conta tanto no estado limite último como no estado limite de utilização.

#### 5.4.3 Enrugamento de banzos

A menos que a curvatura seja inferior a 5% da profundidade da seção transversal do perfil, deve ser considerado o efeito de resistência última ao carregamento de banzos (i.e. curvatura para dentro em relação ao plano neutro) de um banzo muito largo de um perfil sujeito a flexão, ou de um banzo num perfil em arco sujeito a flexão no qual o lado concavo está comprimido. Se a curvatura for maior, então também deverá ser tido em conta a redução na resistência, por exemplo devido a uma



diminuição no comprimento do braço para as partes dos banzos largos, e o possível efeito da encurvadura das almas.

As relações de largura-espessura dos banzos em vigas típicas de aço inoxidável são improváveis de serem suscetíveis ao enrugamento de banzos. Se for caso disso, é aplicável a orientação para o aço carbono apresentada na EN 1993-1-3.

## 5.5 Elementos Reforçados

### 5.5.1 Reforços de bordo

Deve aplicar-se a metodologia para aço carbono da EN 1993-1-3.

### 5.5.2 Reforços intermédios

Deve aplicar-se a metodologia para aço carbono da EN 1993-1-3.

### 5.5.3 Chapas com secção trapezoidal com reforços de banzo intermédios

A secção efetiva de um banzo com reforços intermédios e sujeita a compressão uniforme deve ser considerada como sendo as áreas efetivas reduzidas  $A_{s,red}$  incluindo duas bandas de largura  $0,5b_{eff}$  ou  $15t$  adjacentes ao reforço, ver a Figura 5.3 e a Figura 5.4.

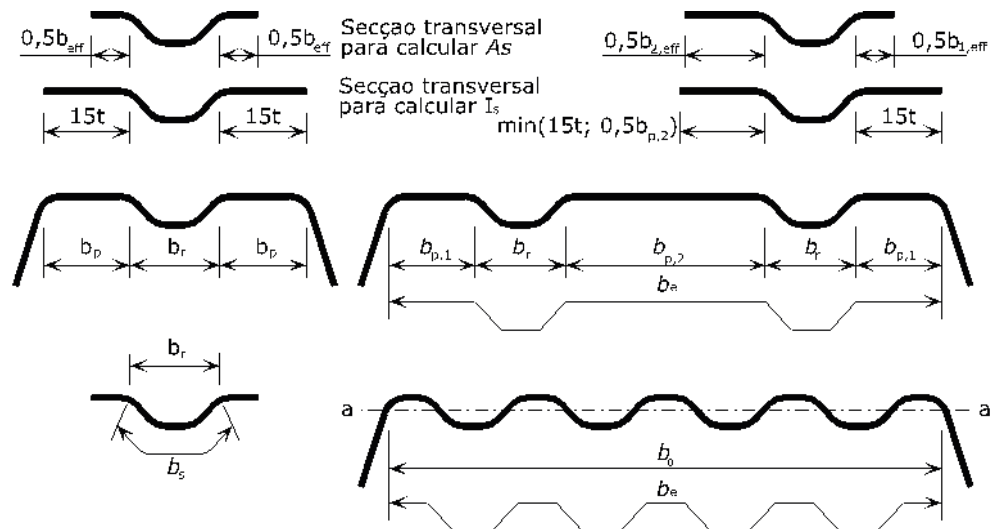


Figura 5.3 Banzo comprimido com um, dois ou múltiplos reforços

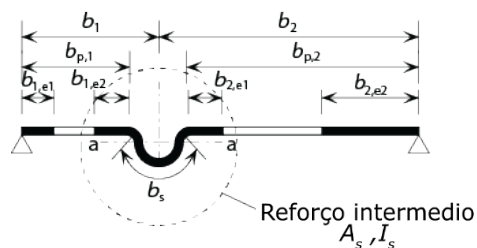


Figura 5.4 Reforço intermédio

Para um reforço de banzo central, a tensão crítica elástica de encurvadura  $\sigma_{cr,s}$  (utilizada para determinar  $\bar{\lambda}_d$ ) deve ser obtida a partir de:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} \quad (5.4)$$

onde:

$b_p$  é a largura plana nominal do elemento plano;

$b_s$  é a largura do reforço, medido em torno do perímetro do reforço;

$A_s$  é a área da secção transversal do reforço;

$I_s$  é momento de inércia da secção transversal do reforço;

Estes parâmetros são definidos na Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5.

$k_w$  é o fator que permite restrição parcial da rotação do banzo reforçado pelas almas de outro elemento adjacente, ver abaixo. Para o cálculo da secção transversal efetiva em compressão axial,  $k_w = 1,0$ .

Para dois reforços de banzo colocados simetricamente, a tensão elástica crítica de encurvadura  $\sigma_{cr,s}$  deve ser obtida a partir de:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8b_1^2(3b_e - 4b_1)}} \quad (5.5)$$

em que:

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s \quad (5.6)$$

$$b_1 = b_{p,1} + 0,5b_r \quad (5.7)$$

onde:

$b_{p,1}$  é a largura plana nominal do elemento do plano exterior, ver a Figura 5.4;

$b_{p,2}$  é a largura plana nominal do elemento do plano central, ver a Figura 5.4;

$b_r$  é a largura total do reforço, ver Figura 5.3.

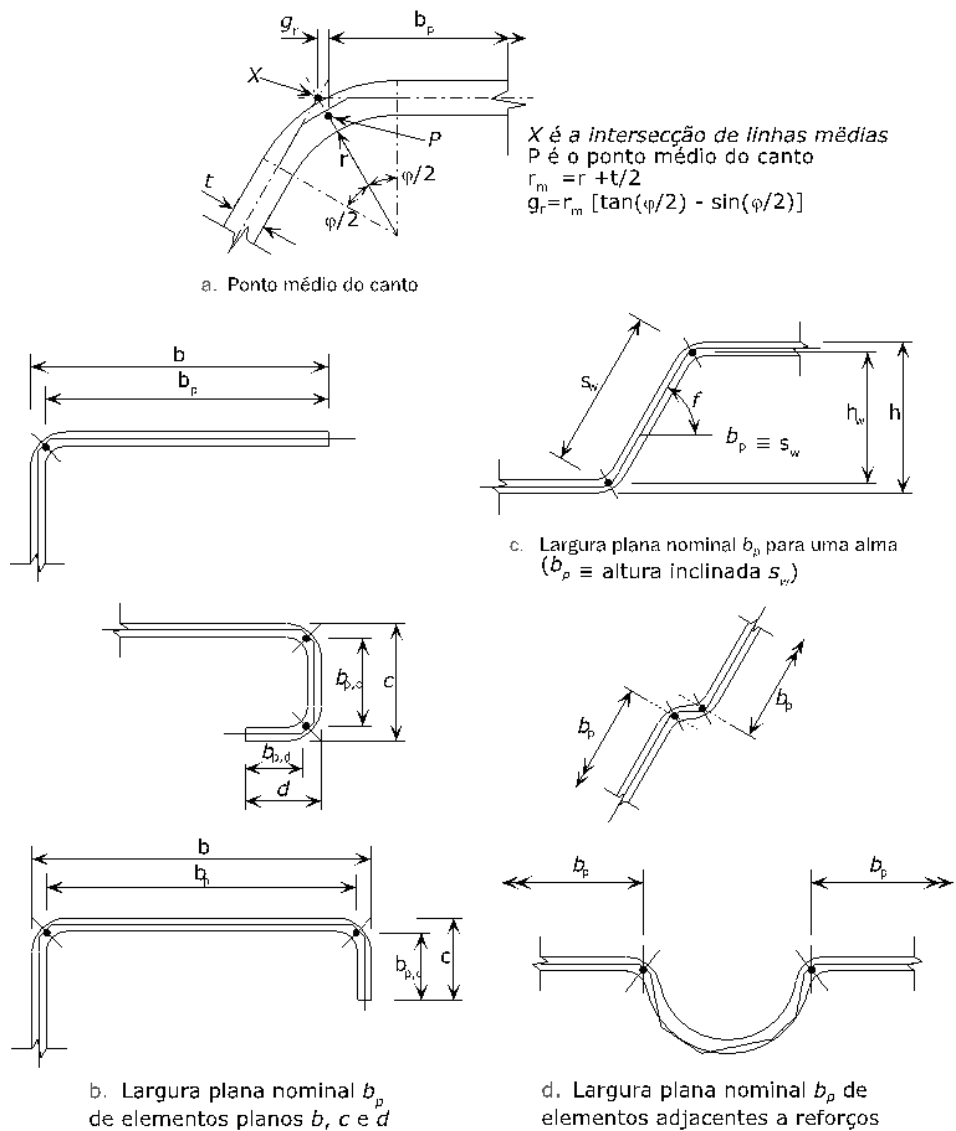
O valor de  $k_w$  pode ser calculado a partir do comprimento de encurvadura do banzo comprimido  $l_b$ :

$$\frac{l_b}{s_w} \geq 2, \quad k_w = k_{w0} \quad (5.8)$$

$$\frac{l_b}{s_w} < 2, \quad k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \left[ \frac{2l_b}{s_w} - \left( \frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right] \quad (5.9)$$

onde:

$s_w$  é a altura inclinada da alma, ver a Figura 5.5.



**Figura 5.5** *Larguras nominais de elementos planos  $b_p$  permitindo raios de canto*

Em alternativa, o fator de restrição à rotação  $k_w$  pode ser conservativamente assumido como 1,0, correspondendo assim a uma condição rotulada.

Os valores de  $l_b$  e  $k_{w0}$  podem ser determinados a partir de:

a) para um banzo em compressão com um reforço intermédio:

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} \quad (5.10)$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} \quad (5.11)$$

$$b_d = 2b_p + b_s \quad (5.12)$$

b) para um banzo em compressão com dois os três reforços intermédios:

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{\frac{I_s b_1^2 (3b_e - 4b_1)}{t^3}} \quad (5.13)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)}} \quad (5.14)$$

A área reduzida efetiva do reforço  $A_{s,red}$ , considerando a encurvadura distorcional deve ser calculada como:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \text{ mas } A_{s,red} \leq A_s \quad (5.15)$$

onde:

$\sigma_{com,Ed}$  é a tensão de compressão no centro do reforço (calculado a partir da secção efetiva).

Se as almas não forem reforçadas, o fator de redução  $\chi_d$  deve ser obtido como se segue:

$$\bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad \chi_d = 1,0 \quad (5.16)$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d \quad (5.17)$$

$$\bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad (5.18)$$

onde  $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{crs}}$

se as almas também forem reforçadas, deve ser feita referência à EN 1993-1-3.

Na determinação das propriedades da secção efetiva, a área reduzida  $A_{s,red}$  deve ser representada usando uma espessura reduzida  $t_{red} = t (A_{red} / A_s)$  para todos os elementos incluídos em  $A_s$ .

## 5.6 Cálculo das propriedades geométricas da secção

### 5.6.1 Generalidades

O cálculo das propriedades das secções deve ser efetuado em conformidade com as boas práticas, tendo em conta qualquer redução da área bruta devido à encurvadura local ou a furos, conforme necessário.

### 5.6.2 Influência dos cantos arredondados

A influência dos cantos arredondados na resistência da secção transversal pode ser desprezada se o raio interno  $r \leq 5t$  e  $r \leq 0,10b_p$  e se for possível assumir que a secção é constituída por elementos planos com cantos retos. Para o cálculo das propriedades de rigidez de secção transversal, deve sempre ser considerada a influência de cantos arredondados.

A influência dos cantos arredondados sobre as propriedades das secções pode ser tida em consideração com suficiente precisão, reduzindo as propriedades calculadas para uma secção transversal similar com cantos retos (ver Figura 5.6), usando as seguintes aproximações:

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad (5.19)$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad (5.20)$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad (5.21)$$

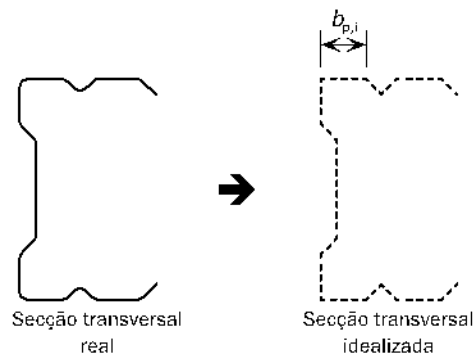
em que:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (5.22)$$

onde:

- $A_g$  é a área bruta da secção transversal;
- $A_{g,sh}$  é o valor de  $A_g$  para uma secção transversal com cantos retos;
- $b_{p,i}$  é a largura plana nominal do elemento plano  $i$  para uma secção transversal com cantos retos;
- $I_g$  é o momento de inércia da secção transversal bruta;
- $I_{g,sh}$  é o valor de  $I_g$  para uma secção transversal com cantos retos;
- $I_w$  é a constante de empenamento da secção transversal bruta;
- $I_{w,sh}$  é o valor de  $I_w$  para uma secção transversal com cantos retos;
- $\varphi_j$  é o ângulo entre dois elementos planos;
- $m$  é o número de elementos planos;
- $n$  é o número de elementos curvos;
- $r_j$  é o raio interno do elemento curvo  $j$ .

As reduções consideradas acima também podem ser aplicadas no cálculo das propriedades de secção efetivas  $A_{eff}$ ,  $I_{y,eff}$ ,  $I_{z,eff}$  and  $I_{w,eff}$ , desde que as larguras planas nominais dos elementos planos sejam medidas até os pontos de intersecção das suas linhas médias.



**Figura 5.6** Aproximações permitidas para cantos arredondados

### 5.6.3 Secção transversal bruta

Ao calcular as propriedades da secção transversal bruta, não é necessário descontar os furos para os elementos de fixação, mas deve ter-se em conta aberturas maiores.

### 5.6.4 Secção útil

A área útil de uma secção ou elemento de uma secção deve ser considerada como a sua área bruta menos as deduções apropriadas para todas as aberturas, incluindo furos para elementos de fixação. Nas deduções dos elementos de fixação, deve ser utilizado o diâmetro nominal do furo.

Desde que os furos dos elementos de fixação não estejam em quincôncio, a área total a ser deduzida deve ser a soma das áreas seccionais dos furos em qualquer secção transversal perpendicular ao eixo do membro (ver o plano de rotura (2) na Figura 5.7).

Quando os orifícios dos elementos de fixação estão em quincôncio, a área total a ser deduzida deve ser a maior de:

- A dedução para furos não dispostos em quincôncio.
- $t \left( nd_0 - \sum \left[ \frac{s^2}{4p} \right] \right)$

onde:

$s$  é o espaçamento dos centros de dois furos consecutivos no alinhamento medidos paralelamente ao eixo do membro;

$p$  é o espaçamento dos centros dos mesmos dois furos medidos perpendicularmente ao eixo do membro;

$t$  é a espessura;

$n$  é o número de furos que se estendem em qualquer linha diagonal ou em ziguezague progressivamente através do membro ou parte do membro, ver Figura 5.7;

$d_0$  é o diâmetro do furo.

Para secções como cantoneiras com furos em ambas as abas, a distância  $p$  deve ser medido ao longo do centro da espessura do material, ver Figura 5.8.

Para cantoneiras conectadas por uma aba, consultar Secção 7.2.

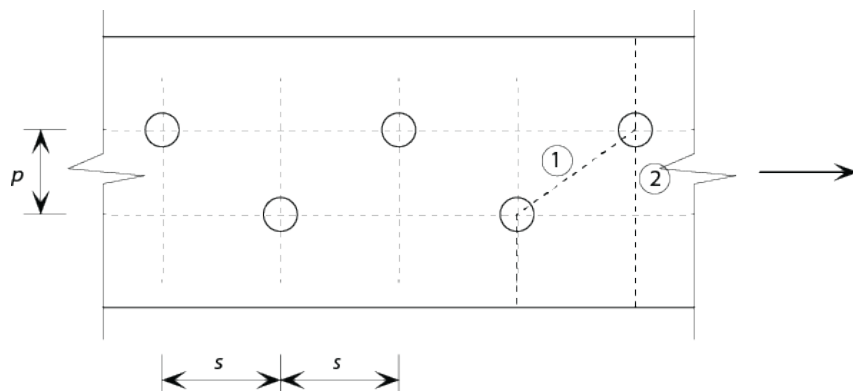


Figura 5.7 Furos em quincôncio e linha crítica de rotura 1 e 2

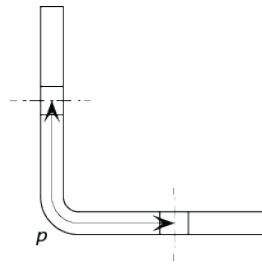


Figura 5.8 Distância  $p$  para cantoneiras com orifícios em ambas as abas

## 5.7 Resistência de secções transversais

### 5.7.1 Generalidades

Esta Secção refere-se apenas à resistência das secções transversais. No entanto, também é necessária a verificação de possíveis modos de encurvadura para determinar a resistência do elemento. A encurvadura dos elementos é abordada na Secção 6. Os fatores  $\gamma_M$  usados nesta Secção estão apresentados na Tabela 4.1.

O endurecimento associado a operações de enformagem a frio durante o fabrico (ver Secção 2.2.1) irá, de um modo geral, aumentar a resistência da secção transversal. As orientações sobre como aproveitar este aumento da resistência são dadas no ANexo B.

O aumento da resistência de secções transversais, devido à influência do endurecimento durante o fabrico, pode ser tido em conta usando o Método de Resistência Contínua, conforme descrito no Anexo D. Em alternativa, o aumento de resistência resultante do endurecimento pode ser comprovado experimentalmente (ver Secção 10).

### 5.7.2 Secções transversais sujeitas a tração

A resistência de secções transversais sujeitas apenas a tensões de tração uniformes,  $N_{t,Rd}$ , pode ser assumida como o menor de:

a) o valor de cálculo do esforço axial plástico resistente da secção transversal bruta.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.23)$$

b) o valor de cálculo do esforço axial resistente último da secção transversal efetiva nos furos para os elementos de ligação.

$$N_{u,Rd} = \frac{k A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.24)$$

onde:

$A_g$  é a área bruta;

$A_{net}$  é a área efetiva da secção transversal (ver Secção 5.6.4);

$f_y$  é o valor característico da tensão de cedência (geralmente assumido como o mínimo especificado de 0,2% da tensão convencional de proporcionalidade, ver a Tabela 2.2);

$f_u$  é o valor característico da resistência última (geralmente considerado como o valor mínimo especificado, ver a Tabela 2.2);

- $k$  é um fator que depende do processo de fabrico dos furos e o modo de carregamento:
- $k = 1,0$  para secções com furos suaves (i.e. furos sem entalhes), por exemplo orifícios fabricados por furação ou corte por jato de água;
  - $k = 0,9$  para secções com furos ásperos (i.e. furos com entalhes), por exemplo furos fabricos por punçoamento ou corte com chama;
  - $k = 0,9$  para estruturas sujeitas a fadiga.

Espera-se que a equação (5.24) seja introduzida na próxima revisão da EN 1993-1-1 para o aço carbono e que seja demonstrado que também se aplica ao aço inoxidável. A EN 1993-1-4 apresenta atualmente a expressão mais conservadora da EN 1993-1-3:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.25)$$

em que

$$k_r = [1 + 3r(d_0/u - 0,3)] \quad (5.26)$$

onde:

$r$  = [número de parafusos na secção transversal] / [número total de parafusos na ligação];

$d_0$  é o diâmetro nominal do furo do parafuso;

$u = 2e_2$  mas  $u \leq p_2$ ;

$e_2$  é a distância desde o centro do furo do parafuso até ao bordo adjacente, na direção perpendicular à direção da transferência de carga;

$p_2$  é o espaçamento centro a centro dos furos dos parafusos, na direção perpendicular à direção da transferência de carga.

### 5.7.3 Secções transversais sujeitas a compressão

A resistência de uma secção transversal sujeita a compressão,  $N_{c,Rd}$ , com uma resultante a atuar através do centroide da secção bruta (para secções transversais de Classe 1, 2 e 3) ou da secção efetiva (secções transversais de Classe 4) pode ser determinada como:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3} \quad (5.27)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para secções transversais de Classe 4} \quad (5.28)$$

Nota: As secções transversais de Classe 4 que não sejam duplamente simétricas devem ser avaliadas em conformidade com 5.7.6, de forma a contar com o momento de flexão adicional  $\Delta M_{Ed}$ , devido à excentricidade do eixo centroidal das secções efetivas, ver Secção 5.4.1.

### 5.7.4 Secções transversais sujeitas a momento fletor

Na ausência de esforços de corte e axiais, o valor de cálculo do momento resistente de uma secção transversal sujeita a um momento uniaxial,  $M_{c,Rd}$ , deverá ser tomada como:



$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{Para secções transversais de Classe 1 ou 2} \quad (5.29)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{Para secções transversais de Classe 3} \quad (5.30)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{Para secções transversais de Classe 4} \quad (5.31)$$

onde:

$W_{pl}$  é o modulo de flexão plástico da secção;

$W_{el,min}$  é o modulo de flexão elástico da secção correspondente à fibra com a máxima tensão elástica (deve consultar-se a Secção 5.1 para secções transversais enformadas a frio);

$W_{eff,min}$  é o modulo elástico da secção efetiva correspondente à fibra com a máxima tensão elástica (deve consultar-se a Secção 5.1 para secções transversais enformadas a frio).

Para secções transversais onde a flexão é aplicada sobre ambos os eixos, ver Secção 5.7.6.

### 5.7.5 Secções transversais sujeitas a corte

A resistência plástica ao corte de uma secção transversal,  $V_{pl,Rd}$  pode ser tomada como:

$$V_{pl,Rd} = \left( \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \right) \quad (5.32)$$

onde  $A_v$  é a área de corte.

A Tabela 5.5 fornece as expressões para a área de corte.

**Tabela 5.5** Área de corte  $A_v$  para diferentes secções transversais

| Secção transversal   | Área de corte $A_v$   |
|--|---|
| Secções I e H laminadas, carga paralela à alma                         | $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$<br>Mas não inferior a $\eta h_w t_w$            |
| Secções em U laminadas, carga paralela à alma                          | $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$  |
| Secções em T laminadas, carga paralela à alma                          | $0,9(A - bt_f)$   |
| Secções soldadas I, H e em caixão, carga paralela à alma               | $\eta \sum (h_w t_w)$   |
| Secções soldadas I, H, U e em caixão, carga paralela aos banzos        | $A - \sum (h_w t_w)$  |
| Secções laminadas retangulares ocas, de espessura uniforme             | carga paralela à altura: $Ah/(b+h)$<br>carga paralela à largura: $Ab/(b+h)$ |
| Secções circulares ocas de espessura uniforme                          | $2A/\pi$  |
| Secções elípticas ocas de espessura uniforme, carga paralela à altura  | $2(h-t)/t$  |
| Secções elípticas ocas de espessura uniforme, carga paralela à largura | $2(b-t)/t$  |

onde:

$A$  é a área da secção transversal;

$b$  é a largura total;

- $h$  é a altura total;
- $h_w$  é a altura da alma;
- $r$  é o raio de concordância;
- $t_f$  é a espessura do banzo;
- $t_w$  é a espessura da alma (se a espessura da alma não for constante,  $t_w$  deve ser assumido como a espessura mínima);
- $\eta$  ver EN 1993-1-5 (EN 1993-1-4 recomenda  $\eta = 1,20$ ).

Nota: Deve ser utilizado o mesmo valor de  $\eta$  para calcular a resistência à encurvadura por corte, assim como é usado para calcular a resistência plástica ao corte.

A resistência à encurvadura por corte também deve ser verificada, ver Secção 6.4.3.

### 5.7.6 Secções transversais sujeitas a combinação de esforços

Quando um esforço axial está presente, deve-se ter em conta o seu efeito no momento plástico resistente. Para as secções transversais de Classes 1 e 2, deve ser satisfeito o seguinte critério:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (5.33)$$

onde  $M_{N,Rd}$  é o valor de cálculo do momento plástico resistente reduzido devido ao esforço axial  $N_{Ed}$ .

Para secções I e H duplamente simétricas ou outras secções de banzos, não é necessário ter em conta o efeito do esforço axial no momento plástico resistente em torno do eixo  $y$ - $y$  quando ambos dos seguintes critérios são satisfeitos:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad (5.34)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0} \quad (5.35)$$

Na ausência de esforço transversal, para secções transversais de Classe 3 e Classe 4 a tensão longitudinal máxima deve satisfazer o critério:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (5.36)$$

onde:

$\sigma_{x,Ed}$  É o valor de cálculo da tensão longitudinal local devido ao momento e esforço axial, tendo em conta os furos para os elementos de fixação, quando relevante.

Para secções transversais de Classe 4, também deve ser cumprido o seguinte critério:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (5.37)$$

onde:

$A_{eff}$  é a área efetiva da secção transversal quando submetida a compressão uniforme;

$W_{eff,y,min}$  é o módulo elástico efetivo da secção transversal quando sujeito apenas ao momento em torno do eixo relevante;

$e_N$  afastamento entre os centros de gravidade das áreas das secções efetivas ( $A_{eff}$ ) e bruta.

Para cantoneiras, os eixos  $y$  e  $z$  no acima descrito, devem ser tomados como os eixos  $u$  e  $v$ , respetivamente.

Quando  $V_{Ed}$  excede em 50% o valor de  $V_{pl,Rd}$ , a resistência de cálculo da secção transversal a combinações de momento e esforço axial deve ser calculada usando uma tensão de cedência reduzida  $(1 - \rho) f_y$  para a área de corte, onde  $\rho = (2V_{Ed}/V_{pl,Rd} - 1)^2$ .

## 6 RESISTÊNCIA DOS ELEMENTOS

### 6.1 Introdução

As verificações de cálculo necessárias para os elementos de aço inoxidável são semelhantes às exigidas para os elementos de aço carbono. Recomenda-se que os esforços e os momentos nos elementos sejam obtidos através de uma análise global elástica.

Para além da resistência da secção transversal, ver Secção 5, deve ser considerada a encurvadura geral dos elementos, conforme abordado nesta secção.

Uma possível abordagem de cálculo para verificar a segurança à encurvadura em elementos de aço inoxidável é usar o módulo tangente correspondente à tensão de encurvadura em vez do módulo de elasticidade usado nas regras de aço carbono. Assumindo níveis semelhantes de tensões geométricas e residuais em aço carbono e aço inoxidável, geralmente conduz a resultados satisfatórios quando se baseia em regras de aço carbono validadas. Esta abordagem está, portanto, disponível para o projetista. No entanto, requer técnicas iterativas de solução e, foi evitado neste Manual de Cálculo, exceto em alguns casos quando foi usada para derivar curvas de cálculo efetivas para uso com o módulo de elasticidade. Em vez disso, foi dada ênfase à calibração contra os dados experimentais disponíveis.

Os itens seguintes destinam-se a ser utilizadas com secções mono-simétricas, duplamente simétricas ou de simetria pontual. A resistência de elementos que não possuam qualquer eixo de simetria deve ser verificada experimentalmente.

### 6.2 Elementos tracionados

Os elementos apenas sujeitos a tração não sofrem qualquer instabilidade devido a encurvadura. Por conseguinte, o seu cálculo pode basear-se apenas na resistência da secção transversal, ver Secção 5.7.2, e na resistência das suas ligações, ver Secção 7.

Para uma cantoneira ligada por uma aba ou por outros elementos conectados assimetricamente:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad (6.1)$$

Onde os termos são definidos na Secção 5.7.2 e  $N_{u,Rd}$  é determinado a partir da Secção 7.2.3.

### 6.3 Elementos comprimidos

#### 6.3.1 Generalidades

Os elementos comprimidos são suscetíveis a uma série de possíveis modos de encurvadura, incluindo:

- Encurvadura local da secção (apenas secções de Classe 4)
- Encurvadura por flexão
- Encurvadura por torção
- Encurvadura por flexão-torção

**Secções transversais duplamente simétricas (secções CHS, RHS, I, etc.)**

As secções transversais duplamente simétricas não necessitam de ser verificadas quanto à encurvadura por flexão-torção, uma vez que o centro de corte coincide com o centro geométrico da secção transversal. Contudo, a encurvadura por torção pode ser crítica.

Secções ocas circulares e quadradas não sofrem problemas devido a encurvadura por torção.

Para a gama de tamanhos de RHS tipicamente usados na construção, a encurvadura por torção não é crítica. A encurvadura por torção em RHS só deve ser considerada para secções com relações  $h/b$  invulgarmente elevadas.

**Secções transversais mono simétricas (cantoneiras de abas iguais, secções U, etc.)**

Como em secções U e cantoneiras de abas iguais o centro de corte não coincide com o centro geométrico da secção transversal, é necessário verificar a encurvadura por flexão-torção.

**Secções transversais de simetria pontual (secções em Z, secções cruciformes, etc.)**

Para esta secções a encurvadura por torção pode ser o modo critico de encurvadura.

**6.3.2 Encurvadura de placas comprimidas**

A encurvadura de placas comprimidas nas secções da Classe 4 é tida em conta através da utilização de uma área efetiva da secção transversal. O momento adicional  $\Delta M_{Ed}$ , devido à excentricidade do eixo centroidal da secção efetiva em secções transversais assimétricas de Classe 4, deve ser considerado de acordo com a Secção 6.5.

**6.3.3 Encurvadura por flexão**

A resistência à encurvadura por flexão deve ser determinada por:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad \text{para secções transversais de Classe 1, 2 e 3} \quad (6.2)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{para secções transversais de Classe 4} \quad (6.3)$$

onde:

$A$  é a área bruta;

$A_{eff}$  é a área efetiva das secções transversais de Classe 4;

$\chi$  é o fator de redução para o modo de encurvadura relevante, dado por:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (6.4)$$

em que:

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \quad (6.5)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{para secções transversais de Classe 1, 2 e 3} \quad (6.6)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{A_{\text{eff}}}{A}} \quad \text{para secções transversais de Classe 4} \quad (6.7)$$

onde:

$\alpha$  é o fator de imperfeição definido na Tabela 6.1;

$N_{\text{cr}}$  é a carga crítica elástica para o modo de encurvadura relevante com base nas propriedades da secção transversal bruta;

$\bar{\lambda}_0$  é o fator de esbelteza normalizado definido na Tabela 6.1;

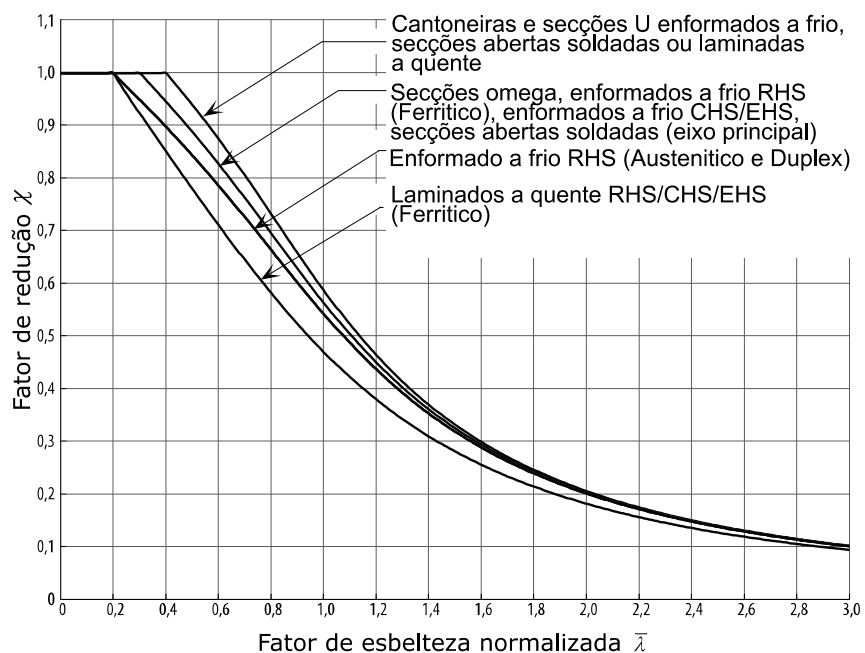
$L_{\text{cr}}$  é o comprimento de encurvadura no plano de encurvadura considerado. A determinação do comprimento de encurvadura deve basear-se nos princípios da mecânica estrutural, tendo em conta as condições de fronteira;

$i$  é o raio de giração em torno do eixo relevante, determinado usando as propriedades da secção transversal bruta.

**Tabela 6.1** Valores de  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  para encurvadura por flexão

| Tipo do elemento                               | Eixo de encurvadura | Austenítico e duplex |                   | Ferrítico |                   |
|--|---------------------|----------------------|-------------------|-----------|-------------------|
|  |                     | $\alpha$             | $\bar{\lambda}_0$ | $\alpha$  | $\bar{\lambda}_0$ |
| Cantoneiras e secções U enformadas a frio      | Qualquer            | 0,76                 | 0,2               | 0,76      | 0,2               |
| Secções ómega enformadas a frio                | Qualquer            | 0,49                 | 0,2               | 0,49      | 0,2               |
| Enformados a frio RHS                          | Qualquer            | 0,49                 | 0,3               | 0,49      | 0,2               |
| Enformados a frio CHS/ EHS                     | Qualquer            | 0,49                 | 0,2               | 0,49      | 0,2               |
| Laminados a quente RHS                         | Qualquer            | 0,49                 | 0,2               | 0,34      | 0,2               |
| Laminados a quente CHS/EHS                     | Qualquer            | 0,49                 | 0,2               | 0,34      | 0,2               |
| Secções abertas soldadas ou laminadas a quente | Maior Inércia       | 0,49                 | 0,2               | 0,49      | 0,2               |
|  | Maior Inércia       | 0,76                 | 0,2               | 0,76      | 0,2               |

A Figura 6.1 apresenta as curvas para a encurvadura por flexão.



**Figura 6.1** Curvas para a encurvadura por flexão

Os efeitos devido à encurvadura podem ser ignorados, e apenas se aplicam verificações da secção transversal se:

$$\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad \text{or} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq \bar{\lambda}_0^2$$

As curvas de encurvadura apresentadas na Figura 6.1 e Tabela 6.1 são mais conservadoras do que as da EN 1993-1-4 (valores de  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  da Tabela 6.2). A investigação experimental ao longo dos últimos 10 anos mostrou que as curvas de encurvadura da EN 1993-1-4 para secções abertas enformadas a frio e secções ocas enformadas a frio são excessivamente otimistas e existe diferenças no comportamento de encurvadura de colunas RHS enformadas a frio de aço inoxidável ferrítico comparado com o aço inoxidável austenítico e duplex. Espera-se que a próxima revisão da EN 1993-1-4 apresente as curvas de encurvadura por flexão na Figura 6.1 e Tabela 6.1.

**Tabela 6.2** Valores para  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  para encurvadura por flexão e torção na EN 1993-1-4

| Modo de encurvadura | Tipo de elemento                                 | $\alpha$ | $\bar{\lambda}_0$ |
|---------------------|--|----------|-------------------|
| Por flexão          | Secções abertas enformadas a frio                | 0,49     | 0,40              |
|                     | Secções ocas (com soldadura ou sem soldadura)    | 0,49     | 0,40              |
|                     | Secções abertas soldadas (eixo de maior inércia) | 0,49     | 0,20              |
|                     | Secções abertas soldadas (eixo de menor inércia) | 0,76     | 0,20              |

Os valores para  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  não se aplicam a secções ocas caso sejam recozidos depois do fabrico (o que raramente é o caso).

### 6.3.4 Encurvadura por torção e por flexão-torção

A resistência a estes modos de encurvadura deve ser determinada de acordo com a Secção 6.3.3, mas substituindo  $\bar{\lambda}$  por  $\bar{\lambda}_T$ , como apresentado nas equações (6.8) e (6.9), e tomando  $\alpha = 0,34$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ .

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secções transversais de Classe 1, 2 e 3} \quad (6.8)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secções transversais de Classe 4} \quad (6.9)$$

em que:

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \quad \text{e} \quad N_{cr} < N_{cr,T}$$

onde:

$N_{cr,T}$  é a carga crítica elástica para encurvadura por torção, dada por:

$$N_{crT} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right) \quad (6.10)$$

$N_{cr,TF}$  é a carga crítica elástica para a encurvadura por flexão-torção. Para secções transversais que são simétricas em relação ao eixo  $y$ - $y$  (e.g.  $z_o = 0$ ):

$$N_{crTF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[ 1 + \frac{N_{crT}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left( 1 - \frac{N_{crT}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left( \frac{y_o}{i_o} \right)^2 \frac{N_{crT}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (6.11)$$

em que:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2 \quad (6.12)$$

$i_y$  e  $i_z$  são os raios de giração da secção transversal bruta em torno dos eixos  $y$  e  $z$  respetivamente;

$y_o$  e  $z_o$  são as coordenadas do centro de corte relativamente ao centro geométrico da secção transversal bruta;

$G$  é o modulo de distorção;

$l_T$  é o comprimento de encurvadura de um elemento sujeito a encurvadura por torção (ver EN 1993-1-3);

$I_T$  é a constante de torção uniforme da secção transversal bruta;

$I_W$  é a constante de empenamento da secção transversal bruta;

$$\beta = 1 - \left( \frac{y_o}{i_o} \right)^2$$

$N_{cr,y}$  e  $N_{cr,z}$  é a carga critica elástica para encurvadura por flexão em torno dos eixos  $y - y$  e  $z - z$ , respetivamente.

Para uma secção transversal duplamente simétrica, o centro de corte coincide com o centro geométrico, portanto  $y_o = 0$  e  $z_o = 0$  e

$$N_{crTF} = N_{crT} \text{ sendo que } N_{crT} < N_{cr,y} \text{ e } N_{crT} < N_{cr,z}$$

Note-se que para cantoneiras, os eixos  $y$  e  $z$ , acima descrito indicados, devem ser tomados como os eixos  $u$  e  $v$ , respetivamente.

## 6.4 Elementos em flexão

### 6.4.1 Generalidades

Um elemento está em flexão simples sob cargas que atuam perpendicularmente ao eixo longitudinal, se estiver ligado de modo a eliminar cargas de torção, tração e compressão nas extremidades.

Para estabelecer o momento resistente de uma viga devem ser considerados os seguintes critérios:

- Cedência da secção transversal (ver Secção 5.7);
- Encurvadura das placas comprimidas (apenas secções de Classe 4, ver Secção 5.7);
- Encurvadura lateral (ver Secção 6.4.2);
- Encurvadura por corte (ver Secção 6.4.3);
- Resistência local em pontos de carregamento ou reação (ver Secção 6.4.4).



Note-se que, para os elementos em flexão, os efeitos do *shear lag* e enrugamento dos banzos podem ter de ser contabilizados no cálculo, ver Secções 5.4.2 e 5.5.3.

A flexão biaxial deve ser tratada como descrito na Secção 6.5.2.

### 6.4.2 Encurvadura lateral

Um elemento não restringido lateralmente sujeito a flexão em torno do eixo principal deve ser verificado relativamente à encurvadura lateral. A possibilidade de encurvadura lateral pode ser dispensada, efetuando apenas verificações ao nível da secção transversal para os seguintes grupos de elementos:

- vigas sujeitas a momento apenas em torno do eixo de menor inércia;
- vigas com o banzo comprimido restringido através de travamentos adequados;
- vigas em que o fator de esbelteza normalizada  

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \quad \text{ou} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16;$$
- Além disso, vigas com certos tipos de secções transversais, tais como secções ocas quadradas ou circulares, não são suscetíveis à encurvadura por flexão-torção.

Para todos os outros grupos de elementos, a resistência à encurvadura por flexão-torção deve ser determinada a partir de:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} \quad (6.13)$$

onde:

$$W_y = W_{pl,y} \text{ para secções transversais de Classe 1 ou 2;}$$

$$W_y = W_{el,y} \text{ para secções transversais de Classe 3;}$$

$$W_y = W_{eff,y} \text{ para secções transversais de Classe 4;}$$

$\chi_{LT}$  é o fator de redução para resistência à encurvadura lateral, dado por:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (6.14)$$

em que:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (6.15)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (6.16)$$

$\alpha_{LT}$  é o fator de imperfeição

= 0,34 para secções enformadas a frio e secções ocas (soldadas e sem soldadura);

= 0,76 para secções abertas soldadas e outras secções para as quais não existam dados de ensaio;

$M_{cr}$  é o momento elástico crítico para a encurvadura lateral (ver ANEXO E).

Note-se que para cantoneiras, os eixos  $y$  e  $z$ , acima indicados, devem ser tomados como os eixos  $u$  e  $v$ , respetivamente.

A Figura 6.2 mostra a variação de  $\chi_{\Pi}$  com  $\bar{\lambda}_{\Pi}$ .

A distribuição de momentos entre as restrições laterais dos elementos pode ser tida em conta pelo uso de um valor modificado para  $\chi_{\Pi}$  onde:

$$\chi_{\Pi\text{mod}} = \frac{\chi_{\Pi}}{f} \quad \text{mas } \chi_{\Pi\text{mod}} \leq 1,0 \quad \text{e} \quad \chi_{\Pi\text{mod}} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{\Pi}^2} \quad (6.17)$$

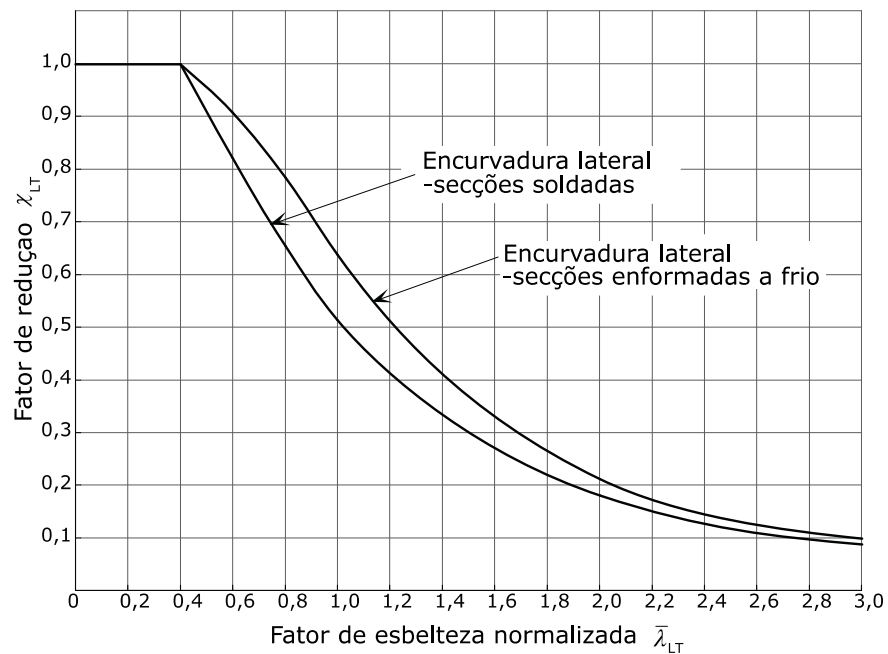
No qual se recomenda o seguinte valor mínimo para  $f$ :

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{\Pi} - 0,8)^2] \quad \text{mas } f \leq 1,0 \quad (6.18)$$

e

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \quad (6.19)$$

No ANEXO E são dados valores para  $C_1$ .



**Figura 6.2** Curvas de encurvadura para encurvadura lateral

### 6.4.3 Resistência ao corte

A resistência ao corte é limitada pela resistência plástica ao corte (ver Secção 5.7.5) ou pela encurvadura por corte.

A resistência à encurvadura por corte apenas requer verificação quando:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2\varepsilon}{\eta} \quad \text{Para uma alma não reforçada} \quad (6.20)$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{24,3\varepsilon \sqrt{k_\tau}}{\eta} \quad \text{para uma alma reforçada} \quad (6.21)$$

A resistência à encurvadura por corte para uma viga deve ser obtida de:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.22)$$

Na qual a contribuição da alma é dada por:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.23)$$

onde:

$h_w$  é a altura da alma entre banzos (Figura 6.3);

$\varepsilon$  é definido na Tabela 5.2;

$k_\tau$  é fator de encurvadura por corte;

$V_{bw,Rd}$  é a contribuição da alma para a resistência à encurvadura por corte;

$V_{bf,Rd}$  é a contribuição dos banzos para a resistência à encurvadura por corte;

$f_{yw}$  é a tensão de cedência característica da alma.

$\eta$  ver EN 1993-1-5 (A EN 1993-1-4 recomenda  $\eta = 1,20$ .)

O Anexo Nacional do Reino Unido atribui um valor de  $\eta=1,20$  quando a tensão de cedência a 0.2% não é superior a 460 MPa e a temperatura do aço não excede os 400°C. Quando a tensão de cedência a 0.2% excede os 460 MPa e/ou a temperatura do aço excede 400°C. deve ser usado o valor  $\eta=1,00$ .

Note: Deve ser utilizado o mesmo valor de  $\eta$  para calcular a resistência plástica ao corte assim como para calcular a resistência à encurvadura por corte.

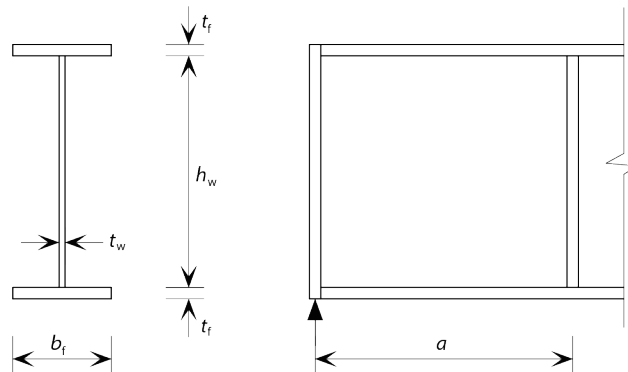


Figura 6.3 Notação para dimensões geométricas

Para almas com reforços transversais apenas nos apoios, e para almas tanto com reforços intermédios transversais e/ou longitudinais, a contribuição da alma para  $\chi_w$  é dada na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Fator de redução da alma à encurvadura por corte  $\chi_w$

|  | $\chi_w$ reforço de extremidade rígido  | $\chi_w$ reforço de extremidade não rígido |
|--|---|--|
| $\bar{\lambda}_w \leq \frac{0,65}{\eta}$     | $\eta$                                  | $\eta$                                     |
| $\frac{0,65}{\eta} < \bar{\lambda}_w < 0,65$ | $\frac{0,65}{\bar{\lambda}_w}$          | $\frac{0,65}{\bar{\lambda}_w}$             |
| $\bar{\lambda}_w \geq 0,65$                  | $\frac{1,56}{(0,91 + \bar{\lambda}_w)}$ | $\frac{1,19}{(0,54 + \bar{\lambda}_w)}$    |

Para almas com reforços transversais apenas nos apoios, o fator de esbelteza normalizado  $\bar{\lambda}_w$  deve ser obtido por:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) \quad (6.24)$$

Para almas com reforços transversais nos apoios reforços intermédios transversais e/ou longitudinais,  $\bar{\lambda}_w$  deve ser obtido por:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) \quad (6.25)$$

No qual  $k_\tau$  é fator de encurvadura por corte mínimo para o painel de alma. Para almas com reforços transversais rígidos e sem reforços longitudinais ou com mais do que dois reforços longitudinais,  $k_\tau$  pode ser obtido por:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{quando } a/h_w \geq 1 \quad (6.26)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{quando } a/h_w < 1 \quad (6.27)$$

onde:

$$k_{\tau st} = 9(h_w/a)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w}\right)^3} \quad \text{mas não inferior a} \quad \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} \quad (6.28)$$

onde:

$a$  é a distância entre eixos centrais dos reforços transversais, ver Figura 6.3;

$I_{sl}$  é o momento de inércia do reforço longitudinal em relação ao eixo z-z.

As equações (6.26) e (6.27) também se aplicam a placas com um ou dois reforços longitudinais, se a relação  $a/h_w \geq 3$ . Para placas com um ou dois reforços longitudinais e um rácio  $a/h_w < 3$ , deve ser feita referência ao Anexo A3 da EN 1993-1-5.

Para simplificação, a contribuição dos banzos  $\chi_f$  pode ser desprezada. No entanto, se a resistência do banzo não for completamente utilizada para suportar o momento fletor ( $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ ), então a contribuição dos banzos pode ser obtido da seguinte forma:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (6.29)$$

onde:

$b_f$  e  $t_f$  são tomadas para o banzo que proporciona a menor resistência axial, sendo que  $b_f$  não deve ser maior do que  $15\varepsilon t_f$  de cada lado da alma;

$M_{f,Rd}$  é o momento fletor resistente da secção transversal que consiste somente na área dos banzos efetivos,  $M_{f,Rd} = M_{f,k}/\gamma_{M0}$

$$c = a \left( 0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \quad \text{e} \quad \frac{c}{a} \leq 0,65 \quad (6.30)$$

$f_{yf}$  é a tensão de cedência característica do banzo.

Se também for aplicado um esforço axial  $N_{Ed}$ , o valor de  $M_{f,Rd}$  deve ser reduzido por um fator:

$$\left[ 1 - \frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2})f_{yf}} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M0}} \right] \quad (6.31)$$

onde  $A_{f1}$  e  $A_{f2}$  são as áreas dos banzos superiores e inferiores, respetivamente.

A verificação deve ser feita da seguinte forma:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.32)$$

onde:

$V_{Ed}$  é o esforço de cálculo por corte, incluindo o corte por torção.

A verificação do elemento para flexão biaxial e compressão axial deve ser feita da seguinte forma:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (6.33)$$

onde:

$A_{eff}$  é a área efetiva de secção transversal (Secção 5.4.1);

$e_{y,N}$  é a excentricidade do eixo neutro em relação ao eixo  $y$  (Secção 5.4.1);

$e_{z,N}$  é a excentricidade do eixo neutro em relação ao eixo  $z$  (Secção 5.4.1);

$M_{y,Ed}$  é o momento fletor de cálculo em relação ao eixo  $y$ ;

$M_{z,Ed}$  é o momento fletor de cálculo em relação ao eixo  $z$ ;

$N_{Ed}$  é o esforço axial de cálculo;

$W_{y,eff}$  é o módulo de secção efetiva em relação ao eixo  $y$  (Secção 5.4.1);

$W_{z,eff}$  é o módulo de secção efetiva em relação ao eixo  $z$  (Secção 5.4.1).

Quando relevante o efeito das ações  $M_{Ed}$  e  $N_{Ed}$  deve incluir os efeitos globais de segunda ordem. A verificação da encurvadura de placas comprimidas do painel deve ser realizada para as resultantes da tensão à menor distância  $0,4a$  ou  $0,5b$ , do lado do painel onde as tensões são maiores.

Desde que  $\bar{\eta}_3$  (ver abaixo) não exceda 0,5, o momento fletor resistente e esforço axial não precisam de ser reduzidos para considerar o esforço de corte. Se  $\bar{\eta}_3$  for superior a 0,5, os efeitos combinados de flexão e corte na alma de uma secção I ou em caixão devem satisfazer:

$$\bar{\eta}_1 + \left( 1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{para} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (6.34)$$

onde:

$M_{f,Rd}$  é o valor de cálculo do momento fletor plástico resistente da secção que consiste na área efetiva dos banzos;

$M_{pl,Rd}$  é o momento fletor plástico resistente da secção.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad (6.35)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bwRd}} \quad (6.36)$$

Os esforços são tomados como positivos.  $M_{Ed}$  e  $V_{Ed}$  devem incluir efeitos de segunda ordem quando relevantes.

O critério dado na Equação (6.34) deve ser verificado em todas as secções que não estejam localizadas a uma distância menor que  $h_w/2$  dum suporte com reforços verticais.

Se um esforço axial  $N_{Ed}$  estiver presente, então  $M_{pl,Rd}$  deve ser substituído pelo momento fletor plástico resistente reduzido  $M_{N,Rd}$ , de acordo com 6.2.9 da EN 1993-1-1 e  $M_{f,Rd}$  deve ser reduzido de acordo com a Equação (6.31). Deve ser feita referência à EN 1993-1-5 se o esforço axial for tão grande que a totalidade da alma esteja em compressão.

#### 6.4.4 Esmagamento, enrugamento e encurvadura da alma

Desde que os banzos estejam restringidos lateralmente, a resistência de uma alma não reforçada a esforços resultantes de cargas concentradas ou reações de apoio será condicionada por um dos três possíveis modos de rotura:

- esmagamento da alma perto do banzo, acompanhada pela deformação plástica do banzo;
- enrugamento da alma sob a forma de encurvadura localizada e esmagamento da alma próxima do banzo, acompanhada de deformação plástica do banzo;
- encurvadura da alma ao longo da sua altura.

Para secções enformadas a frio, pode-se adotar a orientação da EN 1993-1-3 para o aço carbono.

Para vigas laminadas a quente e secções em caixão soldados, deve ser adotada a seguinte abordagem, com base nas orientações da EN 1993-1-5.

Para almas não reforçadas ou reforçadas, a resistência de cálculo à encurvadura local sob esforços de corte deve ser tomada como:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (6.37)$$

onde:

$t_w$  é a espessura da alma;

$f_{yw}$  é a tensão de cedência da alma;

$L_{eff}$  é o comprimento efetivo para a resistência a esforços de corte, que deve ser determinada a partir de  $L_{eff} = \chi_F l_y$ ;

no qual:

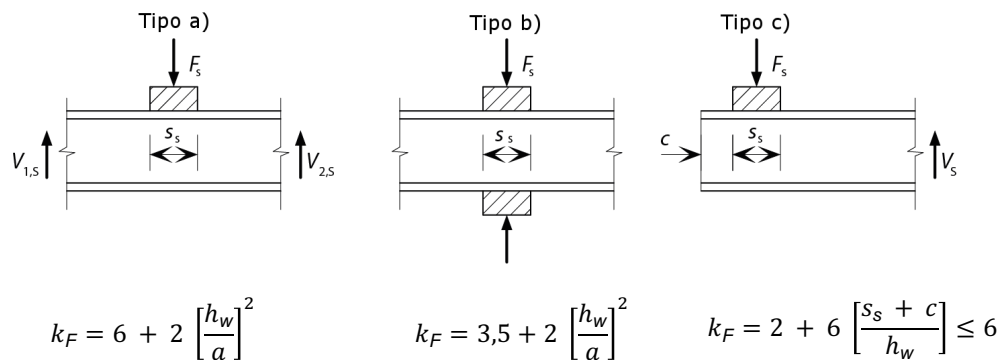
$l_y$  é o comprimento efetivo carregado apropriado ao comprimento de reforço  $s_s$ ;

$\chi_F$  é o fator de redução devido à encurvadura local;

Além disso, deve ser considerado o efeito do esforço de corte sobre o momento resistente do elemento.

Para determinar  $L_{eff}$ , deve ser feita uma distinção entre três tipos de aplicação de força:

- Forças aplicadas a um banzo e resistidas por forças de corte na alma (Figura 6.4a);
- Forças aplicadas a um banzo e transferidas através da alma diretamente para o outro banzo (Figura 6.4b);
- Forças aplicadas através de um banzo próximo a uma extremidade não reforçada (Figura 6.4c).

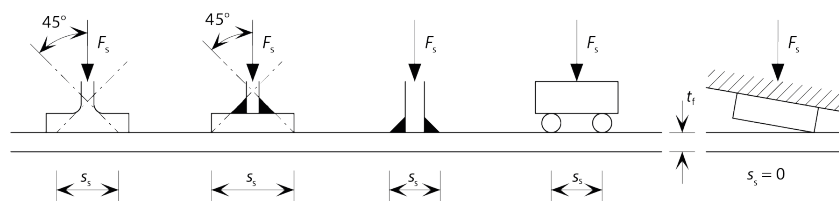


**Figura 6.4** Fatores de encurvadura para diferentes tipos de aplicação de carga

### Comprimento de reforço

O comprimento do reforço,  $s_s$ , no banzo é a distância sobre a qual a força aplicada é efetivamente distribuída e pode ser determinado pela dispersão de carga através de material sólido em aço com uma inclinação de 1:1, ver Figura 6.5. No entanto,  $s_s$  não deve ser superior à altura da alma,  $h_w$ .

Se várias cargas concentradas estiverem muito próximas, a resistência deve ser verificada para cada uma delas individualmente, bem como para a carga total, com  $s_s$  igual à distância centro-centro entre as cargas externas.



**Figura 6.5** Comprimento de reforço

### Comprimento carregado efetivo

O comprimento carregado efetivo  $l_y$  deve ser calculado usando dois parâmetros adimensionais,  $m_1$  e  $m_2$  obtidos de:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \tag{6.38}$$

$$m_2 = 0,02 \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{para } \bar{\lambda}_F > 0,5 \tag{6.39}$$

$$m_2 = 0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \tag{6.40}$$

Para os casos a) e b) na Figura 6.4,  $l_y$  deve ser obtido usando:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \quad (6.41)$$

mas  $l_y$  não deve exceder a distância entre os reforços transversais adjacentes.

Para o caso c),  $l_y$  deve ser obtido como o menor dos valores dados pelas Equações (6.42) e (6.43). Na Equação (6.44),  $s_s$  deve ser considerado igual a zero se a estrutura que introduz a força não seguir a inclinação da secção, ver a Figura 6.5.

$$l_y = l_e + t_f \left[ \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2 + m_2} \right] \quad (6.42)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (6.43)$$

onde  $l_e$  é dado por:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (6.44)$$

### **Comprimento efetivo de resistência**

O comprimento efetivo da resistência deve ser obtido a partir de:

$$L_{\text{eff}} = \chi_F l_y \quad (6.45)$$

com

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (6.46)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{\text{cr}}}} \quad (6.47)$$

$$F_{\text{cr}} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (6.48)$$

onde:

$k_F$  é o fator de encurvadura para diferentes tipos de aplicação de força (Figura 6.4).

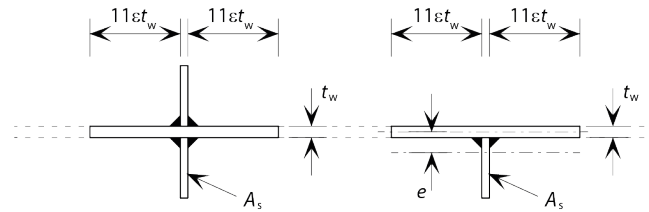
Para calcular  $m_2$ , é necessário assumir o valor de  $\bar{\lambda}_F$ . Quando o valor de  $\bar{\lambda}_F$  for calculado, o valor de  $m_2$  poderá ter de ser recalculado.

### **6.4.5 Reforços transversais**

Os reforços transversais nos apoios e em outras posições em que são aplicadas forças externas significativas, devem, de preferência, ser de dois lados e simétricos em relação à linha central da alma. Esses reforços devem ser verificados quanto ao esmagamento e encurvamento da secção transversal. Os reforços intermédios não sujeitos a forças externas só precisam de ser verificados quanto à encurvadura.

A secção transversal efetiva a ser utilizada na verificação da encurvadura deve incluir uma largura da placa da alma, conforme ilustrado na Figura 6.6. No final de um elemento (ou nas aberturas na alma), a largura da alma incluída na secção transversal não deve exceder a largura disponível.





**Figura 6.6** Seção transversal efetiva de reforços para encurvadura

A resistência à encurvadura fora do plano do reforço  $N_{b,Rd}$  deve ser determinada a partir da Secção 6.3.3 usando  $\alpha = 0,49$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ . O comprimento de encurvadura  $l$  do reforço deve ser apropriado para as condições de apoio onde ambas as extremidades são fixas lateralmente, mas nunca inferior a  $0,75h_w$ . Para apoios com menos restrição deve ser utilizado um valor maior de  $l$ . A resistência à encurvadura por torção da secção cruciforme, também deve ser verificada.

Para os reforços assimétricos ou apenas de um lado, a excentricidade daí resultante deve ser considerada de acordo com a Secção 6.5.2.

Nos apoios ou nas posições intermédias onde são aplicadas cargas significativas, a resistência à encurvadura deve exceder a reação ou a carga. Em outras posições intermédias, o esforço de compressão  $N_{Ed}$  no reforço pode ser obtido a partir de:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.49)$$

onde:

$V_{Ed}$  é o esforço de corte de cálculo no elemento

A expressão acima deve ser calculada assumindo que o reforço em consideração é removido.

O momento de inércia de um reforço intermédio,  $I_{st}$ , deve satisfazer o seguinte:

$$\frac{a}{h_w} < \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq \frac{1,5 h_w^3 t^3}{a^2} \quad (6.50)$$

$$\frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \quad (6.51)$$

#### 6.4.6 Determinação dos deslocamentos verticais

Os deslocamentos verticais devem ser determinados para a combinação de ações para o estado limite de serviço relevante.

O deslocamento vertical de vigas elásticas (isto é, aquelas que não contém uma rótula plástica) pode ser estimado pela teoria de estruturas, mas deve ser usado o módulo de elasticidade secante, em vez do módulo de elasticidade. O valor do módulo secante varia com o nível de tensão na viga e pode ser obtido da seguinte forma:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2} \quad (6.52)$$

onde:

$E_{S1}$  é o módulo secante correspondente à tensão no banzo tracionado

$E_{S2}$  é o módulo secante correspondente à tensão no banzo comprimido

Os valores de módulo secante  $E_{S1}$  e  $E_{S2}$  para a tensão de cálculo no estado limite de serviço apropriado podem ser estimados da seguinte forma:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad e \quad i = 1,2 \quad (6.53)$$

onde:

$\sigma_{i,Ed,ser}$  é a tensão de cálculo ao estado limite de serviço no banzo tracionado ou comprimido

$E$  é o módulo de elasticidade =  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>

$n$  é o parâmetro de Ramberg Osgood

$n$  é derivado da tensão limite da proporcionalidade  $e$ , portanto, é uma medida da não linearidade da curva tensão-extensão, com valores mais baixos indicando um maior grau de não linearidade. Os valores de  $n$  dependem da Classe de aço inoxidável, via de processamento / fabricação, nível de trabalho a frio e direção de carregamento (tração ou compressão); há uma grande variação em todos estes valores. Os valores recomendados são apresentados na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4** Valores de  $n$  a serem utilizados para determinar os módulos secantes

| Classe do aço | Fator $n$ |
|---------------|-----------|
| Ferrítico     | 14        |
| Austenítico   | 7         |
| Duplex        | 8         |

Atualmente a EN 1993-1-4 fornece valores para  $n$  que dependem da Classe e da direção de produção. Os valores para duplex foram baseados em muito poucos dados e agora são entendidos como sendo muito baixos. Espera-se que os valores sejam substituídos pelos da Tabela 6.4 na próxima revisão da EN 1993-1-4.

**Tabela 6.5** Valores de  $n$  a serem utilizados para determinar os módulos secantes

| Tipo        | Classe  | Fator $n$            |                     |
|-------------|---|----------------------|---------------------|
|             |   | Direção longitudinal | Direção transversal |
| Ferrítico   | 1.4003  | 7                    | 11                  |
|             | 1.4016  | 6                    | 14                  |
|             | 1.4512  | 9                    | 16                  |
| Austenítico | 1.4301, 1.4306, 1.4307, 1.4318, 1.4541          | 6                    | 8                   |
|             | 1.4401, 1.4404, 1.4432, 1.4435, 1.4539, 1.4571, | 7                    | 9                   |
| Duplex      | 1.4462, 1.4362                                  | 5                    | 5                   |

Note: se a orientação do elemento não for conhecida, ou assegurada, então deve usar-se o valor para a direção longitudinal.

A relação tensão-extensão de aço inoxidável não linear significa que o módulo de elasticidade varia dentro da secção transversal e ao longo do comprimento de um elemento. Por isso, são necessários procedimentos complexos e não-lineares para a determinação precisa dos deslocamentos verticais em vigas de aço inoxidável. Como simplificação, a variação de  $E_S$  ao longo do comprimento do elemento pode ser desprezado e o valor mínimo de  $E_S$  para esse elemento (correspondendo ao valor

máximo de tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  no elemento) pode ser usado ao longo do seu comprimento. Este método, que é necessário para prever deslocamentos verticais quando o módulo de secante é baseado na tensão máxima do elemento e essa tensão máxima não excede 65% da tensão convencional de proporcionalidade a 0,2%. Para níveis mais altos de tensão, o método torna-se muito conservador e deve ser usado um método mais preciso (por exemplo, um que envolve a integração ao longo do comprimento do elemento).

No caso de secções transversais de Classe 4 e/ou elementos sujeitos a *shear lag*, deve ser usada a secção efetiva nos cálculos. Como primeira estimativa, é recomendado usar a secção efetiva com base nas larguras efetivas estabelecidas nas Secções 5.4.1 e/ou 5.4.2. Como refinamento, é possível usar uma secção efetiva com base nas larguras efetivas de encurvadura determinadas para a tensão real nos elementos, considerando o valor de  $\varepsilon$  na Secção 5.4.1 (mas não na Secção 5.4.2) como:

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{\sigma} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (6.54)$$

onde:

$\sigma$  é a tensão real no elemento na secção transversal efetiva associada

## 6.5 Elementos sujeitos à combinação de esforço axial e flexão

### 6.5.1 Tração e flexão

Os elementos tracionados com momentos devem ser verificados quanto à resistência à encurvadura lateral de acordo com a Secção 6.4.2 sob efeito momento apenas. A sua resistência também deve ser verificada sob os efeitos combinados de carga axial e momento nos pontos do máximo momento fletor e carga axial. Deve ser satisfeita a seguinte relação:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{yEd}}{M_{yRd}} + \frac{M_{zEd}}{M_{zRd}} \leq 1 \quad (6.55)$$

onde:

$N_{Ed}$  é o valor de cálculo do esforço axial atuante na secção crítica do elemento;

$N_{Rd}$  é o valor de cálculo do esforço axial resistente;

$M_{y,Ed}$  é o valor de cálculo do momento fletor atuante em torno do eixo de maior inércia na secção crítica;

$M_{z,Ed}$  é o valor de cálculo do momento fletor atuante em torno do eixo menor inércia na secção crítica;

$M_{y,Rd}$  é o valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo de maior inércia na ausência de carga axial e incluindo qualquer redução devido aos efeitos de corte (Secção 5.7.4);

$M_{z,Rd}$  é o valor de cálculo do momento fletor resistente em relação ao eixo de menor inércia na ausência de carga axial e incluindo qualquer redução devido aos efeitos de corte (Secção 5.7.4).

### 6.5.2 Compressão axial e flexão

Além de satisfazer os requisitos de resistência à secção transversal (ver Secção 5.7.6) em todos os pontos do comprimento do elemento e os requisitos gerais para vigas (ver Secção 6.4), também devem ser considerados os efeitos de interação entre cargas de compressão e momentos de flexão.

#### **Compressão axial e momento uniaxial em torno do eixo principal:**

Para evitar a encurvadura prematura sobre o eixo de maior inércia:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.56)$$

Para evitar a encurvadura prematura sobre o eixo de menor inércia (para elementos sujeitos a encurvadura lateral):

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min1}} + k_{\Gamma} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (6.57)$$

#### **Compressão axial e momento uniaxial em torno do eixo secundário:**

Para evitar a encurvadura prematura sobre o eixo de menor inércia:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.58)$$

#### **Compressão axial e momentos biaxiais:**

Todos os elementos têm que satisfazer:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.59)$$

Os elementos suscetíveis a encurvadura lateral também deve satisfazer:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.60)$$

Nas expressões acima:

$e_{Ny}$  e  $e_{Nz}$  é a excentricidade do eixo neutro em relação aos eixos  $y$  e  $z$ , respetivamente, quando a secção transversal é sujeita a compressão uniforme;

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  e  $M_{z,Ed}$  são os valores de cálculo do esforço de compressão e momentos máximos em relação ao eixos  $y$ - $y$  e  $z$ - $z$  ao longo do elemento, respetivamente;

$(N_{b,Rd})_{\min}$  é o menor valor de  $N_{b,Rd}$  para os seguintes quatro modos de encurvadura: encurvadura por flexão em torno do eixo  $y$ , encurvadura por flexão em torno do eixo  $z$ , encurvadura por torção e encurvadura lateral (ver Secções 6.3.3 e 6.3.4);

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$  é o menor valor de  $N_{b,Rd}$  para os seguintes três modos de encurvadura: encurvadura por flexão em torno do eixo z, encurvadura por flexão e encurvadura lateral (ver Secções 6.3.3 e 6.3.4);

$\beta_{W,y}$  e  $\beta_{W,z}$  são os valores de  $\beta_W$  determinado para os eixos y e z, respetivamente, em que:

$$\begin{aligned}\beta_W &= 1 \text{ para secções transversais de Classe 1 ou 2} \\ &= W_{el}/W_{pl} \text{ para secções transversais de Classe 3} \\ &= W_{eff}/W_{pl} \text{ para secções transversais de Classe 4}\end{aligned}$$

$W_{pl,y}$  e  $W_{pl,z}$  são os módulos plásticos para os eixos y e z, respetivamente;

$M_{b,Rd}$  é a resistência à encurvadura lateral (ver Secção 6.4.2).

Os fatores de interação  $k_y$ ,  $k_z$  e  $k_{LT}$  para secções transversais abertas podem ser calculados através das seguintes expressões:

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{mas} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (6.61)$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{mas} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad (6.62)$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Os coeficientes de interação  $k_y$  e  $k_z$  para secções transversais retangulares e circulares ocas podem ser calculados através das seguintes expressões:

$$k_y = 1 + D_1 (\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (6.63)$$

$$k_z = 1 + D_1 (\bar{\lambda}_z - D_2) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd,y})_{\min 1}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd,y})_{\min 1}} \quad (6.64)$$

Os valores para  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$  são dados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 Valores para  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$

| Secção transversal | Classe      | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|--------------------|-------------|-------|-------|-------|
| RHS                | Ferrítico   | 1,3   | 0,45  | 1,6   |
|                    | Austenítico | 2,0   | 0,30  | 1,3   |
|                    | Duplex      | 1,5   | 0,40  | 1,4   |
| CHS                | Ferrítico   | 1,9   | 0,35  | 1,3   |
|                    | Austenítico | 2,5   | 0,30  | 1,3   |
|                    | Duplex      | 2,0   | 0,38  | 1,3   |

Atualmente a EN 1993-1-4: 2015 apenas apresenta as Equações (6.61) e (6.62). Como estas dão valores muito conservadores quando aplicados em secções ocas, espera-se que a próxima revisão da EN 1993-1-4 também inclua as novas expressões em (6.63) e (6.64).

Note-se que os Anexos Nacionais podem apresentar outras fórmulas de interação como alternativas às equações acima. O Anexo Nacional do Reino Unido não apresenta outra alternativa.

Para cantoneiras, os eixos  $y$  e  $z$  devem ser tomados como os eixos  $u$  e  $v$  respectivamente.



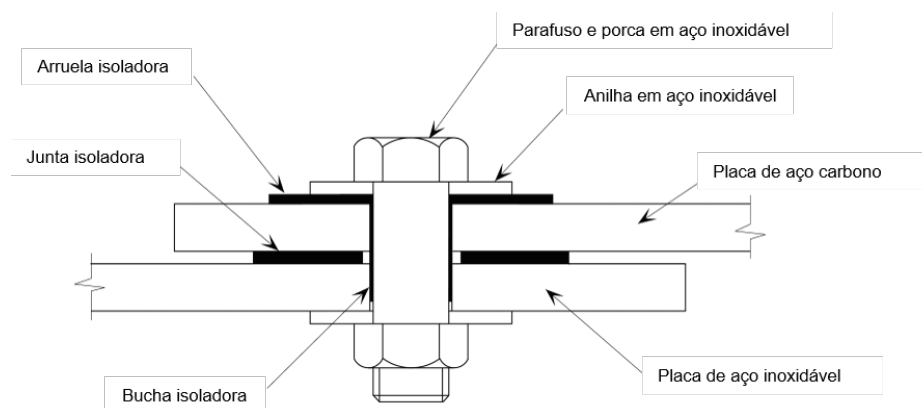
## 7 RESISTÊNCIA DAS LIGAÇÕES

### 7.1 Recomendações gerais

#### 7.1.1 Durabilidade

A concepção das ligações exige de uma atenção cuidada para se conseguir uma resistência à corrosão ótima. Isto é fundamental no caso de ligações que podem ser molhadas devido ao clima, à pulverização, imersão ou condensação, etc. Deve ser estudada a possibilidade de evitar ou reduzir os problemas de corrosão associados, posicionando as ligações em locais distantes das fontes de humidade. Alternativamente, pode ser possível remover a fonte de humidade; por exemplo, no caso de condensação, através da utilização de ventilação adequada ou assegurando que a temperatura ambiente dentro da estrutura esteja acima da temperatura do ponto de orvalho.

Sempre que não seja possível evitar que uma ligação, envolvendo aço carbono e aço inoxidável, fique molhada, deve considerar-se a prevenção da corrosão bimetálica, ver Secção 3.2.3. O uso de parafusos de aço carbono com elementos estruturais de aço inoxidável, deve ser sempre evitado. Em ligações aparafusadas que estejam propensas a um grau inaceitável de corrosão, deve-se isolar eletricamente os elementos de aço carbono e aço inoxidável. Isto implica a utilização de anilhas e buchas isolantes. Na Figura 7.1 são apresentados pormenores típicos apropriados para parafusos em condições normais de aperto. As anilhas e buchas isolantes devem ser feitas de um polímero termo-endurecido, como o neoprene (borracha sintética), que é flexível o suficiente para selar a ligação quando é aplicada pressão, e de longa duração para permitir a separação permanente entre os metais. A vedação da ligação é importante para evitar infiltrações devido à humidade que levaria à corrosão da abertura. Note-se que a arruela isoladora não se deve estender além da arruela de aço inoxidável no caso de ser criada uma abertura. Em condições atmosféricas com exposição a cloretos, uma estratégia adicional para a proteção contra a corrosão da abertura é inserir uma anilha isoladora e flexível diretamente sob a cabeça do parafuso ou cobrir a área com vedante de silicone transparente.



**Figura 7.1** Detalhe típico para a conexão de materiais dissimilares (para evitar a corrosão bimetálica)

No que diz respeito às ligações soldadas, envolvendo aço carbono e aço inoxidável, geralmente recomenda-se que o sistema de pintura aplicado ao aço carbono se estenda sobre a soldadura até uma distância de cerca de 75 mm no aço inoxidável.

Para evitar a corrosão de fissura em ligações aparafusadas deve-se ter cuidado ao seleccionar materiais apropriados para o ambiente em questão (ver Secção 3.2.2).



### **7.1.2 Suposições de projeto**

As ligações podem ser projetadas distribuindo as forças e momentos internos de forma realista, tendo em conta a rigidez relativa dos elementos que compõem a ligação. As forças e momentos internos devem estar em equilíbrio com as forças e momentos aplicados. Cada elemento deve ser capaz de resistir às forças assumidas na análise e à deformação implícita dentro da sua capacidade de deformação.

### **7.1.3 Interseções e emendas**

Os elementos que se ligam num nó devem normalmente ser orientados de forma a que o eixo dos seus centroides se interceitem num ponto. Se existir excentricidade nas interseções, os elementos e as ligações devem ser dimensionados para acomodar os momentos resultantes. No caso de ligações com cantoneiras ou ligações T, ligadas por pelo menos dois parafusos em cada ligação, as linhas que definem os parafusos podem ser substituídas pelos eixos dos centroides na determinação da intersecção nas ligações.

As emendas em vigas devem ser localizadas o mais próximo possível dos pontos de contra-flexão (momento fletor nulo). Devem ser considerados os momentos causados pelos efeitos P- $\delta$  em emendas de colunas.

### **7.1.4 Outras considerações gerais**

Quando uma ligação está sujeita a impacto, vibração ou frequente amplitude de tensões significativas, a soldadura é o método preferível para a ligação. Estas ligações devem ser verificadas relativamente à fadiga (ver Secção 9).

Facilidade de fabricação e de montagem são fatores a ter em consideração na conceção de todas as ligações e emendas. Deve ser dada atenção ao:

- uso de detalhes padronizados
- às folgas necessárias para a montagem segura
- às folgas necessárias para aperto dos parafusos
- à necessidade de acesso às soldaduras
- aos requisitos para o processo de soldadura
- ao efeito das tolerâncias angulares e de comprimento durante os ajustes.

Note-se que, as distorções devido ao processo de soldadura são mais associadas aos aços inoxidáveis austeníticos do que aos aços carbono (ver Secção 11.6.4). Deve-se também prestar atenção aos requisitos para operações de inspeção e manutenção subsequentes.

## **7.2 Ligações aparafusadas**

### **7.2.1 General**

As recomendações dadas nesta secção aplicam-se a ligações com parafusos em furos com folga, onde pode ocorrer corte, tração ou uma combinação de corte e tração. As regras aplicam-se às ligações feitas com parafusos com propriedades das classes 50, 70 e 80. A resistência das ligações com os parafusos com propriedades da classe 100 deve ser confirmada através da realização de ensaios. É de boa prática utilizar

arruelas sob a cabeça do parafuso e sobre as porcas. Nas Secções 2.3 e 11.7 são fornecidas orientações sobre materiais apropriados para parafusos e porcas.

As forças de corte são transferidas por esmagamento entre os parafusos e as peças ligadas. Não são dadas recomendações para ligações nas quais os esforços de corte são transferidos por resistência de fricção, no entanto deve-se consultar a Secção 7.2.2.

A resistência de uma ligação deve ser considerada como a menor dos componentes ligados (ver Secção 7.2.3) e dos parafusos (ver Secção 7.2.4).

Para restringir a deformação permanente nas ligações aparafusadas, as tensões nos parafusos e nas áreas úteis das secções transversais junto aos parafusos sob as combinações de cargas características, devem ser limitadas à tensão limite de elasticidade.

## **7.2.2 Parafusos pré-esforçados**

No passado existiam preocupações no que diz respeito à utilização de parafusos pré-esforçados em aço inoxidável, devido à falta de conhecimento sobre:

- Métodos apropriados para aplicar o pré-esforço, de modo a evitar moer a rosca.
- Efeito do tempo no pré-esforço em aço inoxidável.
- Coeficiente de escorregamento entre superfícies em contacto.

O projeto SIROCO, financiado pelo EU RFCS estudam o desempenho do aço inoxidável em ligações pré-esforçadas e têm apresentado informações importantes para a compreensão do comportamento do material. Os testes realizados em ligações de aço inoxidável mostraram que:

- Se for tida em atenção a classe do parafuso, método de aperto e a lubrificação, pode ser obtido um bom desempenho com parafusos de aço inoxidável austenítico e duplex em ligações pré-esforçadas.
- A perda de tensão da ligação que ocorre no aço inoxidável é semelhante à do aço de carbono.
- Coeficientes de escorregamento medidos em aço inoxidável com a superfície tratada são equivalentes à Classe B (0,4).

As recomendações finais do projeto SIROCO estarão disponíveis a partir do final de 2018 e serão aplicadas na próxima revisão da EN 1993-1-4 e EN 1090-2. Entretanto deverão ser feitos ensaios experimentais para demonstrar a capacidade do aço inoxidável numa ligação pré-esforçada.

## **7.2.3 Elementos ligados**

### ***Furos***

Os furos podem ser formados por furação ou por punçoamento. No entanto, o trabalho a frio associado ao punçoamento pode aumentar a suscetibilidade à corrosão e, por conseguinte, os furos perfurados são menos adequados em ambientes agressivos (por exemplo, ambientes industriais e marítimos).

As folgas máximas nos furos normalizados são:

- 1 mm para parafusos M12 e M14 (M14 não é um tamanho normalizado);
- 2 mm para parafusos M16 a M24;
- 3 mm para parafusos M27 e maiores.

### Posição dos furos

A distância à extremidade é definida como a distância entre o centro de um furo e a borda adjacente da peça de ligação perpendicular à direção da tensão; a distância de borda é definida de forma semelhante, mas na direção em que o parafuso está apoiado.

O valor mínimo da distância  $e_1$  e  $e_2$  (ver Figura 7.2) deve ser tida como  $1,2d_0$ , onde  $d_0$  é o diâmetro do furo do parafuso. Note-se que a distância  $e_1$  poderá precisar de ser maior para se conseguir a resistência de esmagamento adequada, ver abaixo.

O valor máximo para a distância de extremidade deve ser limitada a  $4t + 40$  mm, onde  $t$  é a espessura (em mm) da placa exterior mais fina.

O espaçamento mínimo entre o centro dos parafusos é de  $2,2d_0$  na direção da tensão,  $p_1$ , (see Figura 7.2). O espaçamento mínimo correspondente,  $p_2$ , normal à direção de tensão é de  $2,4d_0$ .

O espaçamento máximo dos parafusos em qualquer direção deve ser tal que seja considerada a encurvadura por compressão, ver EN 1993-1-8.

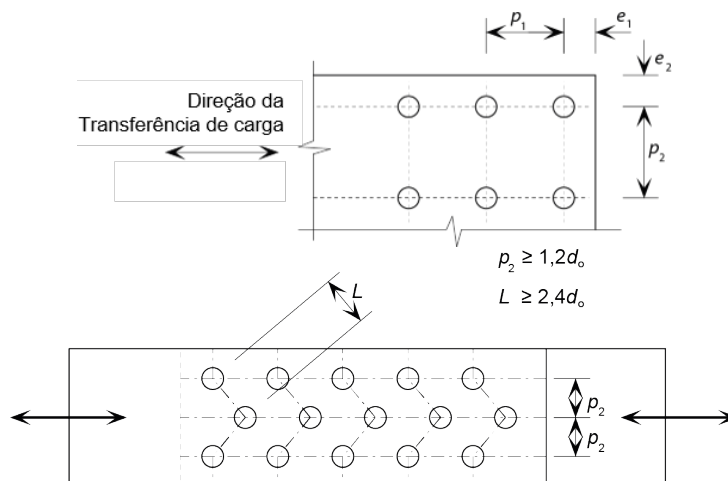


Figura 7.2 Símbolos para definir a posição dos furos

Para linhas de parafusos em quincôncio, pode ser utilizado um espaçamento mínimo de  $p_2 = 1,2d_0$  se a distância mínima,  $L$ , entre quaisquer dois parafusos numa linha de quincôncio for maior ou igual a  $2,4d_0$ , ver Figura 7.2.

### Resistência ao esmagamento

A resistência de esmagamento de ligações em aço inoxidável deve ser determinada com base num critério de resistência ou de deformação. A resistência de dimensionamento para ligações aparafusadas suscetíveis à rotura por esmagamento  $F_{b,Rd}$  é dada por:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

Onde:

- $\alpha_b$  é o coeficiente de esmagamento na direção de transferência de carga;
- $k_t$  é o coeficiente de esmagamento na direção perpendicular à transferência de carga;
- $d$  é o diâmetro do parafuso;

$t$  é a espessura da placa ligada;

$f_u$  é a tensão de cedência característica das placas ligadas (Tabela 2.2).

As ligações aparafusadas são classificadas em dois grupos, com base na espessura das placas ligadas. As ligações de placas grossas são aquelas entre placas com espessuras superiores a 4 mm, enquanto as ligações entre placas com espessuras inferiores ou iguais a 4 mm são definidas como ligações de placas finas.

#### *Coefficientes de esmagamento para a ligação de placas grossas*

Para ligações compostas por placas grossas, quando a deformação não é um ponto chave do projeto, o coeficiente de esmagamento  $\alpha_b$  na direção de transferência de carga é determinado a partir da Equação (7.2), enquanto o coeficiente de esmagamento  $k_t$  na direção perpendicular à transferência de carga é determinado a partir da Equação (7.3).

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0; \frac{e_1}{3d_0} \right\} \quad (7.2)$$

$$k_t = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \left( \frac{e_2}{d_0} \right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{para } \left( \frac{e_2}{d_0} \right) \leq 1,5 \end{cases} \quad (7.3)$$

Para ligações de placas grossas, quando a deformação é um ponto chave do projeto, o coeficiente de esmagamento  $\alpha_b$  é determinado a partir da Equação (7.4) e  $k_t = 0,5$ .

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0; \frac{e_1}{2d_0} \right\} \quad (7.4)$$

#### *Coefficientes de esmagamento para a ligação de placas finas*

Para ligações compostas por placas finas, quando a deformação não é um ponto chave do projeto, os coeficientes de esmagamento  $\alpha_b$  e  $k_t$ , para chapas internas em ligações em corte duplo são iguais aos definidos pelas Equações (7.2) e (7.3) para ligações de placas grossas.

Para ligações compostas por placas finas, quando a deformação não é um ponto chave do projeto, o coeficiente de esmagamento  $\alpha_b$  para ligações simples de corte e placas externas em ligações em corte duplo é calculado a partir da Equação (7.4) e  $k_t = 0,64$ .

Para ligações compostas por placas finas, quando a deformação é um ponto chave do projeto, o coeficiente de esmagamento  $\alpha_b$  é determinado a partir da Equação (7.4) e  $k_t = 0,5$ .

É expectável que na próxima revisão da EN 1993-1-4, as regras de dimensionamento para determinar a resistência ao esmagamento venham a substituir as regras mais conservadoras atualmente em vigor na EN 1993-1-4, que seguem as regras para o aço carbono da EN 1993-1-8, utilizando um valor reduzido na tensão de cedência  $f_{u,red}$  no lugar de  $f_u$ , onde:

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u \quad (7.5)$$

A resistência de um grupo de parafusos pode ser calculada como a soma das resistências de esmagamento  $F_{b,Rd}$  dos parafusos individuais, desde de que a resistência ao corte de projeto  $F_{v,Rd}$  de cada parafuso individual seja maior ou igual

à resistência de esmagamento  $F_{b,Rd}$ . Caso contrário a resistência de um grupo de parafusos deve ser determinada utilizando a menor resistência dos parafusos individuais multiplicada pelo número de parafusos.

### **Resistência à tração**

A resistência à tração da chapa ligada é o menor valor de:

a) Resistência plástica da secção transversal bruta

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.6)$$

b) Resistência última da secção transversal útil dos parafusos

$$N_{u,Rd} = \frac{k A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.7)$$

sendo os termos definidos na Secção 5.7.2.

Se for requerido um comportamento dúctil, então a resistência plástica da secção bruta deve ser inferior à resistência última da secção útil. Os requisitos para a ductilidade e a capacidade de rotação são apresentados na EN 1993-1-8. Os requisitos para o dimensionamento sísmico são apresentados na EN 1998.

### **Cálculo da rotura em bloco**

Aplicam-se as indicações apresentadas em EN 1993-1-8.

### **Tração de cantoneiras ligadas por uma aba e outros elementos ligados assimetricamente**

A excentricidade dos elementos de fixação nas ligações finais e os efeitos do espaçamento entre os parafusos e distâncias às extremidades das placas, devem ser tidos em conta no cálculo da resistência de elementos assimétricos, bem como de elementos simétricos que estão ligados de forma não simétrica, tais como cantoneiras ligadas por uma aba.

Cantoneiras ligadas por uma única fila de parafusos numa aba podem ser tratadas como concentricamente carregadas e a resistência final da estrutura da secção útil é determinada da seguinte forma:

$$\text{Com 1 parafuso:} \quad N_{u,Rd} = \frac{2,0 (e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

$$\text{Com 2 parafusos:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.9)$$

$$\text{Com 3 ou mais parafusos:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

onde:

$\beta_2$  e  $\beta_3$  são fatores de redução dependentes do espaçamento  $p_1$  conforme indicado na Tabela 7.1. Para valores intermédios de  $p_1$  o valor de  $\beta$  pode ser determinado por interpolação linear.

$A_{net}$  é a área útil da cantoneira. Para uma cantoneira com abas de comprimento diferente, ligada com a de menor dimensão,  $A_{net}$  deve ser tido como a área útil de uma cantoneira, com abas iguais à da aba de menor dimensão.

Tabela 7.1 Fator de redução  $\beta_2$  e  $\beta_3$

| Conexão             | Fator     | Espaçamento, $p_1$ |               |
|---------------------|-----------|--------------------|---------------|
|                     |           | $\leq 2,5d_0$      | $\geq 5,0d_0$ |
| 2 parafusos         | $\beta_2$ | 0,4                | 0,7           |
| 3 parafusos ou mais | $\beta_3$ | 0,5                | 0,7           |

## 7.2.4 Parafusos

### Áreas úteis

Para parafusos em tração a área do parafuso a ser utilizada em cálculos, deve ser tida como a área de tensão, conforme definido na norma do produto.

Para os parafusos solicitados ao corte, pode ser utilizada a área bruta do parafuso, se se garantir que a porção roscada é excluída do plano de corte; deve considerar-se a possibilidade de que os parafusos podem ser inseridos a partir de qualquer direção. Se não for dada tal garantia, deve ser utilizada a área de tração.

### Resistência ao corte

A resistência ao corte de uma ligação aparafusada depende do número de planos de corte e da sua posição ao longo do parafuso. Para cada plano de corte, a resistência ao corte, na ausência de tração, deve ser determinada de acordo com:

$$F_{vRd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (7.11)$$

onde:

$A$  é a área da secção transversal bruta do parafuso (se o plano de corte passar na parte não roscada do parafuso); ou a área de tração do parafuso (se o plano de corte passar através da porção roscada do parafuso);

$f_{ub}$  é a tensão última do parafuso (Tabela 2.6).

O valor de  $\alpha$  pode ser definido no Anexo Nacional. O valor recomendado é de 0,6, que se aplica se o plano de corte passar pelas zonas roscada ou não roscada do parafuso.

Existe um erro na EN 1993-1-4 no que se refere ao valor de  $\alpha$  quando o plano de corte passa na zona roscada do parafuso. O valor dado é  $\alpha = 0,5$  mas espera-se que seja aumentado para  $\alpha = 0,6$  na próxima revisão da EN 1993-1-4.

### Resistência à tração

A resistência à tração de um parafuso é dada por  $F_{t,Rd}$ :

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.12)$$

onde:

$k_2 = 0,63$  para parafusos de cabeça cônica, caso contrário  $k_2 = 0,9$ .

No caso em que os elementos de fixação suportarem esforços de tração, eles devem ser adequados para resistir a uma possível força adicional devido à ação de alavanca. Na EN 1993-1-8 são dadas orientações sobre as forças de alavanca.

### **Combinação de corte e tração**

Quando um parafuso é simultaneamente solicitado a um esforço de corte  $F_{v,Ed}$  e a um esforço de tração (incluindo os efeitos de alavanca)  $F_{t,Ed}$ , devem ser considerados os efeitos de interação. Isto pode ser contabilizado satisfazendo a seguinte condição:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.13)$$

Note-se que a força de tração de dimensionamento (incluindo qualquer força devido à ação de alavanca) também deve ser menor que a resistência à tração.

### **Ligações comprimidas e grandes comprimentos de aperto**

Para emendas de comprimento invulgar (diga-se 500 mm ou além do diâmetro de 15 parafusos), ou quando o comprimento de aperto (isto é, a espessura total dos elementos ligados) excede o diâmetro de 5 parafusos, a resistência ao corte deve ser reduzida. Na ausência de dados para o aço inoxidável, recomenda-se consultar as regras do aço carbono aplicáveis a estas situações na EN 1993-1-8.

## **7.3 Ligadores mecânicos para materiais de espessura fina**

O dimensionamento de ligações em chapas de aço inoxidável utilizando parafusos auto-roscentes pode ser calculado de acordo com a EN 1993-1-3, exceto a resistência à extração que deve ser determinada através da realização de ensaios. Para evitar a remoção da rosca do parafuso, a sua habilidade para furar e formar roscas em aço inoxidável deve ser demonstrada experimentalmente, a menos que haja experiência suficiente.

## **7.4 Ligações soldadas**

### **7.4.1 Geral**

O ciclo de aquecimento e arrefecimento envolvido no processo de soldadura afeta a microestrutura dos aços inoxidáveis, com especial relevância nos aços inoxidáveis duplex. É essencial a utilização de processos de soldadura adequados, consumíveis compatíveis e que este trabalho seja realizado por soldadores qualificados. A Secção 11.6 fornece indicações sobre este assunto. Estas indicações são essenciais, não apenas para assegurar a resistência da soldadura e um bom perfil da mesma, mas também para manter a resistência à corrosão da soldadura e do material envolvente.

As recomendações a seguir aplicam-se às soldaduras de ângulo e de topo com penetração total e parcial pelo processo de soldadura por arco, tais como:

| Número do processo | Nome do processo   |
|--------------------|--|
| 111                | Soldadura a arco elétrico com eletrodo revestido             |
| 121                | Soldadura por arco submerso com eletrodo de fio              |
| 122                | Soldadura por arco submerso com eletrodo de fita             |
| 131                | Soldadura <u>MIG</u> ( <i>Metal-arc inert gas welding</i> )  |
| 135                | Soldadura <u>MAG</u> ( <i>Metal-arc active gas welding</i> ) |
| 137                | Soldadura com gás inerte de proteção com fios fluxados       |

141 Soldadura TIG (*Tungsten inert gas welding*)

15 Soldadura por arco plasma

(Os números do processo são definidos na norma EN ISO 4063.)

Devem ser utilizados consumíveis compatíveis, de modo a que a tensão limite de elasticidade, tensão última, alongamento à rotura e energia mínima do ensaio de *Charpy-V* do metal de adição, sejam equivalentes ou melhor que o material de base. No entanto, para o aço inoxidável austenítico na condição de trabalhado a frio, o metal de adição pode ter uma resistência nominal inferior à do material base (Secção 7.4.4). A Tabela 7.2 fornece os consumíveis para o processo de soldadura para as diferentes classes.

Para soldar aço inoxidável a aço carbono, o metal de adição deve ser ligado de forma a garantir propriedades mecânicas e resistência à corrosão da ligação adequadas. A adição de elementos de liga evita a diluição dos elementos unidos na zona de fusão, do aço inoxidável de base. Ao soldar um aço inoxidável a um aço galvanizado, o revestimento de zinco em torno da área a ser ligada deve ser removido antes da soldadura. A inclusão do zinco pode resultar na fragilização ou na redução da resistência à corrosão da soldadura, e os fumos emitidos quando se tenta soldar através da camada galvanizada são um perigo significativo para a saúde. Com a remoção do revestimento de galvanização, os requisitos para a realização da soldadura são os mesmo da soldadura entre um aço inoxidável e um aço carbono.

**Tabela 7.2 Classes de aço e respetivos consumíveis de soldadura**

| Material Base  |                                | Consumíveis de Soldadura   |   |
|--|--------------------------------|--|---|
| Grupo  | Classe                         | EN ISO 3581:2012<br>Consumíveis de soldadura. Elérodos revestidos para soldadura a arco elétrico de aços inoxidáveis e resistentes ao calor. | EN ISO 14343:2009<br>Consumíveis de soldadura. Elérodos de fio, eléctrodos de fita, fios e varetas para soldadura a arco elétrico de aços inoxidáveis e resistentes ao calor. |
|  |                                | Classificação  | Classificação   |
| Austeníticos   | 1.4301, 1.4307, 1.4318         | 19 9 L   |   |
|  | 1.4541                         | 19 9 L or 19 9 Nb  |   |
|  | 1.4401, 1.4404                 | 19 12 3 L  |   |
|  | 1.4571                         | 19 12 3 L or 19 12 3 Nb  |   |
| Duplex   | 1.4482, 1.4162, 1.4362, 1.4062 | 23 7 N L or 22 9 3 N L   |   |
|  | 1.4062 (2202)                  | 23 7 N L or 22 9 3 N L   |   |
|  | 1.4662, 1.4462                 | 22 9 3 N L   |   |
| Ferrítico  | 1.4003                         | 13 or 19 9 L   |   |
|  | 1.4016                         | 19 9 L or 23 12 L  |   |
|  | 1.4509                         | 19 9 Nb or 18 8 Mn   |   |
|  | 1.4521                         | 19 12 3 L or 23 12 2L  |   |
| Os consumíveis austeníticos de soldadura têm uma tensão mínima limite de elasticidade (0.2%) de cerca de 320-350 N/mm <sup>2</sup> e uma tensão de cedência de 510-550 N/mm <sup>2</sup> . |                                |  |   |
| Os consumíveis duplex de soldadura têm uma tensão mínima limite de elasticidade (0.2%) de cerca de 450 N/mm <sup>2</sup> e uma tensão de cedência de 550 N/mm <sup>2</sup> .               |                                |  |   |

Os fabricantes de aço inoxidável e consumíveis podem ajudar na seleção dos consumíveis apropriados. O material de soldadura deve ser tão nobre como o material de base.



De modo a reduzir a possibilidade de corrosão, as soldaduras de cordão intermitente e soldaduras de topo intermitentes com penetração parcial devem ser evitadas em todos os ambientes, com exceção nos ambientes mais suaves. Além disso, as soldaduras de topo intermitentes devem ser utilizadas com cuidado em ambientes marítimos ou ambientes terrestres altamente poluídos.

### 7.4.2 Soldaduras de ângulo

#### **Aplicação**

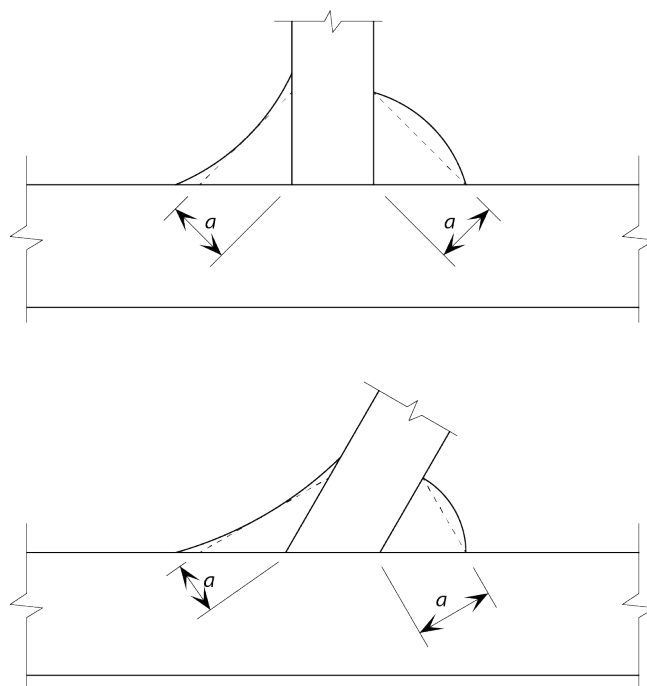
As soldaduras de ângulo podem ser utilizadas para ligar peças em que as faces de fusão formam um ângulo entre  $60^\circ$  a  $120^\circ$ . Para ângulos inferiores a  $60^\circ$ , também podem ser utilizadas soldaduras de ângulo, mas estas devem ser consideradas como soldaduras de topo com penetração parcial para fins de concepção. Para ângulos superiores a  $120^\circ$ , as soldaduras de ângulo não devem ser utilizadas.

Não se devem utilizar soldaduras de ângulos em situações que produzam um momento fletor em torno do eixo longitudinal da soldadura, e conseqüentemente tensões na raiz da mesma.

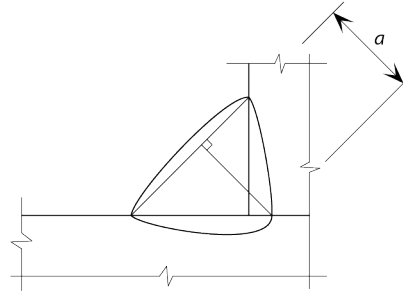
#### **Comprimento efetivo do cordão e espessura efetiva**

O comprimento efetivo do cordão de uma soldadura de ângulo pode ser tomado como o comprimento total do ângulo. No entanto, as soldaduras com comprimentos eficazes menores do que 40 mm ou 6 vezes a espessura efetiva, não devem ser aplicadas para transmitir forças.

A espessura efetiva,  $a$ , de uma soldadura de ângulo deve ser tomada como a altura do triângulo maior (com lados iguais ou desiguais) que pode ser inscrito dentro das faces de fusão e a superfície de soldadura, medida perpendicular ao lado externo deste triângulo, ver Figura 7.3. Pode-se tirar vantagem da espessura efetiva adicional das soldaduras de ângulo com maior penetração, ver Figura 7.4, desde de que testes preliminares mostrem que a penetração requerida possa ser conseguida de forma consistente.



**Figura 7.3** Espessura efetiva da soldadura



**Figura 7.4** Espessura efetiva de soldaduras de ângulo com penetração profunda

### **Tensões de cálculo e resistência ao corte**

A tensão de cálculo é obtida como a soma vetorial das tensões devido a todas as forças e momentos transmitidos pela soldadura. A tensão de cálculo é calculada para o comprimento efetivo do cordão e para a espessura efetiva da garganta (ver acima).

A resistência da soldadura de ângulo é suficiente se forem satisfeitos os seguintes requisitos:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (7.14)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.15)$$

onde:

- $\sigma_{\perp}$  é a tensão normal perpendicular à espessura efetiva;
- $\tau_{\perp}$  é a tensão de corte (no plano da espessura equivalente) perpendicular ao eixo da soldadura;
- $\tau_{\parallel}$  é a tensão de corte (no plano da garganta) paralelo ao eixo da soldadura;
- $f_u$  é a tensão última do elemento mais fraco da ligação;
- $\beta_w$  é tido como 1,0 para todas as classes de resistência nominal de aço inoxidável, a menos que seja confirmado experimentalmente a possibilidade de utilizar um valor menor.

Alternativamente, pode ser utilizado o Método Simplificado em 4.5.3.3 da EN 1993-1-8 para calcular a resistência de dimensionamento de uma soldadura de ângulo.

## **7.4.3 Soldaduras de topo**

### **Soldaduras de topo com penetração total**

A resistência de dimensionamento de uma soldadura de topo com penetração total deve ser considerada igual à resistência de dimensionamento da parte mais fraca das peças unidas, desde que a soldadura satisfaça as recomendações da Seção 7.4.1.

### **Soldaduras de topo com penetração parcial**

Podem ser utilizadas soldaduras de topo com penetração parcial para transmitir esforços de corte. Estas não são recomendadas para situações em que estejam submetidas a tração.

A resistência de uma soldadura de topo com penetração parcial pode ser determinada como para uma soldadura de ângulo com penetração total. A espessura efetiva de uma soldadura de topo com penetração parcial pode ser tomada como a profundidade de

penetração que pode ser conseguida de forma consistentemente, como determinado por ensaios de procedimento. Na ausência de ensaios de procedimento, a espessura efetiva pode ser assumida como a profundidade de preparação menos 3 mm.

#### **7.4.4 Soldaduras em aço inoxidável trabalhado a frio**

Em geral, aplicam-se os mesmos princípios às soldaduras em aço inoxidável na condição de trabalhado a frio que se aplicam às soldaduras em aço inoxidável recozido. Contudo, a resistência do material de base nas zonas afetadas pelo calor das soldaduras de topo deve ser considerada como a tensão última do material de base recozido.

O metal de adição pode ter uma resistência inferior à do material de base, no caso da resistência de dimensionamento das soldaduras de ângulo e topo se basear na tensão última do consumível de soldadura, com  $\beta_w$  igual 1,0 (Tabela 7.2).

Em geral, os consumíveis de soldadura austeníticos devem ser usados para soldar aços inoxidáveis na condição de trabalho a frio. Também podem ser utilizados consumíveis de soldadura duplex, desde que as propriedades mecânicas da ligação sejam verificadas por ensaios.

Nas ligações soldadas de material trabalhado a frio, o recozimento das zonas afetadas pelo calor pode ser incompleto e a resistência real das juntas pode ser superior à calculada com base no recozimento total. Nestas circunstâncias, pode ser possível estabelecer valores de dimensionamento mais elevados através da realização de ensaios.

## 8 RESISTÊNCIA AO FOGO

### 8.1 Introdução

Esta secção trata do dimensionamento de estruturas de aço inoxidável em caso de incêndios. Este dimensionamento é necessário para cumprir determinadas funções, em termos de evitar o colapso prematuro da estrutura (função de suporte de carga), quando exposto ao fogo. As recomendações referem-se apenas aos métodos passivos de proteção contra incêndios e são aplicáveis às classes de aço inoxidável e estruturas geralmente concebidas de acordo com as regras das Secções 4 a 7 do presente documento.

Acima de temperaturas de aproximadamente 550 °C os aços inoxidáveis austeníticos retêm geralmente uma maior proporção da sua resistência a temperatura ambiente, do que o aço carbono. Em todo o intervalo de temperatura todos os aços inoxidáveis retêm uma maior proporção da sua rigidez, do que o aço carbono.

A EN 1991-1-2 fornece as ações térmicas e mecânicas em estruturas expostas ao fogo. Nos Eurocódigos, o fogo é considerado como uma ação accidental. A EN 1990 apresenta as combinações de ações para situações accidentais de projeto e recomenda que os coeficientes parciais para as ações tomem o valor de 1,0. A EN 1993-1-2 recomenda que o coeficiente parcial de segurança do material  $\gamma_{M,fi}$  para a situação de incêndio seja 1,0. Este valor também é adotado pelo Anexo Nacional Português

Os requisitos de desempenho de uma estrutura de aço inoxidável que pode ser submetida a uma solicitação accidental de incêndio, não são diferentes dos do aço carbono, nomeadamente:

- Nos casos em que é necessária resistência mecânica em caso de incêndio, a estrutura deve ser concebida e construída de modo a manter a sua função de suporte durante a exposição ao fogo relevante.
- Os critérios de deformação devem ser aplicados sempre que os meios de proteção contra incêndios ou os critérios de conceção dos elementos de separação exigirem a consideração da deformação da estrutura de suporte. No entanto, não é necessário considerar a deformação da estrutura de suporte se a resistência ao fogo dos elementos de separação se basear na curva de incêndio padrão.

### 8.2 Propriedades mecânicas a temperaturas elevadas

Uma vez que as propriedades a temperaturas elevadas podem variar significativamente entre as classes, devido à diferente composição química, a EN 1993-1-2: 2005 apresenta oito conjuntos de fatores de redução de resistência para diferentes classes de aço inoxidável, em comparação com um conjunto único para o aço carbono. Na próxima revisão da EN 1993-1-2, é esperado que os aços inoxidáveis com propriedades de temperaturas elevadas semelhantes sejam colocados em grupos, e que sejam introduzidos fatores de redução aplicáveis a estes grupos, substituindo os dados específicos de cada classe. Estes fatores de redução genéricos são apresentados nesta secção.

A Tabela 8.1 apresenta os fatores de redução de resistência e rigidez, em relação ao valor apropriado a 20 °C, para a relação tensão-deformação para sete grupos de aços inoxidáveis a temperaturas elevadas. Estes fatores são:

$k_{p0,2,\theta}$  é o fator de redução da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% à temperatura  $\theta$  relativamente à resistência de cálculo a 20 °C, i.e.:

$$k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta} / f_y \quad (8.1)$$

$k_{2,\theta}$  é o fator de redução da resistência a 2% da deformação total à temperatura  $\theta$  relativamente à resistência de cálculo a 20 °C, i.e.:

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y \quad \text{porém} \quad f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta} \quad (8.2)$$

$k_{u,\theta}$  é o fator de redução da resistência última à temperatura  $\theta$  relativamente à resistência última a 20 °C, i.e.

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u \quad (8.3)$$

$k_{E,\theta}$  é o fator de redução para o declive do domínio elástico linear, i.e.:

$$k_{E,\theta} = E_\theta / E \quad (8.4)$$

$k_{\varepsilon u,\theta}$  é o fator de redução da extensão à temperatura  $\theta$  relativamente à extensão na resistência última a 20 °C, i.e

$$k_{\varepsilon u,\theta} = \varepsilon_{u,\theta} / \varepsilon_u \quad (8.5)$$

onde:

$E$  é o módulo de elasticidade a 20 °C ( $=200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>);

$f_y$  é a tensão de cedência a 20 °C, como definido na Secção 2.3;

$f_u$  é a tensão última a 20 °C, como definido na Secção 2.3.

Para materiais enformados a frio, ou quando se está a utilizar uma resistência reforçada resultante da enformação a frio durante o fabrico da secção, podem ser utilizados os seguintes fatores de redução de resistência:

$$k_{p0,2,\theta,CF} = k_{p0,2,\theta} \quad 200 \leq \theta \leq 700 \text{ °C}$$

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} \quad \theta \geq 800 \text{ °C}$$

$$k_{2,\theta,CF} = k_{2,\theta} \quad 200 \leq \theta \leq 700 \text{ °C}$$

$$k_{2,\theta,CF} = 0,9 k_{2,\theta} \quad \theta \geq 800 \text{ °C}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} \quad \text{Para todas as temperaturas:}$$

Onde o sub-índice CF se refere ao material na condição de enformado a frio.

Note-se que, nos métodos de cálculo simplificados para determinação da resistência ao fogo indicado na Secção 8.3, são utilizadas as seguintes resistências características dos materiais:

|                        |                   |  |
|------------------------|-------------------|--|
| Colunas                | $f_{p0,2,\theta}$ | (todas as Classes de secção transversal) |
| Vigas restringidas     | $f_{2,\theta}$    | (secções transversais de Classe 1-3)     |
|                        | $f_{p0,2,\theta}$ | (secções transversais de Classe 4)       |
| Vigas não restringidas | $f_{p0,2,\theta}$ | (todas as Classes de secção transversal) |
| Elementos tracionados  | $f_{2,\theta}$    | (todas as Classes de secção transversal) |

Tabela 8.1 Fatores de redução para resistência, rigidez e extensão a temperatura elevada

| Temperatura $\theta$ (°C)                              | Fator de redução $k_{p0,2,\theta}$ | Fator de redução $k_{2,\theta}$ | Fator de redução $k_{u,\theta}$ | Fator de redução $k_{E,\theta}$ | Fator de redução $k_{\epsilon u,\theta}$ |
|--|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| <b>Austenítico I</b><br><b>1.4301, 1.4307, 1.4318</b>  |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20   | 1,00                               | 1,31                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100  | 0,78                               | 1,02                            | 0,81                            | 0,96                            | 0,56                                     |
| 200  | 0,65                               | 0,88                            | 0,72                            | 0,92                            | 0,42                                     |
| 300  | 0,60                               | 0,82                            | 0,68                            | 0,88                            | 0,42                                     |
| 400  | 0,55                               | 0,78                            | 0,66                            | 0,84                            | 0,42                                     |
| 500  | 0,50                               | 0,73                            | 0,61                            | 0,80                            | 0,42                                     |
| 600  | 0,46                               | 0,68                            | 0,54                            | 0,76                            | 0,33                                     |
| 700  | 0,38                               | 0,54                            | 0,40                            | 0,71                            | 0,24                                     |
| 800  | 0,25                               | 0,35                            | 0,25                            | 0,63                            | 0,15                                     |
| 900  | 0,15                               | 0,18                            | 0,13                            | 0,45                            | 0,15                                     |
| 1000   | 0,07                               | 0,08                            | 0,08                            | 0,20                            | 0,20                                     |
| 1100   | 0,05                               | 0,06                            | 0,05                            | 0,10                            | -  |
| <b>Austenítico II</b><br><b>1.4401, 1.4404, 1.4541</b> |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20   | 1,00                               | 1,19                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100  | 0,86                               | 1,13                            | 0,87                            | 0,96                            | 0,56                                     |
| 200  | 0,72                               | 0,98                            | 0,80                            | 0,92                            | 0,42                                     |
| 300  | 0,67                               | 0,92                            | 0,78                            | 0,88                            | 0,42                                     |
| 400  | 0,62                               | 0,85                            | 0,77                            | 0,84                            | 0,42                                     |
| 500  | 0,60                               | 0,82                            | 0,74                            | 0,80                            | 0,42                                     |
| 600  | 0,56                               | 0,75                            | 0,67                            | 0,76                            | 0,33                                     |
| 700  | 0,50                               | 0,68                            | 0,51                            | 0,71                            | 0,24                                     |
| 800  | 0,41                               | 0,50                            | 0,34                            | 0,63                            | 0,15                                     |
| 900  | 0,22                               | 0,26                            | 0,19                            | 0,45                            | 0,15                                     |
| 1000   | 0,14                               | -                               | 0,10                            | 0,20                            | 0,20                                     |
| 1100   | 0,07                               | -                               | 0,07                            | 0,10                            | -  |
| <b>Austenítico III</b><br><b>1.4571</b>                |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20   | 1,00                               | 1,31                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100  | 0,89                               | 1,16                            | 0,88                            | 0,96                            | 0,56                                     |
| 200  | 0,82                               | 1,07                            | 0,81                            | 0,92                            | 0,42                                     |
| 300  | 0,77                               | 1,01                            | 0,79                            | 0,88                            | 0,42                                     |
| 400  | 0,72                               | 0,95                            | 0,79                            | 0,84                            | 0,42                                     |
| 500  | 0,69                               | 0,91                            | 0,77                            | 0,80                            | 0,42                                     |
| 600  | 0,65                               | 0,85                            | 0,71                            | 0,76                            | 0,33                                     |
| 700  | 0,59                               | 0,76                            | 0,57                            | 0,71                            | 0,24                                     |
| 800  | 0,51                               | 0,63                            | 0,38                            | 0,63                            | 0,15                                     |
| 900  | 0,29                               | 0,38                            | 0,23                            | 0,45                            | 0,15                                     |
| 1000   | 0,15                               | 0,18                            | 0,10                            | 0,20                            | 0,20                                     |
| <b>Duplex I</b><br><b>1.4362, 1.4062, 1.4482</b>       |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20   | 1,00                               | 1,15                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100  | 0,83                               | 0,94                            | 0,94                            | 0,96                            | 1,00                                     |
| 200  | 0,75                               | 0,82                            | 0,87                            | 0,92                            | 1,00                                     |
| 300  | 0,69                               | 0,77                            | 0,79                            | 0,88                            | 1,00                                     |
| 400  | 0,58                               | 0,70                            | 0,70                            | 0,84                            | 1,00                                     |
| 500  | 0,43                               | 0,59                            | 0,59                            | 0,80                            | 1,00                                     |
| 600  | 0,27                               | 0,45                            | 0,47                            | 0,76                            | 1,00                                     |
| 700  | 0,14                               | 0,28                            | 0,33                            | 0,71                            | 0,80                                     |
| 800  | 0,07                               | 0,14                            | 0,20                            | 0,63                            | 0,60                                     |
| 900  | 0,04                               | 0,05                            | 0,09                            | 0,45                            | 0,40                                     |

Tabela 8.2 Fatores de redução para resistência, rigidez e extensão a temperatura elevada (Continuação)

| Temperatura $\theta$ (°C)                           | Fator de redução $k_{p0,2,\theta}$ | Fator de redução $k_{2,\theta}$ | Fator de redução $k_{u,\theta}$ | Fator de redução $k_{E,\theta}$ | Fator de redução $k_{\epsilon u,\theta}$ |
|---|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| <b>Duplex II</b><br><b>1.4462, 1.4162, 1.4662</b>   |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20  | 1,00                               | 1,12                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100   | 0,82                               | 0,96                            | 0,96                            | 0,96                            | 0,87                                     |
| 200   | 0,70                               | 0,86                            | 0,91                            | 0,92                            | 0,74                                     |
| 300   | 0,65                               | 0,82                            | 0,88                            | 0,88                            | 0,74                                     |
| 400   | 0,60                               | 0,76                            | 0,82                            | 0,84                            | 0,74                                     |
| 500   | 0,53                               | 0,67                            | 0,71                            | 0,80                            | 0,74                                     |
| 600   | 0,42                               | 0,55                            | 0,56                            | 0,76                            | 0,74                                     |
| 700   | 0,27                               | 0,37                            | 0,38                            | 0,71                            | 0,44                                     |
| 800   | 0,15                               | 0,21                            | 0,22                            | 0,63                            | 0,14                                     |
| 900   | 0,07                               | 0,11                            | 0,14                            | 0,45                            | 0,14                                     |
| 1000  | 0,01                               | 0,03                            | 0,06                            | 0,20                            | 0,14                                     |
| <b>Ferrítico I</b><br><b>1.4509, 1.4521, 1.4621</b> |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20  | 1,00                               | 1,12                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100   | 0,88                               | 1,01                            | 0,93                            | 0,98                            | 1,00                                     |
| 200   | 0,83                               | 0,99                            | 0,91                            | 0,95                            | 1,00                                     |
| 300   | 0,78                               | 0,92                            | 0,88                            | 0,92                            | 1,00                                     |
| 400   | 0,73                               | 0,90                            | 0,82                            | 0,86                            | 0,75                                     |
| 500   | 0,66                               | 0,86                            | 0,78                            | 0,81                            | 0,75                                     |
| 600   | 0,53                               | 0,71                            | 0,64                            | 0,75                            | 0,75                                     |
| 700   | 0,39                               | 0,48                            | 0,41                            | 0,54                            | 0,75                                     |
| 800   | 0,10                               | 0,13                            | 0,11                            | 0,33                            | 0,75                                     |
| 900   | 0,04                               | 0,04                            | 0,03                            | 0,21                            | 0,75                                     |
| 1000  | 0,02                               | 0,02                            | 0,01                            | 0,09                            | 0,75                                     |
| <b>Ferrítico II</b><br><b>1.4003, 1.4016</b>        |                                    |                                 |                                 |                                 |  |
| 20  | 1,00                               | 1,19                            | 1,00                            | 1,00                            | 1,00                                     |
| 100   | 0,93                               | 1,12                            | 0,93                            | 0,98                            | 1,00                                     |
| 200   | 0,91                               | 1,09                            | 0,89                            | 0,95                            | 1,00                                     |
| 300   | 0,89                               | 1,04                            | 0,87                            | 0,92                            | 1,00                                     |
| 400   | 0,87                               | 1,08                            | 0,84                            | 0,86                            | 0,75                                     |
| 500   | 0,75                               | 1,01                            | 0,82                            | 0,81                            | 0,75                                     |
| 600   | 0,43                               | 0,48                            | 0,33                            | 0,75                            | 0,75                                     |
| 700   | 0,16                               | 0,18                            | 0,13                            | 0,54                            | 0,75                                     |
| 800   | 0,10                               | 0,12                            | 0,09                            | 0,33                            | 0,75                                     |
| 900   | 0,06                               | 0,09                            | 0,07                            | 0,21                            | 0,75                                     |
| 1000  | 0,04                               | 0,06                            | 0,05                            | 0,09                            | 0,75                                     |

### 8.3 Determinação da resistência ao fogo

A resistência ao fogo pode ser determinada por uma ou mais das seguintes abordagens:

- Métodos de cálculo simplificado aplicado a elementos individuais;
- Métodos de cálculo avançado;
- Ensaaios experimentais.

Os métodos de cálculo simplificado baseiam-se em suposições conservadoras. Os métodos de cálculo avançado são métodos de dimensionamento nos quais os princípios de engenharia são aplicados de forma realista a aplicações específicas. Quando não é dado nenhum modelo de cálculo simplificado, é necessário usar um

método de dimensionamento baseado num modelo de cálculo avançado ou um método baseado em resultados experimentais.

A EN 1993-1-2 pressupõe que os métodos de cálculo simplificados para o aço carbono também se apliquem ao aço inoxidável. No entanto, verificou-se que algumas destas regras são muito conservadoras para o aço inoxidável e espera-se que as regras modificadas apresentadas na Secção 8.3 sejam incluídas na próxima revisão da EN 1993-1-2:

1. Utilização de  $f_{p0,2,\theta}$  (em oposição a  $f_{2,\theta}$ ) para a determinação de:
  - resistência à encurvadura de colunas (todas as Classes de secção transversal)
  - resistência à flexão de vigas restringidas de Classe 4
  - resistência à flexão de vigas não restringidas (todas as Classes de secção transversal)
2. Utilização de um valor dependente da temperatura para  $\varepsilon$  para a classificação da secção transversal
3. Utilização de curvas de encurvadura de temperatura ambiente para colunas e vigas não restringidas

### 8.3.2 Classificação de secções transversais

No dimensionamento em situação de incêndio, deve ser adotado o método de classificação das secções transversais descrito na Secção 5 deste documento, utilizando um valor dependente da temperatura para  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} \quad (8.6)$$

Em alternativa pode ser adotado o seguinte valor conservador para  $\varepsilon$ , usando propriedades de cálculo a 20 ° C:

$$\varepsilon = 0,85 \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (8.7)$$

onde:

$k_{y,\theta}$  toma o valor de  $k_{p0,2,\theta}$  ou de  $k_{2,\theta}$ , em função da forma de carregamento e classe da secção (veja-se a Secção 8.2).

### 8.3.3 Elementos tracionados

O valor de cálculo da resistência  $N_{fi,\theta,Rd}$  de um elemento tracionado a temperatura uniforme  $\theta$  deve ser determinado por:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] \quad (8.8)$$

Onde:

$k_{2,\theta}$  é o fator de redução para a resistência a 2% da deformação total à temperatura  $\theta$ ;

$N_{Rd}$  é a resistência de cálculo da secção transversal  $N_{p1,Rd}$  à temperatura normal, de acordo com a Secção 5.7.2;

$\gamma_{M0}$  e  $\gamma_{M,fi}$  são coeficientes parciais de segurança, ver a Tabela 4.1 e Secção 8.1.



Quando a temperatura no elemento não é uniforme, a resistência de cálculo é dada por:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{2,\theta_i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (8.9)$$

onde:

$A_i$  é uma área elementar da secção transversal;

$\theta_i$  é a temperatura na área elementar  $A_i$ ;

$k_{2,\theta_i}$  é o fator de redução da tensão limite convencional de proporcionalidade a 2%, da deformação total, à temperatura  $\theta_i$  (ver Secção 8.2).

Alternativamente, a resistência de cálculo  $N_{fi,t,Rd}$ , no instante  $t$  de um elemento tracionado com uma distribuição de temperatura não uniforme, pode ser assumida de modo conservador como sendo igual à resistência de cálculo  $N_{fi,\theta,Rd}$  de um elemento tracionado com uma temperatura uniforme  $\theta$  igual à temperatura máxima  $\theta_{max}$  atingida no instante  $t$ .

### 8.3.4 Elementos comprimidos

A resistência de cálculo à encurvadura  $N_{b,fi,t,Rd}$  no instante de tempo  $t$  de um elemento comprimido sujeito a uma temperatura uniforme  $\theta$ , é dada por:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{para secções de Classes 1, 2 ou 3} \quad (8.10)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{para secções de Classe 4} \quad (8.11)$$

onde:

$k_{p0,2,\theta}$  é o fator de redução da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% à temperatura  $\theta$  (veja-se a Secção 8.2).

$\chi_{fi}$  é o coeficiente de redução para a encurvadura por flexão, dado por:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad \text{mas } \chi_{fi} \leq 1 \quad (8.12)$$

onde:

$$\phi_{\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right] \quad (8.13)$$

$\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  são os coeficientes de encurvadura à temperatura ambiente dados pela Tabela 6.1 ou Tabela 6.2.

A esbelteza modificada normalizada  $\bar{\lambda}_{\theta}$  à temperatura  $\theta$  é dada por:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[ \frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{para todas as classes de secção transversal} \quad (8.14)$$

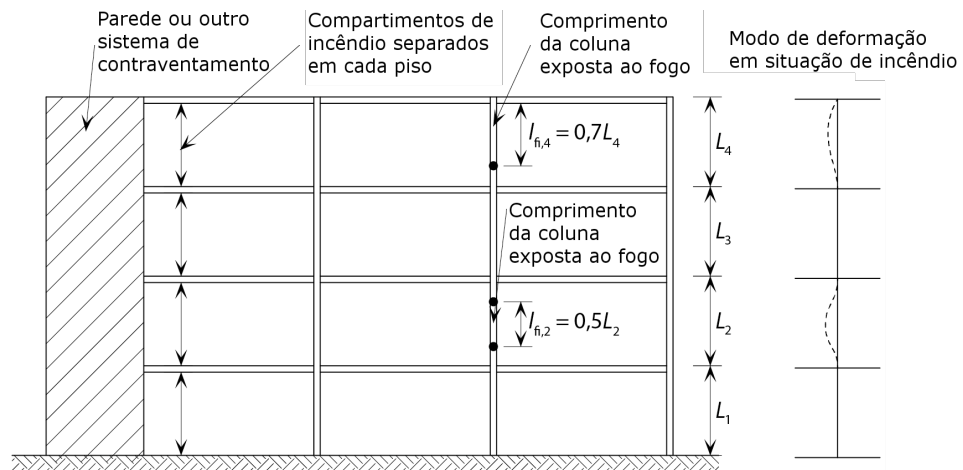
onde:

$k_{E,\theta}$  é o fator de redução para o declive do domínio elástico linear (ver Secção 8.2).

Se a temperatura do elemento não for uniforme, a resistência à compressão pode ser estimada de um modo conservador assumindo uma temperatura uniforme igual à temperatura máxima no elemento.

De um modo geral no dimensionamento ao fogo, o comprimento de encurvadura  $l_{fi}$  de uma coluna deve ser determinado como para o dimensionamento à temperatura normal. No entanto, num pórtico contraventado, o comprimento de encurvadura de uma coluna  $l_{fi}$  poderá ser determinado considerando-a encastrada nas colunas dos compartimentos por cima e por baixo do compartimento de incêndio, tanto para as ligações contínuas como semi-contínuas. Esta suposição só pode ser feita se a resistência ao fogo dos elementos do edifício que separam estes compartimentos de incêndio não for inferior à resistência ao fogo da coluna.

No caso de um pórtico contraventado em que cada piso constitua um compartimento de incêndio separado com resistência ao fogo suficiente, o comprimento de encurvadura de uma coluna num piso intermédio é dado por  $l_{fi} = 0,5L$  e no piso superior o comprimento de encurvadura é dado por  $l_{fi} = 0,7L$ , onde  $L$  é o comprimento da coluna no piso relevante, ver a Figura 8.1.



**Figura 8.1** Comprimentos de encurvadura  $l_{fi}$  de colunas em pórticos contraventados

### 8.3.5 Vigas restringidas lateralmente

O valor de cálculo do momento resistente  $M_{fi,\theta,Rd}$  de uma secção transversal à temperatura constante  $\theta$ , deve ser determinado a partir de:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left[ \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad \text{para secções de Classe 1, 2 ou 3} \quad (8.15)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{p0,2,\theta} M_{Rd} \left[ \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad \text{para secções de Classe 4} \quad (8.16)$$

onde:

$M_{Rd}$  é o valor de cálculo do momento plástico resistente da secção transversal bruta  $M_{pl,Rd}$  (Classe de secção transversal 1 ou 2), o momento elástico resistente da secção transversal bruta  $M_{el,Rd}$  (Classe de secção transversal 3) ou o momento resistente efetivo da secção transversal efetiva  $M_{eff,Rd}$  (Classe de secção transversal 4) para o cálculo em condições normais de temperatura.

$k_{2,\theta}$  e  $k_{p0,2,\theta}$  são como definidos na Secção 8.2.

Quando for necessário ter em conta os efeitos de corte, deve ser utilizado o momento resistente reduzido para o cálculo em condições de temperatura normal de acordo com a Secção 5.7.6.

O valor de cálculo do momento resistente  $M_{fi,t,Rd}$  no instante  $t$  de uma secção transversal num elemento com uma distribuição de temperatura não uniforme, pode ser determinado de forma conservadora a partir de:

$$M_{fi,t,Rd} = \left[ \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} \right] \quad (8.17)$$

onde:

$M_{fi,\theta,Rd}$  é o momento resistente de cálculo da secção transversal (ou secção transversal efetiva para secções transversais de Classe 4) à temperatura uniforme  $\theta$  correspondente à temperatura máxima na secção transversal;

$\kappa_1$  é um fator de adaptação para temperaturas não uniformes ao longo da secção transversal, ver Tabela 8.2;

$\kappa_2$  é um fator de adaptação para temperaturas não uniformes ao longo do vão da viga, ver Tabela 8.2.

Tabela 8.3 Fatores de adaptação

| Condição de exposição  | $\kappa_1$ |
|--|------------|
| para uma viga exposta ao fogo nos quatro lados   | 1,0        |
| para uma viga não protegida exposta ao fogo em três lados, com uma laje mista ou de betão no quarto lado | 0,70       |
| para uma viga protegida exposta ao fogo em três lados, com uma laje mista ou de betão no quarto lado     | 0,85       |
|  | $\kappa_2$ |
| nos apoios de uma viga estaticamente indeterminada   | 0,85       |
| em todos os restantes casos  | 1,0        |

O valor de cálculo da resistência ao corte  $V_{fi,t,Rd}$  no instante  $t$  de uma secção transversal com uma distribuição de temperatura não uniforme deve ser determinado a partir de:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{2,\theta_{web}} V_{Rd} \left[ \frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} \right] \quad \text{para secções de Classe 1, 2 ou 3} \quad (8.18)$$

$$V_{fi,t,Rd} = k_{p0,2,\theta_{web}} V_{Rd} \left[ \frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} \right] \quad \text{para secções de Classe 4} \quad (8.19)$$

onde:

$V_{Rd}$  é a resistência ao corte da secção transversal bruta para o cálculo a temperatura normal, de acordo com a Secção 5.7.5 (para temperaturas acima de 400 ° C,  $\eta$  deve ser tomado como 1,0).

$\theta_{web}$  é a temperatura na alma da secção.

### 8.3.6 Vigas não restringidas lateralmente

O momento resistente de cálculo à encurvadura  $M_{b,fi,t,Rd}$  no instante  $t$  de uma viga não restringida lateralmente deve ser determinada a partir de:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{para secções de Classe 1, 2} \quad (8.20)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{para secções de Classe 3} \quad (8.21)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{para secções de Classe 4} \quad (8.22)$$

onde:

$\chi_{LT,fi}$  é o fator de redução para a encurvadura lateral ao fogo, dado por:

$$\chi_{\Pi\bar{n}} = \frac{1}{\phi_{\Pi\bar{n}} + \sqrt{\phi_{\Pi\bar{n}}^2 - \bar{\lambda}_{\Pi\bar{n}}^2}} \quad \text{mas } \chi_{\Pi\bar{n}} \leq 1 \quad (8.23)$$

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right] \quad (8.24)$$

onde

$\alpha_{LT}$  é o fator de imperfeição a temperatura ambiente indicado na Secção 6.4.2.

$k_{p0,2,\theta}$  é o fator de redução definido na Secção 8.2 à temperatura máxima  $\theta$  atingida em qualquer lugar da secção.

A esbelteza não-dimensional  $\bar{\lambda}_{\Pi\bar{n}}$  à temperatura  $\theta$  é dada por:

$$\bar{\lambda}_{\Pi,\theta} = \bar{\lambda}_{\Pi} \left[ \frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{Para todas as Classes de secção transversal} \quad (8.25)$$

onde:

$k_{E,\theta}$  é o fator de redução definido na Secção 8.2 à temperatura  $\theta$ .

### 8.3.7 Elementos sujeitos a compressão axial e flexão

Para evitar a encurvadura prematura em torno do eixo de maior inércia e menor inércia e a encurvadura lateral, os efeitos combinados das cargas de compressão e dos momentos flectores devem ser verificados de acordo com as seguintes expressões:

a) Para secções de Classe 1, 2 ou 3

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{yfi,Ed}}{M_{yfi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.26)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min 1,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{\Pi} M_{yfi,Ed}}{\chi_{\Pi\bar{n}} M_{yfi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.27)$$

onde:

$N_{fi,Ed}$ ,  $M_{y,fi,Ed}$  e  $M_{z,fi,Ed}$  são as cargas axiais de cálculo e momentos fletores para a situação de incêndio;

$M_{y,fi,\theta,Rd}$  e  $M_{z,fi,\theta,Rd}$  são como definido na Secção 8.3.5;

$\chi_{min,fi}$  é o menor fator de redução para encurvadura por flexão, torção e flexão torção à temperatura  $\theta$ , conforme definido na Secção 8.3.4;

$\chi_{min1,fi}$  é o menor fator de redução para a encurvadura por flexão em torno do eixo z, encurvadura por torção e flexão torção à temperatura  $\theta$ , conforme definido na Secção 8.3.4;

$\chi_{LT,fi}$  é o fator de redução para a encurvadura lateral à temperatura  $\theta$ , conforme definido na Secção 8.3.6.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{\Gamma} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (8.28)$$

$$\mu_{\Gamma} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,\Gamma} - 0,15 \leq 0,9 \quad (8.29)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{yfi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (8.30)$$

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8 \quad (8.31)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (8.32)$$

$$\mu_z = (2\beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44\beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \text{ e } \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (8.33)$$

$\beta_M$  é um fator de momento uniforme equivalente, dado na Tabela 8.3.

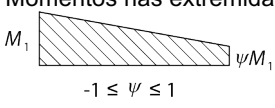
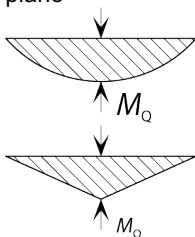
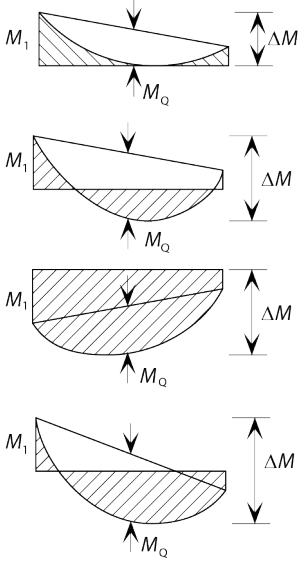
b) Para secções de Classe 4:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{yfi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{M_{yfi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.34)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min1,fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{\Gamma} M_{yfi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{\chi_{\Gamma fi} M_{yfi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.35)$$

Onde  $A$  deve ser substituído por  $A_{eff}$  nos termos definidos em (a), exceto no cálculo de  $k_y$ ,  $k_z$  e  $k_{LT}$ .

Tabela 8.4 Fatores de momento uniforme equivalente,  $\beta_M$

| Diagrama de momentos   | Fator de momento uniforme equivalente $\beta_M$   |
|--|---|
| <p>Momentos nas extremidades</p>  <p><math>M_1</math> <math>\psi M_1</math><br/><math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>  | $\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$  |
| <p>Momentos devido a cargas laterais no plano</p>  <p><math>M_Q</math> <math>M_Q</math></p>   | $\beta_{M,Q} = 1,3$<br><br>$\beta_{M,Q} = 1,4$  |
| <p>Momentos devido a cargas laterais no plano e momentos nas extremidades</p>  <p><math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math><br/> <math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math><br/> <math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math><br/> <math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math></p> | $\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ <p><math>M_Q =  \max M </math> devido apenas a carregamento lateral</p> <p>Para diagrama de momento sem mudança de sinal:<br/> <math>\Delta M =  \max M </math></p> <p>Para diagrama de momento com mudança de sinal:<br/> <math>\Delta M =  \max M  +  \min M </math></p> |

## 8.4 Propriedades térmicas para temperaturas elevadas

### 8.4.1 Extensão térmica

A extensão térmica do aço inoxidável austenítico  $\Delta l / l$  pode ser determinada a partir de:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(16 + 4,79 \times 10^{-3} \theta - 1,243 \times 10^{-6} \theta^2) \times (\theta - 20)}{10^6} \quad (8.36)$$

onde:

$l$  é o comprimento a 20°C

$\Delta l$  é o alongamento induzido pela temperatura

$\theta$  é a temperatura do aço (°C)

A Tabela 8.4 apresenta os valores para o coeficiente médio de expansão térmica para aços inoxidáveis austeníticos, duplex e ferríticos para diferentes gamas de temperatura.

Tabela 8.5 Coeficiente médio de expansão térmica

| Gama de temperatura do aço (°C) | Coeficiente médio de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C) |        |           |
|---------------------------------|--|--------|-----------|
|                                 | Austenítico  | Duplex | Ferrítico |
| 20 - 100                        | 16,7   | 13,2   | 10,3      |
| 20 - 200                        | 17,2   | 13,9   | 10,7      |
| 20 - 300                        | 17,7   | 14,3   | 11,1      |
| 20 - 400                        | 18,1   | 14,7   | 11,5      |
| 20 - 500                        | 18,4   | 15,1   | 11,8      |
| 20 - 600                        | 18,8   | 15,4   | 12,0      |
| 20 - 700                        | 19,1   | 15,9   | 12,4      |
| 20 - 800                        | 19,4   | 16,3   | 12,9      |
| 20 - 900                        | 19,4   | 16,7   | 13,4      |
| 20 - 1000                       | 19,7   | 17,1   | 14,0      |
| 20 - 1100                       | 20   | 17,5   | -         |

#### 8.4.2 Calor específico

O calor específico  $c$  pode ser determinado a partir de:

Para aços inoxidáveis austeníticos e duplex:

$$c = 450 + 0,28 \times \theta - 2,91 \times 10^{-4} \theta^2 + 1,34 \times 10^{-7} \theta^3 \quad \text{J/kg}^\circ\text{C} \quad (8.37)$$

Para aços inoxidáveis ferríticos:

$$c = 430 + 0,26 \times \theta \quad \text{J/kg}^\circ\text{C} \quad (8.38)$$

Atualmente a EN 1993-1-2 fornece apenas a Equação (7.37). Espera-se que a Equação (7.38) seja introduzida na próxima revisão da EN 1993-1-2.

#### 8.4.3 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica  $\lambda$  pode ser determinada da seguinte forma:

Para aços inoxidáveis austeníticos e duplex:

$$\lambda = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2} \theta \quad \text{W/m}^\circ\text{C} \quad (8.39)$$

Para aços inoxidáveis ferríticos:

$$\lambda = 20,4 + 2,28 \times 10^{-2} \theta - 1,54 \times 10^{-5} \theta^2 \quad \text{W/m}^\circ\text{C} \quad (8.40)$$

Atualmente a EN 1993-1-2 apenas fornece a Equação (7.39). Espera-se que a Equação (7.40) seja introduzida na próxima revisão da EN 1993-1-2.

#### 8.4.4 Cálculo do aumento da temperatura no aço inoxidável

O método para calcular o aumento de temperatura no aço carbono também pode ser aplicado ao aço inoxidável. O aumento incremental da temperatura de uma secção de aço inoxidável, sem proteção de superfície e uniformemente aquecida, no intervalo de tempo  $\Delta t$ , é dado por:

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c \rho} \dot{h}_{\text{net,d}} \Delta t \quad (8.41)$$

onde:

$c$  é a capacidade térmica específica do aço inoxidável (J/kgK) (Secção 8.4.2);

$\rho$  é a densidade do aço inoxidável (kg/m<sup>3</sup>), como dado na Tabela 2.7 (usualmente considerada como independente da temperatura);

$A_m/V$  é o fator de massividade para elementos de aço desprotegidos;

$A_m$  é a área de superfície exposta do elemento por unidade de comprimento;

$V$  é o volume do elemento por unidade de comprimento;

$\dot{h}_{\text{net,d}}$  é o valor de cálculo do fluxo útil de calor por unidade de área.

$$= \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad (8.42)$$

No qual:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\theta_g - \theta) \quad (8.43)$$

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \phi \varepsilon_{\text{res}} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4] \quad (8.44)$$

$\alpha_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção (usualmente considerado como 25 W/m<sup>2</sup>K);

$\theta_g$  é a temperatura ambiente do gás do compartimento de incêndio (°C), dada pela curva nominal temperatura-tempo;

$\theta$  é a temperatura da secção de aço que é assumida como uniforme no tempo  $t$  (°C);

$\phi$  é o fator de configuração;

$\varepsilon_{\text{res}}$  é a emissividade resultante.

O parâmetro  $\varepsilon_{\text{res}}$  representa a radiação transmitida entre o fogo e a superfície de aço inoxidável e sua magnitude depende do grau de exposição direta do elemento ao fogo. Elementos que são parcialmente protegidos dos efeitos radiantes do calor têm um valor menor de  $\varepsilon_{\text{res}}$ . Para o aço inoxidável, a EN 1993-1-2 recomenda um valor de  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,4$ .

A equação indicada acima para o aumento incremental da temperatura pode ser usada para determinar as temperaturas do aço por integração incremental, se a variação da temperatura do fogo com o tempo for conhecida. A curva nominal temperatura-tempo para um fogo celulósico é dada na EN 1991-1-2 como:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (8.45)$$

onde:

$t$  é o tempo decorrido (minutos)



## 8.5 Definição do material a temperaturas elevadas

A curva tensão-extensão a temperaturas elevadas pode ser calculada a partir das expressões abaixo. Note-se que o ANEXO C fornece expressões equivalentes para a modelação da curva tensão-extensão à temperatura ambiente.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{\theta}} + 0,002 \left[ \frac{\sigma}{f_{p0,2,\theta}} \right]^{n_{\theta}} \quad \text{para } \sigma \leq f_{p0,2,\theta} \quad (8.46)$$

A segunda fase da curva tensão-extensão pode ser expressa em termos de  $f_{2,\theta}$  (Equação (8.47)) ou  $f_{u,\theta}$  (Equação (8.48)):

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \left( 0,02 - \varepsilon_{p0,2,\theta} - \frac{(f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta})}{E_{p0,2,\theta}} \right) \times \left[ \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right]^{m_{\theta,2}} + \varepsilon_{p0,2,\theta}$$

para  $f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta}$  (8.47)

ou

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \varepsilon_{u,\theta} \left( \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{p0,2,\theta} \quad \text{para } f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta} \quad (8.48)$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão;

$\varepsilon$  é a extensão;

$f_{2,\theta}$  é a tensão a 2% da deformação total à temperatura  $\theta$ ;

$\varepsilon_{p0,2,\theta}$  é a tensão total correspondente a  $f_{p0,2,\theta}$ ;

$E_{p0,2,\theta}$  é o módulo tangencial a  $f_{p0,2,\theta}$ ;

$\varepsilon_{u,\theta}$  é a extensão na tensão última  $f_{u,\theta}$  ( $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon_u$ );

$n_{\theta}$ ,  $m_{\theta}$  and  $m_{\theta,2}$  são expoentes que definem o grau de não-linearidade material à temperatura  $\theta$ .

$\varepsilon_{u,\theta}$  pode ser determinada a partir da expressão da temperatura ambiente para  $\varepsilon_u$  dada no ANEXO C, com valores de temperatura elevada para a resistência.

Para  $n_{\theta}$  podem ser adotados os mesmos valores de temperatura ambiente para  $n$ . Os valores para  $m_{\theta}$  and  $m_{\theta,2}$  podem ser determinados usando a expressão para temperatura ambiente para  $m$ , mas com valores de temperatura elevada para  $f_{p0,2,\theta}$  e  $f_{u,\theta}$ .

Atualmente a EN 1993-1-2 apresenta um modelo de material diferente para o aço inoxidável em relação ao método supracitado. No entanto, espera-se que o modelo dado pelas Equações (8.46), (8.47) e (8.48) seja introduzido na próxima revisão da EN 1993-1-2 porque, tal como uma formulação Ramberg-Osgood modificada, é consistente com a formulação amplamente adotada para o comportamento à temperatura ambiente (ANEXO C). O novo modelo também é mais preciso e menos complexo, usando parâmetros com significado físico

## 9 FADIGA

Em estruturas ou partes de estruturas que estejam sujeitas a tensões significativas de forma repetida deve ser considerada a fadiga. Normalmente, não é necessária uma avaliação da fadiga para as estruturas de edifícios, exceto para os elementos que suportam dispositivos de elevação, cargas de rolamento ou máquinas vibratórias, e para os elementos sujeitos a oscilações induzidas pelo vento.

Em estruturas comuns em aço carbono, a combinação de concentrações de tensões e defeitos nas ligações soldadas leva a que esses locais sejam invariavelmente mais propensos à falha de fadiga do que outras partes da estrutura. As orientações sobre a estimativa da resistência à fadiga das estruturas em aço carbono são aplicáveis aos aços inoxidáveis austeníticos e duplex (ver EN 1993-1-9).

Muito pode ser feito para reduzir a suscetibilidade de uma estrutura à fadiga, adotando boas práticas de projeto; nomeadamente selecionar cuidadosamente a configuração estrutural geral e escolher cuidadosamente pormenores construtivos que contribuem para a resistência à fadiga. A chave para uma conceção resistente à fadiga é uma consideração racional da fadiga desde o início do processo de dimensionamento. A verificação da fadiga apenas depois de terem sido satisfeitos os outros critérios de conceção pode resultar numa estrutura inadequada ou dispendiosa. Também é importante considerar as necessidades do fabricante e do construtor. Recomenda-se, portanto, que sejam realizadas consultas precoces com os intervenientes para identificar as áreas da estrutura mais sensíveis à fadiga, discutir precauções especiais e tomar conhecimento de problemas de fabricação e montagem. Em particular, durante a avaliação à fadiga deve ser considerado a utilização de furos ou acessórios de elevação para facilitar o processo de fabricação ou de montagem.

Pode ser possível eliminar possíveis problemas de fadiga, tendo em conta os detalhes de construção e evitando:

- mudanças acentuadas nas secções transversais e nas tensões em geral;
- desalinhamentos e excentricidades;
- pequenas descontinuidades como arranhões ou marcas de moagem;
- soldaduras desnecessárias de ligações secundárias, como por exemplo dispositivos de içamento;
- soldaduras com penetração parcial, soldaduras de ângulos, soldadura intermitente e cobre-juntas;
- desvios do arco elétrico durante a soldadura.

Embora as técnicas utilizadas para melhorar o processo de soldadura, como o controlo do perfil, retificação da raiz da soldadura e processos de tratamento superficial, possam melhorar a resistência à fadiga de uma ligação, não existem dados suficientes para quantificar os possíveis benefícios para os aços inoxidáveis. Deve-se também notar que todas as técnicas exigem trabalho intensivo e requerem habilidade e experiência do operador, para tirar o máximo proveito. Estas técnicas não devem, exceto em casos especiais, ser vistas como uma opção de dimensionamento.



## 10 TESTES

### 10.1 Introdução

A realização de ensaios em materiais e elementos constituídos por aço inoxidável pode ser necessário por várias razões:

- Se for vantajosa a melhoria da resistência dos cantos em elementos enformados a frio (ver Secção 2.2.1);
- Se a geometria de um elemento for tal que se encontre fora dos limites de aplicabilidade da regulamentação (como as dadas na Secção 5.2);
- Se um número de estruturas ou componentes for baseado em testes de um protótipo;
- Se for necessária a confirmação da uniformidade da produção.

As precauções e requisitos habituais para os procedimentos dos ensaios e para a avaliação de resultados dos testes de aço carbono também se aplicam aos testes de aço inoxidável. Por conseguinte, geralmente é recomendado que tais requisitos sejam consultados, por exemplo, ver a Secção 5.2 e Anexo D da EN 1990 e Secção 9 e Anexo A da norma EN 1993-1-3. No entanto, existem aspetos específicos do comportamento dos aços inoxidáveis que precisam ser mais pensados para a realização dos testes do que talvez para o caso dos aços carbono.

### 10.2 Determinação das curvas tensão-deformação

Ao realizar ensaios de tração em aço inoxidável, recomenda-se que o carregamento seja realizado por pinos que passam através das extremidades do provete, que têm área suficiente para resistir o esforço de corte. Isto é, assegurar que o provete é carregado axialmente, permitindo assim que a forma real da curva de tensão-extensão seja corretamente obtida, sem qualquer efeito errado causado pela cedência de material prematura devido à excentricidade da carga. O desvio axial da carga pode ser confirmado por testes elásticos com extensómetros colocados com várias orientações sobre a amostra. Uma vez que o aço inoxidável apresenta um grau de anisotropia (diferentes características de tensão-deformação paralelamente e transversalmente às direções de laminagem), com maior resistência transversalmente à direção de laminagem, recomenda-se que seja dada a devida consideração à orientação dos provetes. Os aços inoxidáveis têm uma forte dependência relativamente à taxa de deformação para a verificação das propriedades de tração, pelo que se recomenda o uso da mesma taxa de deformação que foi utilizada para estabelecer o certificado de fabrico.

### 10.3 Testes em elementos

Recomenda-se que os testes em elementos sejam feitos em escala real ou o mais próximo possível desta, dependendo das instalações de teste, e que os provetes sejam fabricados pelos mesmos processos de fabricação a serem utilizados na estrutura final. Se os componentes são soldados, o provete deve ser soldado da mesma maneira.

Devido à anisotropia, recomenda-se que os provetes sejam preparados a partir da chapa ou placa na mesma orientação (isto é, transversalmente ou paralelamente à direção de laminagem) como pretendido para a estrutura final. Se a orientação final é desconhecida ou não pode ser garantida, pode ser necessário realizar testes para

ambas as orientações e tomar o conjunto de resultados menos favorável. Para materiais endurecidos, a resistência à tração e à compressão deve ser determinada na direção em questão. A avaliação dos resultados dos ensaios deve ser efetuada tendo a tensão nominal como referência.

Os aços inoxidáveis apresentam maior ductilidade e maior resistência à deformação do que os aços carbono e, portanto, as capacidades da estrutura de reação podem ter de ser maiores do que as necessárias para testar elementos de aço carbono com uma resistência mecânica equivalente. Isto não se aplica apenas à capacidade da estrutura de reação, mas também à capacidade da estrutura para permitir uma maior deformação do provete.

Deve-se notar que em provetes com maiores dimensões, os efeitos de fluência tornam-se mais evidentes e isso pode levar a que as leituras da deformação ou do deslocamento não estabilizem dentro de um tempo razoável.

# 11 ASPETOS DE FABRICAÇÃO

## 11.1 Introdução

O objetivo desta Secção é destacar aspetos relevantes da fabricação de aço inoxidável para o projetista, incluindo recomendações de boas práticas. Também permite realizar uma avaliação preliminar da adequação de um fabricante para realizar o trabalho.

O aço inoxidável não é um material difícil de se trabalhar. No entanto, em alguns aspetos é diferente do aço carbono e deve ser tratado em conformidade. Muitos processos de fabricação e de ligação são semelhantes aos usados para o aço carbono, mas as diferentes características do aço inoxidável requerem atenção especial em diversas áreas. É importante que seja estabelecida uma comunicação eficaz entre o projetista e o fabricante no início do projeto para assegurar que são adotadas as práticas apropriadas de fabricação.

Um objetivo primordial é manter a resistência à corrosão do aço. É essencial que sejam tomadas precauções em todas as fases de armazenamento, manuseamento e conformação, para minimizar as influências que comprometem a formação da camada passiva auto-reparadora. Deve-se ter especial cuidado ao restaurar a resistência à corrosão da zona soldada. Embora as precauções a tomar sejam simples, são em geral, questões de boa prática de engenharia.

É importante preservar a boa aparência superficial do aço inoxidável ao longo do processo de fabricação. As manchas superficiais não são apenas desagradáveis, mas também são geralmente inaceitáveis e corrigi-las é um processo moroso. Enquanto que as imperfeições superficiais normalmente ficam ocultas pela pintura em estruturas de aço carbono, isso raramente será o caso para as estruturas em aço inoxidável.

A forma estrutural pode ser ditada pela disponibilidade dos materiais. Deve-se reconhecer que a gama disponível de secções em aço inoxidável laminadas a quente é mais limitada que a dos aços carbono. Isto resulta numa maior utilização de elementos enformados a frio e soldados do que o normalmente encontrado. Além disso, devido ao comprimento da quinadeira, apenas podem ser enformados comprimentos relativamente curtos, o que leva a um maior uso de emendas. Ao detalhar as ligações, devem ser consideradas as folgas para os parafusos próximos aos raios de curvatura e para potenciais problemas de montagem resultantes da distorção devido ao processo de soldadura.

## 11.2 EN-1090 Execução de estruturas em aço e estruturas em alumínio

A fabricação e a montagem de aço inoxidável estrutural devem ser realizadas de acordo com a EN 1090. Os produtos de construção fabricados de acordo com a EN 1090 devem ter marcação CE para serem utilizados no Espaço Económico Europeu. A EN 1090 abrange produtos austeníticos, duplex e ferríticos acabados a frio e acabados a quente.

A Parte 1 da EN 1090 corresponde aos *Requisitos de avaliação da conformidade de componentes estruturais*. Esta Parte descreve como os fabricantes podem demonstrar que os componentes que produzem cumprem as características de desempenho

estabelecidas (as características estruturais que as tornam adequadas para o seu uso e função particulares).

A Parte 2 da EN 1090 corresponde aos *Requisitos técnicos para estruturas em aço*. Esta Parte especifica os requisitos na execução de estruturas em aço para garantir níveis adequados de resistência mecânica, estabilidade, facilidade de manutenção e durabilidade. Esta parte também determina as características de desempenho dos componentes que o fabricante deve atingir e declarar através dos requisitos da Parte 1. São também incluídos os requisitos técnicos para uma vasta gama de estruturas de aço carbono e aço inoxidável, tratando tanto os produtos laminados a quente como a frio. Esta parte aplica-se a componentes estruturais em edifícios e outras estruturas similares.

### 11.3 Classes de execução

A classe de execução deve ser especificada de acordo com o Anexo C (normativo) da EN 1993-1-1. Existem quatro classes de execução que variam desde EXC4 (mais oneroso) a EXC1 (menos oneroso). A principal razão para existirem quatro classes de execução é associar um nível de fiabilidade versus os modos de rotura que é combinado tanto com as consequências de rotura para a estrutura, componente ou detalhe, como com os requisitos de execução. Cada classe refere-se a um conjunto de requisitos de fabrico e construção *in situ* que constam do Anexo A.3 da EN 1090-2. A classe de execução é utilizada nas metalomecânicas para implementar um conjunto de processos de fabricação que fazem parte de um sistema certificado de controlo da produção em fábrica (FPC) para marcação CE do aço fabricado. Deste modo é possível associar as empresas de fabricação a um dos quatro conjuntos de processos de controlo da qualidade, limitando assim as estruturas que cada metalomecânica pode fabricar; por exemplo uma metalomecânica com um sistema certificado FPC EXC2 só pode fabricar estruturas EXC1 e 2. Os clientes, os projetistas e os donos da obra podem, portanto, usar a classe de execução para identificar metalomecânicos com o nível correto de controlo da qualidade e garantia. A classe de execução também é utilizada por projetistas para determinar o nível correto do controlo da qualidade e garantia necessárias durante a fabricação para atender às suas premissas de projeto.

A classe de execução é especificada para as obras como um todo, para um componente individual e para um detalhe de um componente. Nalguns casos a classe de execução para uma estrutura, para os componentes e para os detalhes serão os mesmos, enquanto noutros casos a classe de execução para os componentes e para os detalhes podem ser diferentes da classe de execução da restante estrutura.

Os fatores que regem a seleção da classe de execução são:

- A fiabilidade exigida (com base na classe de consequências exigida ou na classe de fiabilidade ou em ambos, tal como definido na EN 1990);
- Tipo de estrutura, componente ou detalhe;
- Tipo de carga para a qual a estrutura, componente ou detalhe é projetado (estática, quase-estática, fadiga ou sísmica).

Embora cada edifício tenha de ser considerado por si só, a classe de execução 2 (EXC2) é apropriada para a maioria dos edifícios construídos em zonas não sísmicas. EXC4 deve ser aplicado a estruturas com consequências extremas no caso da rotura da estrutura. O anexo nacional da EN 1993-1-1 dá orientações sobre a seleção da classe de execução.

Uma sobre-especificação da classe de execução deve ser evitada sempre que possível, para evitar custos desnecessários. Por exemplo, EXC2 pode ser a classe de

execução imposta para um projeto, mas a rastreabilidade completa (um requisito para EXC3) pode ser necessária em vez da exigência de rastreabilidade parcial (ou lote) do EXC2. Nesse caso, em vez de especificar EXC3 com base na obtenção desta cláusula única, sugere-se especificar a EXC2, mas com um maior nível de rastreabilidade adicionado à especificação.

## 11.4 Armazenamento e manuseamento

Em geral, em comparação com o aço carbono, é necessário maior cuidado no armazenamento e manuseamento do aço inoxidável para evitar danificar o acabamento superficial (especialmente para acabamentos brilhantes recozidos ou polidos). É também necessário evitar a contaminação por aço carbono e ferro, para diminuir o potencial de corrosão superficial. Os procedimentos de armazenamento e manuseamento devem ser previamente acordados entre as partes interessadas. Como exemplo, os procedimentos devem abranger os seguintes itens:

- O aço deve ser inspecionado imediatamente após a sua entrega para averiguar qualquer dano de superfície.
- O aço poderá ter um plástico protetor ou outro revestimento, que deve ser aí deixado o máximo de tempo possível, removendo-o apenas antes da fabricação final. Se for necessária cobertura protetora, então deve ser especificada no documento de aquisição (por exemplo, para acabamentos recozidos brilhantes).
- Se for utilizada uma película adesiva de plástico descascável em vez de uma folha de plástico, ela deve ser classificada como UV para evitar a sua deterioração prematura e a contaminação residual da superfície adesiva. Além disso, o estado da película deve ser monitorizada de modo que seja removida dentro da vida útil sugerida pelo fabricante, que geralmente é de até 6 meses.
- Deve ser evitado o armazenamento em atmosferas húmidas carregadas com sais. Se isso for inevitável, a embalagem deve evitar a intrusão dos sais. Devem ser removidas as películas descartáveis, porque estas películas são permeáveis aos sais e à humidade e criam as condições ideais para que ocorra a fissuração por corrosão.
- As prateleiras para o armazenamento não devem ter superfícies de fricção em aço carbono, devendo ser protegidas por ripas de madeira, borracha ou plástico. As chapas e as placas devem, de preferência, ser empilhadas verticalmente; as chapas empilhadas horizontalmente podem ser pisadas com risco de haver contaminação por ferro e danos na superfície.
- Deve ser evitado equipamento de elevação em aço carbono, como por exemplo, correntes, ganchos e grampos. O uso de materiais de isolamento, ou o uso de ventosas, irá impedir a contaminação do ferro. As forquilhas das empilhadores também devem ser protegidas.
- Deve ser evitado o contato com produtos químicos, incluindo ácidos, produtos alcalinos, óleos e gorduras (que podem manchar alguns acabamentos).
- Idealmente, devem ser usadas áreas de fabricação separadas para aço carbono e aço inoxidável. Apenas devem ser usadas as ferramentas dedicadas ao aço inoxidável (isto aplica-se particularmente às rodas de esmerilamento e às escovas de arame). Note que as escovas de arame e a palha de aço devem ser de aço inoxidável e geralmente de uma classe que seja equivalente em termos de resistência à corrosão (por exemplo, não se devem utilizar escovas de aço ferrítico ou aço inoxidável austenítico num aço inoxidável com maior resistência à corrosão).
- Como precaução durante a fabricação e montagem, é aconselhável assegurar que sejam removidas rebarbas afiadas formadas durante operações de corte.



- Devem ser considerados todos os requisitos necessários para proteger o produto final durante o transporte.

A ASTM A380 fornece as orientações sobre a remoção de contaminações.

## 11.5 Operações de enformação

Os aços inoxidáveis austeníticos encruam significativamente durante o trabalho a frio. Isto pode ser tanto uma propriedade útil, permitindo a enformação extensiva sem que ocorra risco de fratura prematura, e uma desvantagem, especialmente durante a maquinagem, quando é necessária especial atenção à velocidade de corte. A taxa de encruamento difere para as diferentes classes, por exemplo a classe 1.4318 tem uma taxa de encruamento superior à taxa das outras classes utilizadas em aplicações de construção. É mais fácil proceder à perfilagem em aços inoxidáveis ferríticos do que em aços inoxidáveis austeníticos.

### 11.5.1 Corte

O aço inoxidável é um material relativamente caro em comparação com outros metais e é necessário cuidado na marcação de placas e chapas para evitar desperdício durante a operação de corte. Note-se que pode resultar mais desperdício se o material tiver um grão de polimento (ou um padrão unidirecional) que tem que ser mantido na fabricação. Algumas canetas/lápis para a marcação são difíceis de remover, ou causam manchas, se forem utilizadas diretamente na superfície (em vez de no filme protetor). Todos os marcadores devem ser verificados antes da sua utilização, bem como quaisquer solventes utilizados para remover as marcas.

Os aços inoxidáveis podem ser cortados utilizando métodos convencionais, como por exemplo, por guilhotina ou por serra, contudo será necessária uma maior quantidade de energia do que a consumida quando se realiza o corte de espessuras semelhantes em aço carbono, devido ao encruamento. Se possível, o corte (e a maquinação em geral) devem ser realizados quando o metal estiver no estado recozido (suavizado), para limitar o encruamento e o desgaste da ferramenta.

As técnicas de arco de plasma são úteis para cortar chapas espessas e perfis até 125 mm de espessura e onde os bordos de corte devem ser maquinados, por exemplo, para a preparação do processo soldadura. O corte por jato de água é apropriado para materiais até 200 mm de espessura, sem que ocorra aquecimento, distorção ou alteração das propriedades do aço inoxidável. O corte a laser é adequado para aço inoxidável, particularmente quando são necessárias tolerâncias mais rigorosas ou quando se cortam formas ou padrões não lineares: podem ser produzidos cortes com boa qualidade e com pouco risco de ocorrer distorção. Para cortar linhas retas, o corte de guilhotina é bastante utilizado. Através da utilização de guilhotinas de ponta aberta, pode ser conseguido um corte contínuo com um comprimento maior do que o das lâminas de corte, embora com o risco de introduzir descontinuidades na aresta de corte. O corte com oxiacetileno não é aconselhado para cortar aço inoxidável, a menos que seja utilizada uma técnica com fluxo em pó.

### 11.5.2 Enformação a frio

O aço inoxidável é facilmente moldado por técnicas de enformação a frio vulgarmente usadas tais como a quinagem, estampagem, prensa e punção. Para aplicações estruturais, a prensa de freio é a técnica mais usada, no entanto, para produtos de calibre fino de alto volume, a enformação por rolos pode ser mais econômica.

Mais uma vez, o requisito de potência para enformar aço inoxidável será maior do que para enformar aço carbono devido ao encruamento (cerca de 50% no caso dos aços

inoxidáveis austeníticos ou mais no caso das classes duplex). Além disso, o aço inoxidável tem que ser sobre-dobrado mais vezes que o aço de carbono para neutralizar os efeitos do retorno do material. Os aços inoxidáveis ferríticos não sofrem encruamento significativo quando enformados a frio. Para secções transversais complexas, é aconselhável envolver o fabricante o mais cedo possível no projeto.

A ductilidade elevada do aço inoxidável permite a formação de raios pequenos, talvez até metade da espessura dos materiais recozidos. No entanto, geralmente é recomendado adotar os seguintes raios internos como mínimos:

- $t$  para classes austeníticas;
- $2t$  para classes duplex;
- $2t$  para classes ferríticas.

Onde  $t$  é a espessura do material.

Tal como acontece com o aço carbono, a enformação a frio pode conduzir a uma redução da tenacidade do aço inoxidável. Se a tenacidade for uma exigência, o projetista deve considerar as consequências do processo de enformação a frio na tenacidade do material; por exemplo, realizando testes numa chapa de amostra. A redução na tenacidade nas classes austeníticas devido à enformação a frio não é significativa.

Ao dobrar tubos circulares, devem ser cumpridas as seguintes condições:

- a relação do diâmetro exterior do tubo com a espessura,  $d/t$ , deve ser inferior a 15 (para evitar ferramentas dispendiosas);
- o raio de curvatura (na linha central do tubo) não deve ser inferior a  $1,5d$  ou  $d + 100$  mm, consoante o que for maior;
- qualquer cordão de soldadura deve ser posicionado próximo ao eixo neutro para reduzir as tensões devidas à flexão na soldadura.

A razão  $d/t$  deve ser definida por um profissional experiente. Em alternativa, devem ser realizados ensaios de pré-produção para assegurar que a dobra não cause danos mecânicos e as tolerâncias dimensionais sejam aceitáveis. Para tubos com  $d < 100$  mm, pode ser aplicável uma condição menos restritiva do raio de curvatura, isto é, o raio não deve ser inferior a  $2,5d$ . As implicações da curvatura sobre a resistência à encurvadura podem ter de ser consideradas pelo projetista.

### 11.5.3 Furos

Os furos podem ser furados, perfurados ou cortados por laser. Na perfuração, o deve evitado o endurecimento por encruamento, o que requer ferramentas afiadas com ângulos e velocidades de corte corretos. O uso de uma punção central com ponta redonda não é recomendado, porque facilita encruamento da superfície; deve ser usada uma broca central. No entanto se for usada uma punção central, ela deve ser do tipo triangular. Os furos perfurados podem ser feitos em aço inoxidável austenítico até cerca de 20 mm de espessura. A maior resistência das classes duplex resultam numa menor limitação da espessura. O diâmetro mínimo do furo é 2 mm maior que a espessura da chapa.

## 11.6 Soldadura

### 11.6.1 Introdução

A norma relevante para a soldadura de aços inoxidáveis é a EN 1011-3 *Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Arc welding of stainless steels*. A secção abaixo é uma breve introdução à soldadura de aços inoxidáveis.

Geralmente os aços inoxidáveis austeníticos são facilmente soldados usando processos comuns, desde que sejam usados consumíveis de soldadura adequados. Os aços inoxidáveis duplex requerem maior controle do calor introduzido durante a soldadura podendo exigir tratamento térmico pós-soldadura ou consumíveis especiais de soldadura.

A limpeza geral e a ausência de contaminantes são importantes para se obter uma soldadura com boa qualidade. Óleos ou outros hidrocarbonetos, sujidade e outros detritos, películas plásticas removíveis e marcas de cera devem ser removidos para evitar a sua decomposição e o risco de carbonização e de contaminação da superfície de soldadura. A soldadura não deve ter zinco, incluindo o que resulta de produtos galvanizados, de cobre e das suas ligas.

É mais importante no aço inoxidável do que no aço carbono reduzir os locais onde a corrosão de fenda se possa iniciar (ver a Secção 3.2.2). Deficiências de soldadura tais como corte, falta de penetração, salpicos de soldadura, escória e dispersão do arco devem ser minimizados. A dispersão do arco ou a perda da ligação do arco à terra também danificam a camada passiva e, possivelmente, dão origem à corrosão de fenda, arruinando assim a aparência de fabricação.

Sempre que a aparência da soldadura seja importante, o engenheiro deve especificar o perfil pós-soldado e a condição exigida para a superfície. Isso pode influenciar o processo de soldadura selecionado ou o tratamento pós soldadura. Deve-se também considerar a localização da soldadura.

O engenheiro deve estar ciente de que a distorção da soldadura geralmente é maior no aço inoxidável do que no aço carbono (ver Secção 11.6.4). O calor introduzido e a temperatura a cada passagem devem ser controlados para minimizar a distorção e evitar possíveis problemas metalúrgicos (ver Secção 11.6.5).

A soldadura deve ser realizada com base em procedimentos qualificados utilizando os processos específicos de soldadura (WPS), de acordo com a norma EN ISO 15609, EN ISO 14555 ou EN ISO 15620. Os soldadores devem ser qualificados de acordo com a EN ISO 9606-1 e os operadores de soldadura em conformidade com a norma EN ISO 14732. A EN 1090-2 especifica o nível de conhecimentos técnicos necessários para o pessoal de coordenação da soldadura, que depende da classe de execução, do grupo do aço inoxidável e da espessura do material a ser soldado.

Os procedimentos de soldadura contêm os seguintes requisitos:

- verificação do método de soldadura detalhando os requisitos de soldadura e teste dos procedimentos de soldadura;
- qualificações dos soldadores;
- controlo das operações de soldadura durante a preparação, durante a realização da soldadura e pós-soldadura;
- nível de inspeção e técnicas de ensaios não-destrutivos a aplicar;
- critérios de aceitação para o nível permitido de defeitos na soldadura.

Nunca deve ser permitido trancar a porca do parafuso numa soldadura, uma vez que o material é dimensionado para a resistência e não para a soldadura por fusão. A perturbação das roscas do parafuso (isto é, tornando-as mais espessas nas extremidades) pode ser uma alternativa aceitável para fixar as porcas no seu lugar.

## 11.6.2 Processos

Como mencionado em cima, os métodos convencionais de soldadura por fusão podem ser utilizados no aço inoxidável. A Tabela 11.1 mostra a adequação de vários processos para intervalos de espessura, etc.

Tabela 11.1 Processos de soldadura e a sua adequação

| Processo de soldadura (EN ISO 4063)   | Formas adequada do produto | Tipos de juntas | Gama de espessura do material                  | Posição de soldadura | Condições do local de soldadura |
|---|----------------------------|-----------------|--|----------------------|---------------------------------|
| 111 Soldadura a arco elétrico com eletrodo revestido (MMAW)   | Todos exceto chapas        | Todos           | 3 mm <sup>1</sup> ou maior                     | Todos                | Todos                           |
| 121/122 Soldadura por arco submerso com eletrodo de fio (SAW)   | Todos exceto chapas        | Todos           | 6 mm <sup>1</sup> ou maior                     | Ao baixo             | Todos                           |
| 131 Soldadura MIG   | Todos                      | Todos           | 2 mm <sup>1</sup> ou maior                     | Todos                | Todos <sup>2</sup>              |
| 136 Soldadura a arco elétrico com arames tubulares (FCAW)   | Todos                      | Todos           | 2 mm <sup>1</sup> ou maior                     | Todos                | Todos                           |
| 141 Soldadura TIG   | Todos                      | Todos           | até aprox. 10 mm                               | Todos                | Todos <sup>2</sup>              |
| 2 Soldadura por resistência   | Apenas chapas              | Todos           | Até aprox. 3 mm                                | Todos                | Todos                           |
| 521/522 soldadura por raio laser (LBW)  | Todos                      | Todos           | Depende da secção, até 25 mm pode ser possível | Todos                | Apenas em fábrica               |
| Notas:<br><sup>1</sup> Depende do tipo de junta de soldadura utilizada.<br><sup>2</sup> Mais sensível às condições meteorológicas do que outros processos e é necessária uma melhor proteção ambiental. |                            |                 |  |                      |                                 |

Normalmente não é realizado o pré-aquecimento de aços inoxidáveis austeníticos e duplex, exceto para evaporar qualquer condensação (água) na superfície.

As classes ferríticas são suscetíveis ao crescimento de grão a partir de temperaturas acima de 950 ° C, o que resulta numa menor tenacidade. Para contrariar isso, deve ser reduzida a introdução de calor na soldadura, mantendo um banho de fusão pequeno e utilizando velocidades de avanço mais rápidas. Com um bom controlo do calor introduzido, é possível obter soldaduras tenazes até 2-3 mm.

## 11.6.3 Consumíveis

Os consumíveis comerciais foram formulados para originar depósitos de soldadura com resistência mecânica e resistência à corrosão equivalente à do metal original e para minimizar o risco de fissuração por solidificação. Para aplicações especializadas, tais como ambientes invulgarmente agressivos ou onde são necessárias propriedades não magnéticas, deve ser seguido o conselho dos produtores e dos fabricantes de consumíveis. Todos os consumíveis devem estar em conformidade com os requisitos especificados na norma EN 1090-2. É importante que os consumíveis sejam mantidos livres de contaminantes e armazenados de acordo com as instruções do fabricante. Qualquer processo que utilize fluxo (por exemplo, MMAW, FCAW, SAW) é suscetível à absorção de humidade, o que pode conduzir à formação de porosidades na soldadura. Alguns processos, como TIG ou soldadura a laser, não podem utilizar metais de adição.

O uso de metais de adição austeníticos para soldar aços inoxidáveis ferríticos produz soldaduras com maior tenacidade em comparação com os metais de adição ferríticos. É possível soldar classes ferríticas sem utilizar um material de adição, embora isto possa resultar em menor resistência à corrosão, ductilidade e tenacidade e, portanto, só deve ser utilizado com especial cuidado.

#### **11.6.4 Distorção devido à soldadura**

Tal como outros metais, o aço inoxidável sofre de distorção devido ao processo de soldadura. Os tipos de distorção (angular, inclinação, contração, etc.) são semelhantes em natureza às encontradas em estruturas de aço carbono. No entanto, a distorção do aço inoxidável, particularmente de austeníticos, é maior do que a do aço carbono devido à maior expansão térmica e menor condutividade térmica (o que leva a gradientes de temperatura mais íngremes), ver Secção 2.4. Aços inoxidáveis ferríticos apresentam menor distorção quando aquecidos em comparação com as classes austeníticas. A distorção da soldadura dos aços inoxidáveis duplex encontra-se entre as classes austeníticas e ferrítica.

A distorção de soldaduras só pode ser controlada e não eliminada. Podem ser tomadas as seguintes medidas:

##### ***Medidas ao nível do projeto***

- eliminar a necessidade de realizar soldaduras, por exemplo especificando, se disponível, secções laminadas a quente, secções ocas ou secções fundidas a laser (a fusão a laser conduz a uma menor distorção);
- reduzir a extensão da soldadura;
- reduzir a secção transversal das soldaduras. Por exemplo, em secções espessas, especificar as preparações de junta duplas em V, U ou preparação dupla em U, em vez de V;
- utilizar juntas simétricas;
- dimensionar de forma a poder acomodar maiores tolerâncias.

##### ***Medidas durante o fabrico***

- utilizar grampos de fixação eficientes. Se possível, o grampo deve incorporar barras de cobre ou alumínio para ajudar a conduzir o calor na área de soldadura;
- quando não é possível utilizar grampos de fixação eficientes, deve-se utilizar soldaduras de pontos pouco espaçadas com uma sequência equilibrada;
- assegurar um bom ajuste e alinhamento antes da soldadura;
- segundo o material e espessura selecionados, introduzir apenas o calor necessário para o processo de soldadura;
- utilizar processos de soldadura balanceados e sequências apropriadas (por exemplo, *backstepping* e sequências em blocos).

#### **11.6.5 Considerações metalúrgicas**

Não é possível aqui apresentar toda a metalurgia dos aços inoxidáveis, com exceção de alguns dos fatores mais significativos.

##### ***Formação de precipitados nas classes austeníticas***

Nos aços austeníticos, a zona afetada pelo calor é relativamente tolerante ao crescimento de grão e à precipitação de fases frágeis e intermetálicas. Os

procedimentos de soldadura são usualmente definidos para controlar o tempo em que se está na faixa de temperatura crítica para efeitos de precipitação de carbonetos (450 - 900 ° C). A reparação excessiva da soldadura aumenta naturalmente o tempo gasto e é limitado a três reparações principais.

A formação de precipitados de carboneto de cromo e a consequente perda de resistência à corrosão é discutida na Secção 3.2.6 *Corrosão intergranular*, onde se observa que este fenómeno não é normalmente um problema das classes de baixo carbono de aço inoxidável austenítico (isto é 1.4307 e 1.4404). No entanto, os efeitos de deterioração da soldadura podem manifestar-se na construção soldada de classes que não têm baixo teor em carbono.

### ***Fissuração por solidificação nas classes austeníticas***

A fissuração por solidificação das soldaduras é evitada quando a estrutura da soldadura contém aproximadamente 5% de ferrite ou mais. As siderúrgicas equilibram a composição e o tratamento térmico das classes comuns de aço austenítico para assegurar que contém pouca ou nenhuma ferrite quando entregue, mas formarão ferrite suficiente numa soldadura autógena (isto é, uma soldadura sem material de adição). Mesmo assim, para reduzir a possibilidade de fissuração, é prudente minimizar o calor introduzido na soldadura e a temperatura entre passagens. Em materiais mais espessos é utilizado metal de adição e consumíveis de boa qualidade que assegurem novamente a quantidade apropriada de ferrite. Normalmente não é necessário medir a quantidade precisa de ferrite formada. Os procedimentos adequados de soldadura e consumíveis irão assegurar que não ocorrerá fissuração por solidificação.

### ***Fragilização das classes duplex***

Os aços duplex são sensíveis a 475 °C e à fragilização em fase- $\sigma$ . A fragilização a 475 °C ocorre quando o aço é mantido em zona protegida ou arrefecido lentamente na faixa de temperatura aproximada de 550 °C a 400 °C, produzindo assim um aumento na resistência à tração e dureza com uma diminuição da ductilidade e resistência ao impacto. A fragilização por fase- $\sigma$  pode ocorrer após uma longa exposição a uma temperatura na gama de 565°C a 900 °C, mas também pode ocorrer em meia hora em condições apropriadas (dependendo da composição e do estado termo-mecânico do aço). Os efeitos da fragilização por fase- $\sigma$  são maiores à temperatura ambiente ou inferior. A fragilização por fase- $\sigma$  tem um efeito adverso na resistência à corrosão.

Tanto a fragilização a 475 °C como fragilização por fase- $\sigma$  pode ser adequadamente controlada pela adoção de procedimentos corretos de soldadura; é frequentemente sugerida uma temperatura de passagem máxima de 200 °C. Deve-se ter especial cuidado ao soldar secções maciças.

Para evitar a fragilização, deve-se evitar a exposição prolongada a temperaturas acima de 300 °C.

## **11.6.6 Tratamento pós-soldadura**

O tratamento térmico pós-soldadura em aço inoxidável raramente é feito fora do ambiente de produção. Em certas circunstâncias, pode ser necessário um tratamento térmico de alívio de tensões.

Geralmente o acabamento pós-soldadura é necessário, como será discutido nos parágrafos seguintes, especialmente se estiverem envolvidos os processos de soldadura por arco. É importante definir o tratamento pós-soldadura necessário para

evitar excessos de custo e possível mau desempenho em serviço. As técnicas de acabamento comuns a todas as fabricações são abordadas na Secção 11.8.

Os processos usualmente empregues para a limpeza da soldadura são a escovagem e a lixa. A quantidade de limpeza deve ser minimizada pelo fabricante. A lixa de granulometria pequena é a mais adequada; demasiada pressão durante o processo pode levar ao aquecimento que pode reduzir a resistência à corrosão. As escovas devem ser feitas em aço inoxidável compatível (ver Secção 11.4). A escovagem intensa das soldaduras pode levar à incrustação de contaminantes na superfície, que podem originar corrosão.

É boa prática remover todos os tons originados devido às temperaturas elevadas. No entanto, o tingimento de cor amarela pode ser aceitável quando o aço inoxidável oferece uma boa margem de resistência para o ambiente em questão. Quando isto não for, ou quando a matiz não é aceitável por motivos estéticos, o tingimento de cor amarela pode ser removido por decapagem ou por jato de grânulos de vidro. A decapagem pode ser efetuada por imersão num banho (ver Secção 11.8) ou por utilização de pastas de acordo com as instruções do fabricante.

A utilização do processo de jato de granalha de aço na superfície da soldadura, introduz tensões de compressão na superfície que melhora na resistência à fadiga e à corrosão por tensão e permite uma boa aparência estética. No entanto, este processo não pode ser utilizado para justificar uma mudança na avaliação à fadiga.

A ação de remoção de metal durante a maquinação alivia as tensões e, portanto, evita distorção do produto soldado. Nos casos em que a distorção é tal que as tolerâncias dimensionais não podem ser alcançadas, pode ser necessário um tratamento térmico de tensão.

### 11.6.7 Inspeção das soldaduras

A Tabela 11.2 compara os métodos de inspeção comumente usados em soldaduras de aço inoxidável com os utilizados em soldaduras de aço carbono.

Os métodos são utilizados conforme necessário, dependendo do grau de integridade estrutural e de corrosão requerido para o ambiente considerado. No entanto também deve ser realizada inspeção visual durante todas as fases de soldadura, pois pode impedir muitos problemas durante a fabricação. O exame da superfície do aço inoxidável é mais importante do que em aço carbono, uma vez que o aço inoxidável é usado principalmente para combater a corrosão e uma pequena falha superficial pode tornar o material sujeito a ataques de corrosão.

Tabela 11.2 Métodos de inspeção para soldaduras

| NDT tipo   | Aço inoxidável austenítico | Aço inoxidável duplex                       | Aço inoxidável ferrítico                    | Aço carbono                                 |
|------------|----------------------------|---|---|---|
| Superfície | Líquido penetrante         | Líquido penetrante<br>Partículas magnéticas | Líquido penetrante<br>Partículas magnéticas | Líquido penetrante<br>Partículas magnéticas |
| Volúmico   | Radiografia (Raio-X, Gama) | Radiografia (Raio-X, Gama)                  | Radiografia (Raio-X, Gama)                  | Radiografia (Raio-X, Gama)<br>Ultra-sons    |

A inspeção por partículas magnéticas não é uma opção para os aços austeníticos, uma vez que estes não são magnéticos. Os métodos ultrassónicos são de uso limitado em soldaduras devido a dificuldade de interpretação; no entanto, eles podem ser

usados no material de base. A radiografia gama não é adequada para detectar fendas ou falta de fusão em materiais de aço inoxidável com menos de 10 mm de espessura.

## 11.7 Desgaste e emperramento

Se as superfícies estiverem carregadas e com movimento relativo, pode ocorrer desgaste da rosca do parafuso devido à aderência local e à rutura das superfícies com aço inoxidável, alumínio, titânio e outras ligas que auto geram uma película protetora de óxido para proteção contra a corrosão. Em alguns casos podem ocorrer desgaste e emperramento.

Em aplicações onde é importante assegurar a possibilidade de remoção dos ligadores para reparação, deve ser evitado o desgaste. Para reduzir este problema com o aço inoxidável podem ser tomadas várias precauções:

- reduzir a velocidade aperto dos ligadores;
- certificar-se de que as roscas estão limpas;
- lubrificar as roscas internas ou externas com produtos que contenham dissulfureto de molibdénio, mica, grafite ou talco, ou uma cera de pressão apropriada (mas deve-se tomar cuidado para avaliar a adequação de um produto comercial anti-moagem para a aplicação em questão);
- utilizar diferentes tipos de aço inoxidável (classes que diferem em termos de composição, encruamento de trabalho e dureza). Por exemplo, utilizar as combinações de parafuso-porca de classe A2-C2, A4-C4 ou A2-A4 da norma EN ISO 3506;
- em casos severos, utilizar uma liga de aço inoxidável com alta taxa de encruamento numa ou ambas as superfícies de contato (por exemplo, S21800, também conhecida como Nitronic 60), ou aplicar um revestimento de superfície duro.

Utilizar roscas laminadas ao invés de maquinadas e evitar o uso de roscas finas e apertadas reduz a probabilidade da moagem da rosca.

## 11.8 Acabamento

O acabamento superficial do aço inoxidável é um critério importante de projeto e deve ser especificado de acordo com requisitos arquitetónicos ou funcionais. Quanto mais fino for o acabamento, mais elevado o custo. É aqui que as precauções tomadas anteriormente no manuseio e no processo de soldadura vão compensar. O planeamento inicial é importante na redução de custos. Por exemplo, se a soldadura entre dois tubos de um corrimão está escondida, haverá um custo de acabamento reduzido e uma melhoria significativa na aparência final do corrimão. Quando se especifica polimento, esmerilamento ou acabamentos que não sejam de granalha ou jato abrasivo, é geralmente mais rentável aplicar esses acabamentos antes da fabricação. Por exemplo, as cantoneiras formadas a quente, tubos, canos e chapas podem ser polidos antes de serem soldados ou ligados a outros componentes.

A superfície do aço deve ser restaurada para a sua condição resistente à corrosão, removendo todas as contaminações. A decapagem num banho de ácido permite que a superfície seja escovada com uma escova de cerdas, mas pode mudar a aparência do acabamento para um acabamento mais mate ou fosco. O processo de decapagem também dissolverá as partículas de ferro ou aço carbono incorporada que, se não forem removidas, pode aparecer como manchas de ferrugem na superfície do aço inoxidável.



Os tratamentos abrasivos, tais como lixar e polir, produzem acabamentos unidirecionais e, assim, a mistura das soldaduras pode não ser fácil em chapas com superfícies laminadas. Pode ser necessário recorrer a testes iniciais para determinar os procedimentos necessários para um acabamento adequado. A soldaduras a laser é geralmente preferível para componentes que requerem aparência agradável porque a junta é menos visível.

O polimento eletrolítico produz uma superfície brilhante semelhante a um acabamento superficial altamente polido. O processo remove uma camada fina superficial juntamente com quaisquer óxidos superficiais leves. Os óxidos pesados devem ser removidos por decaagem ou moagem para garantir uma aparência uniforme após o polimento eletrolítico. Quando o tamanho do componente o permitir, o polimento eletrolítico é realizado por imersão num tanque contendo um eletrólito e conexões elétricas. As unidades portáteis podem ser usadas para remover a matiz de calor da zona soldada ou para polir áreas selecionadas. Existem outros processos de acabamento (galvanoplastia, *tumbling*, gravura, coloração e enegrecimento de superfície), mas estes raramente são utilizados em aço inoxidável estrutural e por isso não são aqui descritos.

Vale a pena ressaltar novamente que a superfície deve estar livre de contaminantes na estrutura final. Deve ser dada especial atenção à possibilidade de contaminação resultante do trabalho em estruturas de aço carbono adjacentes, especialmente a partir de poeira de moagem ou faíscas devido a corte abrasivo. O aço inoxidável deve ser protegido por um filme plástico removível, ou através de uma limpeza final após a conclusão da estrutura.

## ANEXO A Correlações entre as designações para o aço inoxidável

*Tabela A.1 Designações para o aço inoxidável – Correlação entre as normas Europeias e as normas US*

| Classe do aço EN 10088  |                       | US        |        |
|---|-----------------------|-----------|--------|
| No.   | Designação            | ASTM Tipo | UNS    |
| <b>Austeníticos</b>   |                       |           |        |
| 1.4301  | X5CrNi18-10           | 304       | S30400 |
| 1.4306  | X2CrNi19-11           | 304L      | S30403 |
| 1.4307  | X2CrNi18-9            | 304L      | S30403 |
| 1.4311  | X2CrNiN18-10          | 304LN     | S30453 |
| 1.4318  | X2CrNiN18-7           | 301LN     | S30153 |
| 1.4401  | X5CrNi Mo17-12-2      | 316       | S31600 |
| 1.4404  | X2CrNiMo17-12-2       | 316L      | S31603 |
| 1.4406  | X2CrNiMoN17-11-2      | 316LN     | S31653 |
| 1.4429  | X2CrNiMoN17-13-3      | 316LN     | S31653 |
| 1.4432  | X2CrNiMo17-12-3       | 316L      | S31603 |
| 1.4435  | X2CrNiMo18-14-3       | 316L      | -      |
| 1.4439  | X2CrNiMoN17-13-5      | 317LMN    | S31726 |
| 1.4529  | X1NiCrMoCuN25-20-7    | -         | N08926 |
| 1.4539  | X1NiCrMoCu25-20-5     | 904 L     | N08904 |
| 1.4541  | X6CrNiTi18-10         | 321       | S32100 |
| 1.4547  | X1CrNiMoCuN20-18-7    | -         | S31254 |
| 1.4565  | X2CrNiMnMoN25-18-6-5  | -         | S34565 |
| 1.4567 *  | X3CrNiCu18-9-4        |           | S30430 |
| 1.4571  | X6CrNiMoTi17-12-2     | 316Ti     | S31635 |
| 1.4578 *  | X3CrNiCuMo17-11-3-2   | -         | -      |
| <b>Duplex</b>   |                       |           |        |
| 1.4062 *  | X2CrNi22-2--          |           | S32202 |
| 1.4162  | X2CrMnNiN21-5-1       |           | S32101 |
| 1.4362  | X2CrNi23-4            | 2304#     | S32304 |
| 1.4410  | X2CrNiMoN25-7-4       | 2507#     | S32750 |
| 1.4462  | X2CrNiMoN22-5-3       | 2205#     | S32205 |
| 1.4482 *  | X2CrMnNiMoN21-5-3     |           | -      |
| 1.4501 *  | X2CrNiMoCuWN25-7-4    |           | S32760 |
| 1.4507 *  | X2CrNiMoCuWN25-7-4    |           | S32520 |
| 1.4662 *  | X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2 |           | S82441 |
| <b>Ferríticos</b>   |                       |           |        |
| 1.4003  | X2CrNi12              | -         | S41003 |
| 1.4016  | X6Cr17                | 430       | S43000 |
| 1.4509  | X2CrTiNb18            | 441+      | S43940 |
| 1.4512  | X2CrTi12              | 409       | S40900 |
| 1.4521  | X2CrMoTi18-2          | 444       | S44400 |
| 1.4621 *  | X2CrNbCu21            | -         | S44500 |
| <p>Todos os aços acima referidos encontram-se na EN 10088-4/5 excetos os marcados com *, que apenas se encontram referidos na EN 10088-2/3.<br/>                     # Designações normalmente utilizadas.<br/>                     + 441 é um nome comercial comum para esta classe, mas não é um tipo ASTM.</p> |                       |           |        |



## ANEXO B Endurecimento de secções enformadas a frio

A formulação abaixo apresentada pode, no geral, ser aplicada em todo o tipo de secções enformadas a frio.

A condição de endurecimento do aço pode ser utilizada no dimensionamento de secções transversais e elementos substituindo  $f_y$  pela média correspondente ao aumento da tensão de cedência  $f_{ya}$ . Para a estabilidade em colunas, deve ser utilizado  $f_{ya}$  em conjunto com as curvas de encurvadura lateral dadas pela Tabela 6.1. O método apresentado neste Anexo substitui e estende as indicações dadas pelo Anexo Nacional do Reino Unido para a EN 1993-1-4. Este método é baseado em diversos testes e cobre uma vasta gama de secções.

A resistência adicional proveniente do endurecimento do material também pode ser considerada no dimensionamento utilizando o Método da Resistência Contínua, como descrito no Anexo D.

a) Para secções em aço inoxidável formadas por viradeira, o aumento médio da tensão de cedência  $f_{ya}$  pode ser considerado, de modo a ter em conta os cantos a 90° formados por deformação a frio:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,pb} + f_y (A - A_{c,pb})}{A} \quad (\text{B.1})$$

b) Para secções tubulares RHS, o aumento médio da tensão de cedência  $f_{ya}$  pode ser considerado, de modo a ter em conta o endurecimento das faces da secção e dos cantos:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf} (A - A_{c,rolled})}{A} \quad (\text{B.2})$$

c) Para secções tubulares circulares CHS, o aumento médio da tensão de cedência  $f_{ya}$  pode ser considerado para ter em conta o endurecimento durante a fabricação:

$$f_{ya} = f_{yCHS} \quad (\text{B.3})$$

Onde:

$f_y$  é a tensão de cedência do material base (ex.: a chapa plana ou rolo de material com o qual a secção foi executada por enformação a frio, dados pela Tabela 2.2);

$f_{yc}$  é a tensão de cedência prevista para os cantos da secção, considerando o endurecimento do material;

$f_{yf}$  é a tensão de cedência prevista para as faces da secção, considerando o endurecimento do material;

$f_{yCHS}$  é a tensão de cedência prevista para uma secção circular tubular, considerando o endurecimento do material;

$A$  é a área da secção transversal da secção;

$A_{c,pb}$  é a área total da secção transversal para secções quinadas;

$A_{c,rolled}$  é a área total dos cantos da secção transversal em secções tubulares quadradas enformadas a frio incluindo o comprimento  $2t$ , que se estende ao longo do perímetro da secção transversal, em cada canto.

(i) Determinação de  $f_{yc}$ ,  $f_{yf}$  e  $f_{yCHS}$ :

$$f_{yc} = 0,85K (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad e \quad f_y \leq f_{yc} \leq f_u \quad (B.4)$$

$$f_{yf} = 0,85K (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad e \quad f_y \leq f_{yf} \leq f_u \quad (B.5)$$

$$f_{yCHS} = 0,85K (\varepsilon_{CHS} + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad e \quad f_y \leq f_{yCHS} \leq f_u \quad (B.6)$$

Onde:

$\varepsilon_c$  é a extensão nos cantos da secção durante o processo de moldagem;

$\varepsilon_f$  é a extensão induzida nas faces planas das secções tubulares quadradas durante o processo de moldagem;

$\varepsilon_{CHS}$  é a extensão induzida nas faces planas das secções CHS durante o processo de moldagem.

Que podem ser dados por:

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_i + t)} \quad (B.7)$$

$$\varepsilon_f = \left[ \frac{t}{900} \right] + \left[ \frac{\pi t}{2(b + h - 2t)} \right] \quad (B.8)$$

$$\varepsilon_{CHS} = \frac{t}{2(d - t)} \quad (B.9)$$

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E} \quad (B.10)$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} \quad (B.11)$$

$$n_p = \frac{\ln(f_y/f_u)}{\ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)} \quad (B.12)$$

No qual:

$f_u$  é a tensão última do material base (ex: a chapa plana ou rolo de material com o qual a secção foi executada por enformação a frio, dados pela Tabela 2.2);

$\varepsilon_u$  extensão última correspondente a tensão última  $f_u$ , dada pelas Equações (C.6) e (C.7);

$r_i$  raio interno; pode ser considerado igual a  $2t$  se desconhecido.

(ii) Determinação da área total da secção dos cantos da secção transversal  $A_{c,pb}$  e  $A_{c,rolled}$

$$A_{c,pb} = \left( n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) \quad (B.13)$$

$$A_{c,rolled} = \left( n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) + 4n_c t^2 \quad (B.14)$$

onde  $n_c$  é o número de cantos com um ângulo igual a 9.

## ANEXO C Modelação do comportamento material

A curva tensão-extensão considerando o endurecimento do material pode ser calculada considerando as expressões seguintes:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left[ \frac{\sigma}{f_y} \right]^n \quad \text{for } \sigma \leq f_y \quad (\text{C.1})$$

$$\varepsilon = 0,002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left[ \frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right]^m \quad \text{for } f_y < \sigma \leq f_u \quad (\text{C.2})$$

onde:

$\sigma$  é a tensão de engenharia

$\varepsilon$  é a extensão de engenharia

$E$ ,  $f_y$  e  $f_u$  são dados na Secção 2.3.1 ou na EN 10088.

$n$  coeficiente que pode ser obtido a partir da Tabela 6.4, ou calculado a partir das propriedades do material:

$$n = \frac{\ln(4)}{\ln \left[ \frac{f_y}{R_{p0,05}} \right]} \quad (\text{C.3})$$

No qual

$R_{p0,05}$  é a tensão a 0,05%.

A EN 1993-1-4 adota uma equação menos rigorosa para a determinação de  $n$ , baseada na tensão a 0,01%,  $R_{p0,01}$ . É esperado que esta equação seja substituída pela Equação (C.3) na próxima revisão da EN 1993-1-4.

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln \left[ \frac{f_y}{R_{p0,01}} \right]} \quad (\text{C.4})$$

$E_y$  Modulo de elasticidade da curva tensão-extensão em relação à tensão de cedência, dado por:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002n \left[ \frac{E}{f_y} \right]} \quad (\text{C.5})$$

$\varepsilon_u$  extensão última correspondente à tensão última  $f_u$ , que pode ser obtida através da aproximação:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad \text{Para aços inoxidáveis austeníticos e duplex} \quad (\text{C.6})$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \left[ 1 - \frac{f_y}{f_u} \right] \quad \text{Para aços inoxidáveis ferríticos} \quad (\text{C.7})$$

mas  $\varepsilon_u \leq A$ , no qual  $A$  é o alongamento após a fratura definida na EN 10088

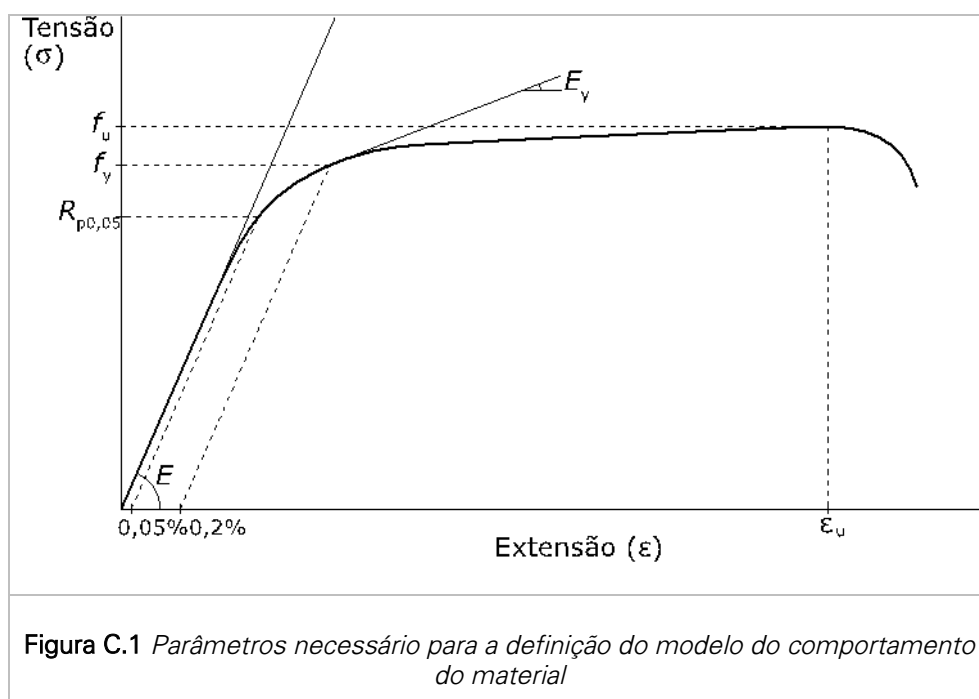
A EN 1993-1-4 fornece a Equação (C.6) mas, estudos recentes demonstraram que esta expressão é imprecisa para aços inoxidáveis ferríticos. Como tal, é esperado que na próxima revisão da EN 1993-1-4 se introduza a Equação (C.7).

$$m = 1 + 2,8 \frac{f_y}{f_u} \quad \text{Para todas as classes} \quad (\text{C.8})$$

A EN 1993-1-4 adota uma equação menos rigorosa para a determinação de  $m$ . É esperado que esta equação seja substituída pela Equação (C.8) na próxima revisão da EN 1993-1-4.

$$m = 1 + 3,5 \frac{f_y}{f_u} \quad (\text{C.9})$$

A Figura C.1 representa os parâmetros necessários para definir o modelo do material.



Se os valores  $f_y$  forem conhecidos, pode-se determinar  $f_u$  a partir das seguintes expressões:

$$\frac{f_y}{f_u} = 0,2 + 185 \frac{f_y}{E} \quad \text{Para aços inoxidáveis austeníticos e duplex} \quad (\text{C.10})$$

$$\frac{f_y}{f_u} = 0,46 + 145 \frac{f_y}{E} \quad \text{Para aços inoxidáveis ferríticos} \quad (\text{C.11})$$

Em geral, para o dimensionamento por elementos finitos devem ser adotados os valores nominais das propriedades do material (Caso 1 na Tabela C.1). Para o dimensionamento utilizando as propriedades do material proveniente de ensaios experimentais, deve-se adotar um dos casos 2 a 4 da tabela C.1, dependendo dos parâmetros que foram medidos.

**Tabela C.1** Casos para a definição das curvas tensão-extensão

| Tipo de análise FE  | $E$          | $f_y$        | $f_u$                | $\epsilon_u$       | $n$   | $m$  |
|---|--------------|--------------|----------------------|--------------------|---|--|
| Caso 1. Dimensionamento utilizando os valores nominais do material  | Secção 2.3.1 | Secção 2.3.1 | Secção 2.3.1         | Eq. (C.6) or (C.7) | 0   | Eq. (C.8)  |
| Caso 2. Dimensionamento utilizando os valores medidos de $f_y$  | Secção 2.3.1 | Medido       | Eq. (C.10) or (C.11) | Eq. (C.6) or (C.7) | 0   | Eq. (C.8)  |
| Caso 3. Dimensionamento utilizando os valores medidos de $E$ , $f_y$ e $f_u$  | Medido       | Medido       | Medido               | Eq. (C.6) or (C.7) | 0   | Eq. (C.8)  |
| Caso 4. Dimensionamento/ validação do modelo usando a curva experimental tensão-extensão completa, ex: para validação de modelos FE | Medido       | Medido       | Medido               | Medido             | Medido ou determinado utilizando a uma regressão ou a Eq. (C.3) | Medido ou determinado utilizando a uma regressão |

As expressões seguintes podem ser utilizadas para converter a curva tensão- extensão de engenharia em “tensão verdadeira” e “extensão verdadeira”:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (C.12)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon) \quad (C.13)$$

Alguns softwares comerciais para análises FE requerem a definição do comportamento plástico do material. Nesses casos, deve-se utilizar as tensões e extensões a partir do ponto limite de proporcionalidade do material. A extensão plástica correspondente a cada nível de tensão pode ser determinada através da Equação (C.14) e o limite de proporcionalidade poderá ser assumido como a tensão ao qual corresponde a extensão plástica igual a  $\epsilon_{pl} = 1 \times 10^{-4}$ .

$$\epsilon_{pl} = \epsilon - \frac{f_y}{E} \quad (C.14)$$





# ANEXO D Método da Resistência Contínua

## D.1 Introdução

O Método da Resistência Contínua (CSM) é uma abordagem de cálculo baseada em deformação que tem em consideração os benefícios do endurecimento por deformação e a interação dos elementos para a determinação da resistência da secção transversal. O modelo elástico de endurecimento linear do material CSM, é especificado na Secção D.2, enquanto que as curvas de base CSM para a determinação da capacidade de deformação da secção transversal sob o carregamento aplicado, são apresentadas na Secção D.3. As Secções D.4, D.5 e D.6 apresentam as fórmulas de cálculo para resistências de secção transversal.

Este anexo aplica-se às resistências de secção transversal de secções constituídas por placas (e.g. secções I duplamente simétricas, RHS, secções U mono-simétrico, secções em T e cantoneiras assimétricas) e CHS sujeitas a condições de carga isoladas e combinadas. Para secções simétricas, o CSM apresenta vantagens significativas em relação à regra de dimensionamento apresentadas na Secção 5, para um baixo coeficiente de esbelteza da secção transversal, mas poucas vantagens para o coeficiente de esbelteza da secção transversal superior a 0,68 para secções constituídas por placas ou superior a 0,30 para CHS. Para secções assimétricas, o CSM pode apresentar vantagens significativas em toda a gama de esbelteza de secção transversal.

Para as secções transversais enformadas a frio, a tensão de cedência média melhorada da secção transversal  $f_{ya}$  do Anexo B pode ser usada em vez de  $f_y$  neste Anexo.

Este anexo aplica-se apenas ao cálculo estático à temperatura ambiente. As considerações de serviço podem condicionar o cálculo e também devem ser avaliadas.

## D.2 Modelação do material

O modelo elástico de endurecimento linear do material CSM, com três coeficientes de material (C1, C2 e C3), é ilustrado na Figura D.1 e os coeficientes de material são apresentados na Tabela D.1.

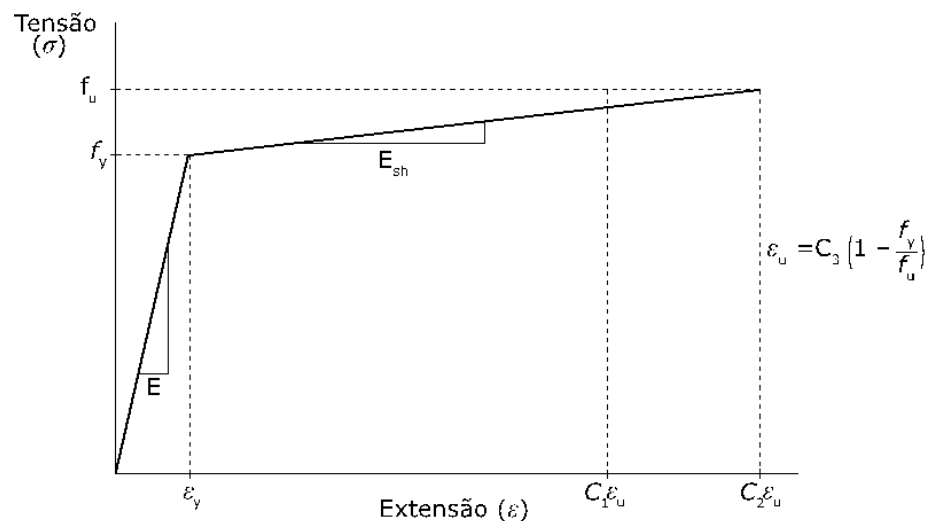


Figura D.1 Modelo elástico de endurecimento linear do material CSM

Os termos são definidos como:

- $f_y$  é a tensão de cedência;  
 $\varepsilon_y$  é a extensão de cedência, tomado como  $\varepsilon_y = f_y/E$ ;  
 $E$  é o módulo de elasticidade;  
 $E_{sh}$  é o módulo de endurecimento por deformação;  
 $f_u$  é a tensão última;  
 $\varepsilon_u$  é a extensão última, correspondente à tensão última  $f_u$ , tomada como  $C_3(1 - f_y/f_u)$ .

**Tabela D.1** Coeficientes do modelo de material CSM

| Aço inoxidável | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ |
|----------------|-------|-------|-------|
| Austenítico    | 0,10  | 0,16  | 1,00  |
| Duplex         | 0,10  | 0,16  | 1,00  |
| Ferrítico      | 0,40  | 0,45  | 0,60  |

O módulo de endurecimento por deformação é determinado a partir de:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (D.1)$$

## D.3 Capacidade de deformação transversal

### D.3.1 Curva base

A curva base define a capacidade de deformação de secção transversal normalizada  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$ , que é necessária para determinar a resistência de secção transversal e esbelteza da secção. A curva base é dada pelas Equações (D.2) e (D.3) para secções constituídas por placas e CHS, respetivamente.

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{para } \bar{\lambda}_p \leq 0,68 \\ \left(1 - \frac{0,222}{\bar{\lambda}_p^{1,050}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1,050}} & \text{para } \bar{\lambda}_p > 0,68 \end{cases} \quad (D.2)$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{4,44 \times 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{4,5}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{para } \bar{\lambda}_c \leq 0,30 \\ \left(1 - \frac{0,224}{\bar{\lambda}_c^{0,342}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_c^{0,342}} & \text{para } \bar{\lambda}_c > 0,30 \end{cases} \quad (D.3)$$

onde:

- $\bar{\lambda}_p$  é a esbelteza da secção transversal para secções constituídas por placas;  
 $\bar{\lambda}_c$  é a esbelteza da secção transversal para secções ocas circulares.

### D.3.2 Esbelteza da secção transversal

A esbelteza da secção transversal é dada por:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/f_{cr,p}} \quad \text{para secções constituídas por placas}$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{f_y/f_{cr,c}} \quad \text{para CHS}$$

Para secções constituídas por placas, a tensão elástica de encurvadura da secção transversal completa sob o carregamento aplicado pode ser determinada numericamente (por exemplo, utilizando o software CUFSM disponível em [www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm](http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm)), ou calculada de forma conservativa como sendo a tensão elástica de encurvadura do elemento placa mais esbelto da secção transversal:

$$f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} \quad (D.4)$$

Onde:

$\bar{b}$  é a largura plana do elemento placa;

$t$  é a espessura do elemento placa;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson;

$k_\sigma$  é o coeficiente de encurvadura de uma placa correspondente ao parâmetro  $\psi$  que relaciona as tensões nas extremidades de um elemento (ver Tabela 5.3 e Tabela 5.4).

Para CHS, a tensão elástica de encurvadura da secção completa para compressão, flexão ou suas combinações, pode ser calculado a partir de:

$$f_{cr,c} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - \nu^2)}} \frac{2t}{D} \quad (D.5)$$

onde:

$D$  é o diâmetro da secção transversal;

$t$  é a espessura da secção transversal.

#### D.4 Resistência à compressão da secção transversal

Para secções constituídas por placas com  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$  e para CHS com  $\bar{\lambda}_c \leq 0,30$ , correspondendo a  $\epsilon_{csm}/\epsilon_y \geq 1,0$ , a resistência à compressão de secção transversal é determinada como:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} \quad (D.6)$$

onde:

$A$  é a área da secção transversal;

$f_{csm}$  é a tensão de cálculo correspondente a  $\epsilon_{csm}$ , dada por:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \epsilon_y (\epsilon_{csm}/\epsilon_y - 1). \quad (D.7)$$

Para secções constituídas por placas com  $\bar{\lambda}_p > 0,68$  e para CHS com  $\bar{\lambda}_c > 0,30$ , correspondendo a  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1,0$ , a resistência à compressão de secção transversal é determinada como:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm} A f_y}{\varepsilon_y \gamma_{M0}} \quad (D.8)$$

## D.5 Resistência à flexão da secção transversal

### D.5.1 Flexão em torno de um eixo de simetria

Para secções duplamente simétricas (e.g. secções I, RHS, e CHS) e secções mono simétricas (secções U e secções em T) em flexão em torno de um eixo de simetria, a tensão máxima alcançável  $\varepsilon_{csm}$  é determinada a partir das Equações (D.2) e (D.3).

Para secções com  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1,0$ , o momento fletor resistente da secção transversal pode ser determinado como:

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{sh} W_{el}}{E W_{pl}} \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^{\alpha} \right] \quad (D.9)$$

onde:

$W_{el}$  é o módulo elástico de flexão da secção transversal;

$W_{pl}$  é o módulo plástico de flexão da secção transversal;

$\alpha$  é o parâmetro de flexão MRC, como dado na Tabela D.2.

Para secções com  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1,0$ , o momento fletor resistente da secção transversal é determinado por:

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm} W_{el} f_y}{\varepsilon_y \gamma_{M0}} \quad (D.10)$$

### D.5.2 Flexão em torno de um eixo que não é de simetria

Para secções não-simétricas (cantoneira) e secções mono simétricas (secções U) em flexão em torno de um eixo que não é de simetria, a tensão máxima de compressão atingível  $\varepsilon_{csm,c}$  é determinada a partir da Equação (D.2) (i.e.  $\varepsilon_{csm,c} = \varepsilon_{csm}$ ), enquanto que a extensão na fibra exterior correspondente  $\varepsilon_{csm,t}$  é calculada com base na suposição de uma distribuição da extensão em profundidade linearmente variável e o eixo neutro de cálculo está localizado no eixo neutro elástico (ENA). A extensão máxima de cálculo  $\varepsilon_{csm,max}$  é tomada como o mínimo de  $\varepsilon_{csm,c}$  e  $\varepsilon_{csm,t}$ .

Se  $\varepsilon_{csm,max}$  for menor que a extensão de cedência  $\varepsilon_y$ , é apropriado o uso da ENA e o momento fletor resistente de cálculo é calculado a partir da Equação (D.10), com  $\varepsilon_{csm} = \varepsilon_{csm,max}$ .

Se  $\varepsilon_{csm,max}$  for maior que a extensão de cedência  $\varepsilon_y$ , o eixo neutro de cálculo deixa de ser o ENA assumido anteriormente e passa a ser calculado através do equilíbrio da secção transversal ou, como aproximação, o ponto médio entre os eixos neutro elásticos e plásticos  $\varepsilon_{csm,t}$  e  $\varepsilon_{csm,max}$  é então recalculado, e o momento fletor resistente correspondente é determinado a partir da Equação (D.9), na qual  $\varepsilon_{csm} = \varepsilon_{csm,max}$  e os valores do coeficiente de flexão  $\alpha$ , para cada tipo de secção não

duplamente simétrica em flexão sobre um eixo que não é de simetria, são obtidos da Tabela D.2.

**Tabela D.2** Coeficiente de flexão  $MRC\alpha$

| Tipo de secção transversal | Eixo de flexão | Relação      | $\alpha$ |
|----------------------------|----------------|--------------|----------|
| RHS                        | Qualquer       | Qualquer     | 2,0      |
| CHS                        | Qualquer       | –            | 2,0      |
| Secção I                   | y-y            | Qualquer     | 2,0      |
|                            | z-z            | Qualquer     | 1,2      |
| Secção U                   | y-y            | Qualquer     | 2,0      |
|                            | z-z            | $h/b \leq 2$ | 1,5      |
|                            |                | $h/b > 2$    | 1,0      |
| Secção T                   | y-y            | $h/b < 1$    | 1,0      |
|                            |                | $h/b \geq 1$ | 1,5      |
|                            | z-z            | Qualquer     | 1,2      |
| Cantoneira                 | y-y            | Qualquer     | 1,5      |
|                            | z-z            | Qualquer     | 1,0      |

## D.6 Resistência da secção transversal sob combinação de compressão e momento fletor

### D.6.1 RHS sujeito a carregamento combinado

Para RHS com  $\bar{\lambda}_p \leq 0,60$ , as fórmulas de interação de cálculo para secções transversais submetidas à flexão em torno do eixo principal, eixo secundário e flexão biaxial e compressão são dadas pelas Equações (D.11) a (D.13):

$$M_{y,Ed} \leq M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5a_w)} \leq M_{csm,y,Rd} \quad (D.11)$$

$$M_{z,Ed} \leq M_{R,csm,z,Rd} = M_{csm,z,Rd} \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5a_f)} \leq M_{csm,z,Rd} \quad (D.12)$$

$$\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{R,csm,y,Rd}} \right]^{\alpha_{csm}} + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{R,csm,z,Rd}} \right]^{\beta_{csm}} \leq 1 \quad (D.13)$$

onde:

$M_{y,Ed}$  é o valor de cálculo do momento fletor atuante em torno do eixo principal (y-y);

$M_{z,Ed}$  é o valor de cálculo do momento fletor atuante em torno do eixo secundário (z-z);

$M_{R,csm,y,Rd}$  é o momento fletor resistente reduzido CSM em torno do eixo principal (y-y);

$M_{R,csm,z,Rd}$  é o momento fletor resistente reduzido CSM em torno do eixo secundário (z-z);

$a_w$  é a proporção da área da alma para a área de secção transversal bruta;

$a_f$  é a proporção da área do banzo para a área de secção transversal bruta;

$n_{\text{csm}}$  é a proporção do valor de cálculo do esforço de compressão  $N_{\text{Ed}}$  para o esforço de compressão resistente da secção transversal CSM  $N_{\text{csm,Rd}}$ ;

$\alpha_{\text{csm}}$  e  $\beta_{\text{csm}}$  são o coeficiente de interação para flexão biaxial, igual a  $1,66/(1 - 1,13n_{\text{csm}}^2)$ .

Para RHS com  $\bar{\lambda}_p > 0,60$ , a fórmula de interação de cálculo linear é dada como:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{csm,Rd}}} + \frac{M_{y,\text{Ed}}}{M_{\text{csm},y,\text{Rd}}} + \frac{M_{z,\text{Ed}}}{M_{\text{csm},z,\text{Rd}}} \leq 1 \quad (\text{D.14})$$

### D.6.2 CHS sujeito a carregamento combinado

Para CHS com  $\bar{\lambda}_c \leq 0,27$ , a fórmula de interação de cálculo para secções transversais sob combinação de flexão e compressão é dada como:

$$M_{\text{Ed}} \leq M_{\text{R,csm,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}}(1 - n_{\text{csm}}^{1,7}) \quad (\text{D.15})$$

Para CHS com  $\bar{\lambda}_c > 0,27$ , a fórmula de interação de cálculo linear é dada como:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{csm,Rd}}} + \frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{csm,Rd}}} \leq 1 \quad (\text{D.16})$$

# ANEXO E Momento Crítico Elástico

## E.1 Introdução

Para secções que são simétricas ao plano de flexão, o momento crítico elástico  $M_{cr}$  pode ser calculado pelo método indicado na Secção E.2. Para casos não abrangidos por este método,  $M_{cr}$  pode ser determinado por uma análise de encurvadura da viga, desde que o cálculo contabilize todos os parâmetros suscetíveis de afetar o valor de  $M_{cr}$ :

- geometria da secção transversal
- rigidez de empenamento
- posição do carregamento transversal em relação ao centro de corte
- condições de apoio

Para o cálculo do momento crítico  $M_{cr}$  pode ser feito o download sem qualquer custo, a partir da página web: [www.steelconstruction.info/Design software and tools](http://www.steelconstruction.info/Design_software_and_tools) e [www.cticm.com](http://www.cticm.com).

## E.2 Secções simétricas ao plano de flexão

Este método aplica-se apenas a membros direitos uniformes para os quais a secção transversal é simétrica em relação ao plano de flexão. As condições de apoio em cada extremidade são pelo menos:

- restringido a movimentos laterais
- restringido a rotações ao longo do eixo longitudinal

$M_{cr}$  pode ser calculado a partir da seguinte fórmula derivada da teoria de encurvadura

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (E.1)$$

onde:

$I_t$  é a constante de torsão;

$I_w$  é a constante de empenamento;

$I_z$  é o momento de inércia em relação ao eixo secundário;

$k$  e  $k_w$  são fatores de comprimento efetivo;

$L$  é o comprimento da viga entre os pontos que têm restrição lateral;

$z_g$  é a distância entre o ponto de aplicação de carga e o centro de corte;  
(Nota: para secções duplamente simétricas, o centro de corte coincide com o centro geométrico);

$C_1$  é o fator de momento uniforme equivalente e tem em conta a forma do diagrama de momentos fletores;

$C_2$  é um parâmetro associado ao nível de carga e depende da forma do diagrama de momentos fletores.

O fator  $k$  refere-se à rotação de extremidade no plano. É análogo ao rácio do comprimento de encurvadura com o comprimento do sistema para um elemento comprimido.  $k$  não deve ser inferior a 1,0 sem uma justificação clara.



O fator  $k_w$  refere-se ao empenamento de extremidade. A menos que seja prevista uma provisão especial para a fixação,  $k_w$  deve ser igual a 1,0.

No caso de condições normais de apoio nas extremidades (apoios em forquilha),  $k$  e  $k_w$  são iguais a 1,0.

Geralmente,  $z_g$  é positivo para as cargas que atuam em direção ao centro de corte a partir do ponto de aplicação.

### E.3 Fatores $C_1$ e $C_2$

A distribuição de momentos fletores ao longo do comprimento de uma viga influencia o valor do momento crítico elástico. A influência do momento fletor no momento elástico de encurvadura  $M_{cr}$  de uma viga pode ser considerada através do fator de momento uniforme equivalente  $C_1$ . O momento fletor uniforme é o cenário mais grave, para o qual  $C_1 = 1,0$ . Assumir  $C_1 = 1,0$  também é conservador para outros padrões de momento, mas pode tornar-se excessivamente conservador quando a distribuição do momento fletor varia significativamente.

O fator  $C_2$  torna-se relevante quando uma viga está sujeita a cargas desestabilizadoras. As cargas aplicadas acima do centro de corte da viga têm um efeito "desestabilizador", resultando em valores mais baixos de  $M_{cr}$ , enquanto as cargas aplicadas abaixo do centro de corte têm um efeito "estabilizador", resultando em valores mais altos de  $M_{cr}$ .

A Tabela E.1 e Tabela E.2 fornecem valores para os fatores  $C_1$  e  $C_2$ .

Tabela E.1 Valores de  $C_1$  para momentos de extremidade (para  $k = 1,0$ )

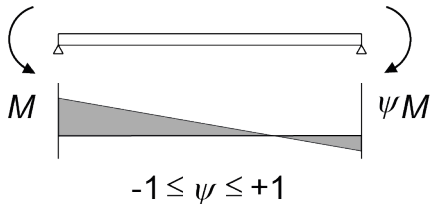







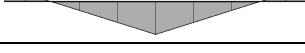
| Momento de extremidade e condições apoio  | $\psi$ | $C_1$ |
|---|--------|-------|
|  | +1,00  | 1,00  |
|   | +0,75  | 1,17  |
|   | +0,50  | 1,36  |
|   | +0,25  | 1,56  |
|   | 0,00   | 1,77  |
|   | -0,25  | 2,00  |
|   | -0,5   | 2,24  |
|   | -0,75  | 2,49  |
|   | -1,00  | 2,76  |

Tabela E.2 Valores de  $C_1$  e  $C_2$  para casos com carregamento transversal (para  $k = 1,0$ )

| Carregamento e condições de apoio   | Diagrama de momentos fletores  | $C_1$ | $C_2$ |
|---|--|-------|-------|
|  |  | 1,13  | 0,454 |
|  |  | 2,60  | 1,55  |
|  |  | 1,35  | 0,630 |
|  |  | 1,69  | 1,65  |

## **PARTE II - EJEMPLOS DE DIMENSIONAMIENTO**



**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 1** – PILAR COM SECÇÃO TRANSVERSAL DO TIPO CHS

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 2** – VIGA-COLUNA COM SECÇÃO TRANSVERSAL I SOLDADA E COM TRAVAMENTOS LATERAIS

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 3** – CHAPA PERFILADA COM DOIS VÃOS

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 4** – FADIGA NUMA LIGAÇÃO SOLDADA ENTRE PERFIS TUBULARES

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 5** – LIGAÇÃO SOLDADA

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 6** – LIGAÇÃO APARAFUSADA

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 7** – CORTE NUMA VIGA DE ALMA CHEIA

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 8** – VIGA SUJEITA A CARGAS PONTUAIS

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 9** – VIGA COM BANZO COMPRIMIDO NÃO RESTRINGIDO

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 10** – PILAR SUJEITO A CARGAS AXIAIS: DIMENSIONAMENTO AO FOGO

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 11** – CHAPA PERFILADA COM DOIS VÃOS

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 12** – VIGA COM SECÇÃO TRANSVERSAL C SUJEITA À FLEXÃO

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 13** – TRELIÇA COM SECÇÃO TRANSVERSAL FECHADA

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 14** – AUMENTO DA TENSÃO MÉDIA DE CEDÊNCIA PARA SECÇÕES ENFORMADAS A FRIO

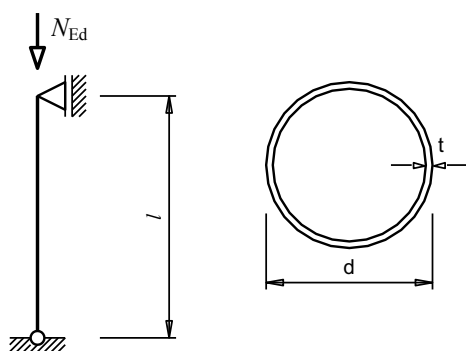
**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 15** – UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA CONTÍNUA (CSM) NO DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO



|  |               |   |           |      |       |
|--|---------------|---|-----------|------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 2 |   |           |      |       |
|  | Título        | Exemplo de Dimensionamento 1 – Pilar com secção transversal do Tipo CHS |           |      |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel  | Feito por | HS   | Data  |
|  |               | Revisto por   | JBL       | Data | 03/06 |
|  |               | Revisto por   | FW        | Data | 05/17 |

### EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 1- PILAR COM SECÇÃO TRANSVERSAL DO TIPO CHS

Dimensionamento de um pilar interno pertencente a um edifício com múltiplos andares com secção tubular circular. O pilar é considerado como simplesmente apoiado nas suas extremidades. A altura entre pisos é 3,50 m.



#### Estrutura

Pilar simplesmente apoiado, comprimento entre apoios:

$$l = 3,50 \text{ m}$$

#### Ações

As ações permanentes e variáveis resultam numa força de compressão com direção vertical, igual a:

$$N_{Ed} = 250 \text{ kN}$$

#### Propriedades da secção transversal

Considere um perfil CHS enformado a frio com dimensões 159 × 4, em aço inoxidável austenítico de classe 1.4307.

#### Propriedades geométricas da secção transversal

$$\begin{array}{ll}
 d = 159 \text{ mm} & t = 4,0 \text{ mm} \\
 A = 19,5 \text{ cm}^2 & I = 585,3 \text{ cm}^4 \\
 W_{el} = 73,6 \text{ cm}^3 & W_{pl} = 96,1 \text{ cm}^3
 \end{array}$$

#### Propriedades dos materiais

Considere  $f_y = 220 \text{ N/mm}^2$  (para chapas enformadas a frio).

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ e } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

Tabela 2.2  
Secção 2.3.1

**Classificação da secção transversal**

$$\varepsilon = 1,01$$

Secção sujeita a compressão:  $d/t = 159/4 = 39,8$

Para a Classe 1,  $d/t \leq 50\varepsilon^2$ , logo a secção é de Classe 1.

Tabela 5.2

**Resistência à compressão da secção transversal**

Para uma secção transversal de Classe 1:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{19,5 \times 220 \times 10^{-1}}{1,1} = 390 \text{ kN}$$

Secção 5.7.3

Eq. 5.27

**Resistência à encurvadura por flexão**

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

Secção 6.3.3

Eq. 6.2

Eq. 6.4

Eq. 6.5

Cálculo da carga crítica elástica de encurvadura:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 585,3 \times 10^4}{(3,50 \times 10^3)^2} \times 10^{-3} = 943,1 \text{ kN}$$

Cálculo da esbelteza para a encurvadura por flexão:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{19,5 \times 10^2 \times 220}{943,1 \times 10^3}} = 0,67$$

Eq. 6.6

Utilizando um fator de imperfeição  $\alpha = 0,49$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  para um aço inoxidável austenítico enformado a frio CHS:

Tabela 6.1

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,67 - 0,2) + 0,67^2) = 0,84$$

$$\chi = \frac{1}{0,84 + [0,84^2 - 0,67^2]^{0,5}} = 0,74$$

$$N_{b,Rd} = 0,74 \times 19,5 \times 220 \times \frac{10^{-1}}{1,1} = 288,6 \text{ kN}$$

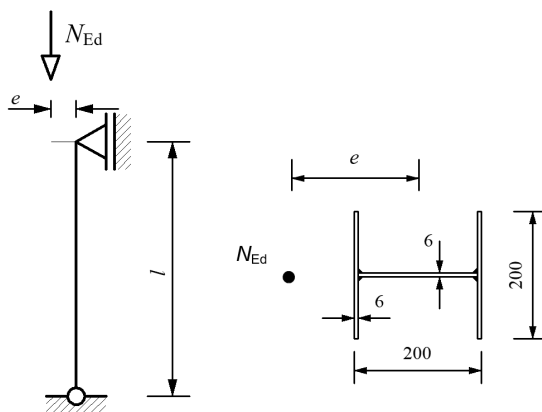
Como a carga axial aplicada é  $N_{Ed} = 250 \text{ kN}$ .

Então, o elemento apresenta resistência adequada à encurvadura por flexão.

|  |               |  |             |      |       |       |
|--|---------------|--|-------------|------|-------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 4 |  |             |      |       |       |
|  | Título        | Exemplo de Dimensionamento 2 – Viga-coluna com secção transversal I soldada e travamentos laterais |             |      |       |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel   | Feito por   | HS   | Data  | 07/02 |
|  |               |  | Revisto por | JBL  | Data  | 03/06 |
| Revisto por  |               |  | FW          | Data | 06/17 |       |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 2 – VIGA-COLUNA COM SECÇÃO TRANSVERSAL I SOLDADA E TRAVAMENTOS LATERAIS**

Dimensionamento de uma viga-coluna com secção transversal I soldada, simplesmente apoiada nas extremidades. O eixo de menor inércia está restringido por travamentos laterais. A altura entre pisos é igual a 3,5 m. Na viga-coluna atua uma carga vertical excêntrica em relação ao eixo de maior inércia.



**Estrutura**

Pilar simplesmente apoiado; altura entre apoios:

$$l = 3,50 \text{ m}$$

Excentricidade da carga:

$$e = 200 \text{ mm}$$

**Ações**

As ações permanentes e variáveis resultam numa força de compressão com direção vertical igual a:

$$N_{Ed} = 120 \text{ kN}$$

**Análise estrutural**

O momento fletor máximo ocorre no topo do pilar:

$$M_{y,max Ed} = 120 \times 0,20 = 24 \text{ kNm}$$

**Propriedades da secção transversal**

Considere uma secção soldada duplamente simétrica com secção em I e dimensões 200 × 200, espessura = 6,0 mm, aço inoxidável austenítico classe 1.4401.



**Propriedades geométricas**

$$\begin{aligned}
 b &= 200 \text{ mm} & t_f &= 6,0 \text{ mm} & W_{el,y} &= 259,1 \text{ cm}^3 \\
 h_w &= 188 \text{ mm} & t_w &= 6,0 \text{ mm} & W_{pl,y} &= 285,8 \text{ cm}^3 \\
 a &= 3,0 \text{ mm (espessura da soldadura)} & I_y &= 2591,1 \text{ cm}^4 \\
 A_g &= 35,3 \text{ cm}^2 & i_y &= 8,6 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

**Propriedades dos materiais**

$$\begin{aligned}
 f_y &= 220 \text{ N/mm}^2 \text{ (para chapas laminadas a quente).} \\
 E &= 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ e } G = 76900 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Tabela 2.2  
Secção 2.3**Classificação da secção transversal**

$$\varepsilon = 1,01$$

Alma sujeita a compressão:

$$c/t = \frac{(188 - 3 - 3)}{6} = 30,3$$

Para a Classe 1,  $c/t \leq 33,0\varepsilon$ , logo a alma é de Classe 1.

Banzo em consola sujeito a compressão:

$$c/t = \frac{(200/2 - 6/2 - 3)}{6} = 94/6 = 15,7$$

Para a Classe 3,  $c/t \leq 14,0\varepsilon$ , logo o banzo em consola é de Classe 4.

Portanto, a classificação geral da secção transversal é Classe 4.

Tabela 5.2

**Propriedades efetivas da secção**A alma é totalmente efetiva; cálculo do fator de redução  $\rho$  para banzos em consola soldados:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ mas } \leq 1$$

Eq. 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \text{ onde } \bar{b} = c = 94 \text{ mm}$$

Eq. 5.3

Assumindo uma distribuição uniforme da tensão no banzo sujeito à compressão:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1$$

$$\Rightarrow k_\sigma = 0,43$$

Tabela 5.4

$$\bar{\lambda}_p = \frac{94/6}{28,4 \times 1,01 \times \sqrt{0,43}} = 0,833$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1}{0,833} - \frac{0,188}{0,833^2} = 0,93$$

$$b_{\text{eff}} = 0,93 \times 94 = 87,4 \text{ mm}$$

Cálculo da secção transversal efetiva apenas para compressão:

$$A_{\text{eff}} = A_g - 4(1 - \rho)ct = 35,3 - 4 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 33,7 \text{ cm}^2$$

Cálculo da secção transversal efetiva para os eixos principais de flexão:

$$A_{\text{eff}} = A_g - 2(1 - \rho)ct = 35,3 - 2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 34,5 \text{ cm}^2$$

Tendo em conta o momento de inércia em relação ao eixo neutro da secção transversal bruta, calcula-se a mudança da posição do eixo neutro:

$$\bar{z}' = \frac{2 \times (1 - \rho)ct \times (h_w + t_f)/2}{A_{\text{eff}}} = \frac{2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times (188 + 6)/2}{34,5 \times 10^{-2}}$$

= 2,2 mm deslocado na direção oposta ao banzo em compressão.

Cálculo do momento de inércia efetivo para o eixo principal de flexão:

$$I_{\text{eff},y} = I_y - 2(1 - \rho)ct \left[ \frac{t^2}{12} + \frac{(h_w + t_f)^2}{4} \right] - \bar{z}'^2 A_{\text{eff}}$$

$$I_{\text{eff},y} = 2591,1 - 2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times \left[ \frac{6^2}{12} + \frac{(188 + 6)^2}{4} \right] \times 10^{-4} - (2,2)^2 \times 34,5 \times 10^{-2}$$

$$I_{\text{eff},y} = 2515,1 \text{ cm}^4$$

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h_w}{2} + t_f + \bar{z}'} = \frac{2515,1}{\frac{18,8}{2} + 0,6 + 0,22} = 246,1 \text{ cm}^3$$

### Resistência do eixo principal à encurvadura por flexão

$$N_{b,Rd} = \chi A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M1}$$

Eq. 6.3

$A_{\text{eff}} = 33,7 \text{ cm}^2$  para uma secção transversal de Classe 4 sujeita a compressão

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

Eq. 6.4

$$\varphi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

Eq. 6.5

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr}}}$$

Eq. 6.7

$L_{cr} = 350 \text{ cm}$  (comprimento de encurvadura é igual ao comprimento real)

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2591,1 \times 10^4}{350^2 \times 10^2} \times 10^{-3} = 4175,2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{33,7 \times 10^2 \times 220}{4175,2 \times 10^3}} = 0,421$$

Utilizando um fator de imperfeição  $\alpha = 0,49$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  para secções abertas soldadas, sujeitas a encurvadura sobre o eixo principal:

Tabela 6.1

$$\varphi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,421 - 0,2) + 0,421^2) = 0,643$$

$$\chi = \frac{1}{0,643 + [0,643^2 - 0,421^2]^{0,5}} = 0,886$$

$$N_{b,Rd,y} = 0,886 \times 33,7 \times 10^2 \times 220 \times 10^{-3} / 1,1 = 597,23 \text{ kN}$$

**Resistência à compressão axial e momento uniaxial no eixo principal**

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Eq. 6.56

$$\begin{aligned} \beta_{W,y} &= W_{\text{eff}} / W_{pl,y} \text{ para uma secção transversal de Classe 4} \\ &= 246,1 / 285,8 = 0,861 \end{aligned}$$

$e_{Ny}$  é zero, devido à simetria da secção transversal

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,0 + 2 \times (0,421 - 0,5) \times \frac{120,0}{597,23} = 0,968$$

Eq. 6.61

$$1,2 + \frac{2N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,2 + \frac{2 \times 120}{597,23} = 1,60$$

mas  $1,2 \leq k_y \leq 1,60$

$$\therefore k_y = 1,2$$

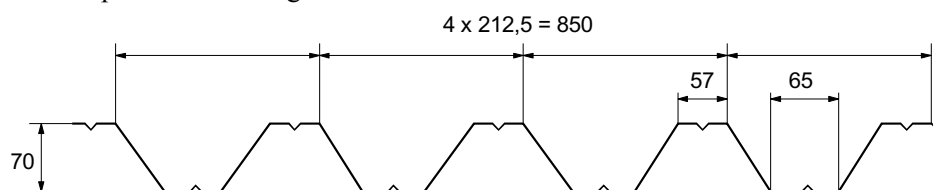
$$\frac{120,0}{597,23} + 1,2 \times \frac{24,0 \times 10^6}{0,861 \times 285,8 \times 10^3 \times 220 / 1,1} = 0,786 \leq 1$$

Assim, a viga-pilar apresenta a resistência adequada.

|  |               |   |           |      |       |
|--|---------------|---|-----------|------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 7 |   |           |      |       |
|  | Título        | Exemplo de Dimensionamento 3 – Chapa perfilada com dois vãos consecutivos |           |      |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel  | Feito por | AAT  | Data  |
|  |               | Revisto por   | JBL       | Data | 04/06 |
|  |               | Revisto por   | SL        | Data | 04/17 |

### EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 3 – CHAPA PERFILADA COM DOIS VÃOS CONSECUTIVOS

Dimensionamento de uma chapa perfilada com dois vãos. O material utilizado é o aço inox ferrítico de classe 1.4003 com 0,6 mm de espessura. As dimensões da secção transversal são as apresentadas na figura abaixo.



Este exemplo ilustra as seguintes etapas de dimensionamento:

- Determinação das propriedades da secção efetiva aos estados limites últimos;
- Determinação da resistência da secção à flexão;
- Determinação da resistência do apoio intermédio;
- Determinação dos deslocamentos máximos em relação aos estados limites de serviço.

#### Dados para dimensionamento

Vão  $L = 2900$  mm

Largura dos apoios  $s_s = 100$  mm

Carga de dimensionamento  $Q = 1,4$  kN/m<sup>2</sup>

Peso próprio  $G = 0,07$  kN/m<sup>2</sup>

Espessura  $t = 0,6$  mm

Tensão de cedência  $f_y = 280$  N/mm<sup>2</sup>

Módulo de elasticidade  $E = 200000$  N/mm<sup>2</sup>

Coefficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais  $\gamma_{M0} = 1,1$

Coefficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura  $\gamma_{M1} = 1,1$

Coefficiente parcial relativo às acções permanentes  $\gamma_G = 1,35$

Coefficiente parcial relativo às acções variáveis  $\gamma_Q = 1,5$

Os símbolos e as dimensões a ser utilizadas ao longo do dimensionamento, estão representadas na figura abaixo. A secção transversal é tal que o suporte do banzo superior se encontra em compressão.

Tabela 2.2

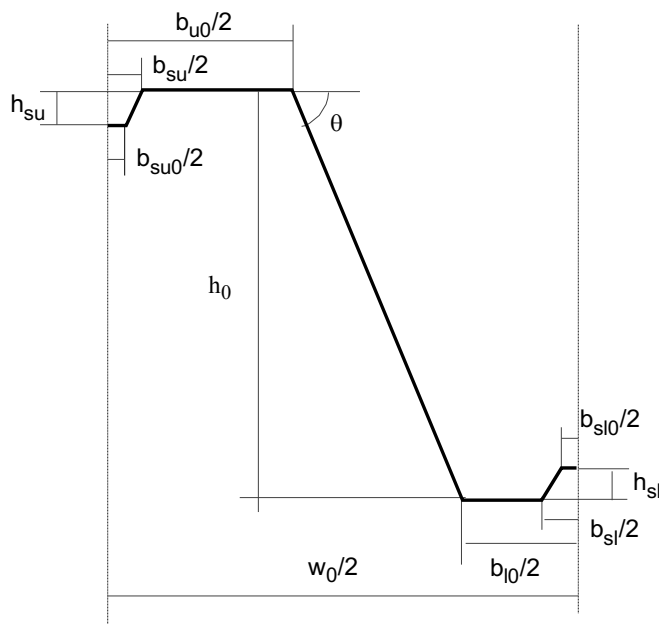
Secção 2.3.1

Tabela 4.1

Tabela 4.1

Secção 4.3

Secção 4.3



Dimensões em relação à linha média

$$h_0 = 70 \text{ mm}$$

$$w_0 = 212,5 \text{ mm}$$

$$b_{u0} = 65 \text{ mm}$$

$$b_{l0} = 57 \text{ mm}$$

$$b_{su} = 20 \text{ mm}$$

$$b_{su0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{su} = 6 \text{ mm}$$

$$b_{sl} = 20 \text{ mm}$$

$$b_{sl0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{sl} = 6 \text{ mm}$$

$r = 2 \text{ mm}$  (raio interno dos cantos)

Ângulo da alma:

$$\theta = \text{atan} \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \text{atan} \left| \frac{70}{0,5 \times (212,5 - 65 - 57)} \right| = 57,1^\circ$$

### Propriedades da secção efetiva para o estado limite último (ULS)

Verificação da largura máxima para os rácios de espessura:

$$h_0/t = 70/0,6 = 117 \leq 400 \sin \theta = 336$$

$$\max(b_{l0}/t; b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0,6 = 108 \leq 400$$

Ângulo da alma e raio do canto:

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

A influência dos cantos arredondados na resistência da secção transversal pode ser desprezada caso o raio interno  $r \leq 5t$  e  $r \leq 0,10b_p$

$$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t; 0,1b_p) = \min(5 \times 0,6; 0,1 \times 22,5) = 2,25 \text{ mm}$$

Logo, a influência dos cantos arredondados na resistência da secção transversal pode ser desprezada.

### Localização do centróide quando a alma é totalmente efetiva

Cálculo do fator de redução  $\rho$  para a largura efetiva do banzo comprimido:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ mas } \leq 1$$

Onde:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\bar{b} = b_p = 22,5 \text{ mm}$$

$$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$$

Secção 5.2

Tabela 5.1

Tabela 5.1

Secção 5.6.2

Secção 5.4.1  
Eq. 5.1

Eq. 5.3

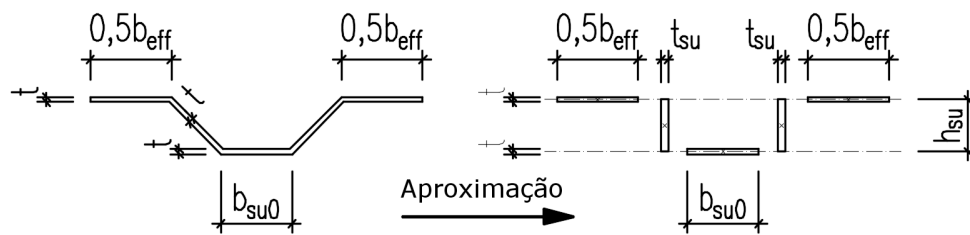
Tabela 5.3

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{280} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,894$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{22,5/0,6}{28,4 \times 0,894 \times \sqrt{4}} = 0,738$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,738} - \frac{0,079}{0,738^2} = 0,901 \leq 1$$

$$b_{\text{eff},u} = \rho \bar{b} = 0,901 \times 22,5 = 20,3 \text{ mm}$$

**Propriedades efetivas do reforço**

$$t_{\text{su}} = \frac{\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2}}{h_{\text{su}}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},u} + b_{\text{su}0})t + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}} = (20,3 + 8) \times 0,6 + 2 \times 6 \times 0,849 = 27,2 \text{ mm}^2$$

$$e_s = \frac{b_{\text{su}0}h_{\text{su}}t + 2h_{\text{su}}\frac{h_{\text{su}}}{2}t_{\text{su}}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0,6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0,849}{27,2} = 2,18 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{\text{su}0}t(h_{\text{su}} - e_s)^2 + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}}\left(\frac{h_{\text{su}}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{\text{su}0}t^3}{12} + 2\frac{t_{\text{su}}h_{\text{su}}^3}{12}$$

$$I_s = 2 \times (15 \times 0,6^2 \times 2,18^2) + 8 \times 0,6 \times (6 - 2,18)^2 + 2 \times 6 \times 0,849 \times \left(\frac{6}{2} - 2,18\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0,6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0,6^3}{12} + 2 \times \frac{0,849 \times 6^3}{12} = 159,25 \text{ mm}^4$$

$$b_s = 2\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2} + b_{\text{su}0} = 2\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2} + 8 = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \left[ I_s b_p^2 \left( \frac{2b_p + 3b_s}{t^3} \right) \right]^{1/4}$$

$$l_b = 3,07 \times \left[ 159,25 \times 22,5^2 \times \left( \frac{2 \times 22,5 + 3 \times 25}{0,6^3} \right) \right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{212,5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83,4 \text{ mm}$$

Tabela 5.2

Eq. 5.3

Tabela 5.3

Secção 5.5.3

Fig. 5.3

Fig. 5.3

Eq. 5.10

Fig. 5.5

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22,5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = \sqrt{\frac{83,4 + 2 \times 70}{83,4 + 0,5 \times 70}} = 1,37$$

Eq. 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83,4} = 3,01 \geq 2 \Rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Eq. 5.8

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}}$$

Eq. 5.4

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \times 1,37 \times 200 \times 10^3}{27,2} \times \sqrt{\frac{159,25 \times 0,6^3}{4 \times 22,5^2 \times (2 \times 22,5 + 3 \times 25)}} = 503,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{280}{503,4}} = 0,746$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,746 < 1,38 \Rightarrow$$

Eq. 5.17

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 0,746 = 0,93$$

$$t_{red,u} = \chi_d t = 0,93 \times 0,6 = 0,558 \text{ mm}$$

Distância do eixo neutro ao banzo comprimido:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{h_{sl}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin\theta = 0,6 / \sin(57,1^\circ) = 0,714 \text{ mm}$$

| $e_i$ [mm]             | $A_i$ [mm <sup>2</sup> ]        |
|------------------------|---------------------------------|
| 0                      | $0,5b_{eff,u} t = 6,1$          |
| 0                      | $0,5b_{eff,u} \chi_d t = 5,66$  |
| $0,5h_{su} = 3$        | $h_{su} \chi_d t_{su} = 4,74$   |
| $h_{su} = 6$           | $0,5b_{su0} \chi_d t = 2,23$    |
| $0,5h_0 = 35$          | $h_0 t_w = 49,98$               |
| $h_0 = 70$             | $0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$ |
| $h_0 - 0,5h_{sl} = 67$ | $h_{sl} t_{sl} = 5,09$          |
| $h_0 - h_{sl} = 64$    | $0,5b_{sl0} t = 2,4$            |

$$A_{tot} = \sum A_i = 87,3 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 34,9 \text{ mm}$$

**Secção transversal efetiva da zona comprimida da alma**

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{200}{1,1 \times 280 \times 10^{-3}}} = 11,6 \text{ mm}$$

EN 1993-1-3  
Cláusula  
5.5.3.4.3(4-5)

$$s_{eff,n} = 1,5s_{eff,0} = 1,5 \times 11,6 = 17,4 \text{ mm}$$

**Propriedades da secção transversal por meia nervura**

$$h_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},1} \sin \theta = 11,6 \times \sin(57,1^\circ) = 9,74 \text{ mm}$$

$$h_{\text{eff},n} = s_{\text{eff},n} \sin \theta = 17,4 \times \sin(57,1^\circ) = 14,61 \text{ mm}$$

| $e_{\text{eff},i}$ [mm]                          | $A_{\text{eff},i}$ [mm <sup>2</sup> ]       | $I_{\text{eff},i}$ [mm <sup>4</sup> ]                      |
|--|---|--|
| 0  | $0,5b_{\text{eff},u}t = 6,1$                | $\approx 0$  |
| 0  | $0,5b_{\text{eff},u} \chi_d t = 5,7$        | $\approx 0$  |
| $0,5h_{\text{su}} = 3$                           | $h_{\text{su}} \chi_d t_{\text{su}} = 4,7$  | $\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 = 14,2$         |
| $h_{\text{su}} = 6$                              | $0,5b_{\text{su}0} \chi_d t = 2,2$          | $\approx 0$  |
| $0,5h_{\text{eff},1} = 4,9$                      | $h_{\text{eff},1} t_w = 7,0$                | $t_w h_{\text{eff},1}^3 / 12 = 55,0$                       |
| $h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) = 45,1$ | $(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) t_w = 35,5$ | $t_w \frac{(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3}{12} = 7308,8$ |
| $h_0 = 70$                                       | $0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$             | $\approx 0$  |
| $h_0 - 0,5h_{sl} = 67$                           | $h_{sl} t_{sl} = 5,1$                       | $t_{sl} h_{sl}^3 / 12 = 15,3$                              |
| $h_0 - h_{sl} = 64$                              | $0,5b_{sl0} t = 2,4$                        | $\approx 0$  |

$$A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff},i} = 79,8 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_{\text{eff},i} e_{\text{eff},i}}{A_{\text{tot}}} = 36,8 \text{ mm}$$

$$I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff},i} + \sum A_{\text{eff},i} (e_c - e_{\text{eff},i})^2 = 7393,3 + 51667,2 = 59060,5 \text{ mm}^4$$

Como opção, as propriedades efetivas da secção também podem ser redefinidas iterativamente com base na localização do eixo efetivo do centroide.

EN 1993-1-3

**Resistência à flexão por unidade de largura (1 m)**

Secção 5.7.4

$$I = \frac{1000}{0,5W_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 59060,5 = 555863,5 \text{ mm}^4$$

$$W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{555863,5}{36,8} = 15105,0 \text{ mm}^3$$

$$W_1 = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{555863,5}{70 - 36,8} = 16742,9 \text{ mm}^3$$

$$\text{Porque } W_u < W_1 \Rightarrow W_{\text{eff},\text{min}} = W_u = 15105,0 \text{ mm}^3$$

$$M_{c,\text{Rd}} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15105,0 \times 280 \times 10^{-6}}{1,1} = 3,84 \text{ kNm}$$

Eq. 5.31

**Determinação da resistência no suporte intermédio**

Secção 6.4.4

**Resistência ao enrugamento da alma**

$$c \geq 40 \text{ mm}$$

$$r/t = 2/0,6 = 3,33 \leq 10$$

EN 1993-1-3

$$h_w/t = 70/0,6 = 117 \leq 200 \sin \theta = 200 \sin(57,1^\circ) = 168$$

Cláusula 6.1.7



$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$\beta_V = 0 \leq 0,2 \Rightarrow l_a = s_s = 100 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,15 \text{ (categoria 2)}$$

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}}\right) \left[2,4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000}{0,5 w_0}$$

$$R_{w,Rd} = 0,15 \times 0,6^2 \sqrt{280 \times 200\,000} \times \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{2}{0,6}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \times \frac{100}{0,6}}\right) \times \left[2,4 + \left(\frac{57,1}{90}\right)^2\right] \times \frac{1}{1,1} \times \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 10^{-3} = 18,4 \text{ kN}$$

EN 1993-1-3  
Eq. 6.18

### Combinação do momento fletor e do esforço axial no apoio

Ações por unidade de largura (1 m):

$$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1,35 \times 0,07 + 1,5 \times 1,4 = 2,19 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2,19 \times 2,9^2}{8} = 2,30 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4} qL = \frac{5}{4} \times 2,19 \times 2,9 = 7,94 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{2,30}{3,84} = 0,599 \leq 1,0$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{7,94}{18,4} = 0,432 \leq 1,0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,599 + 0,432 = 1,031 \leq 1,25$$

EN 1993-1-3  
Eq. 6.28a - c

A resistência da secção transversal satisfaz as condições.

### Determinação dos deslocamentos máximos para o estado limite de serviço (SLS)

#### Propriedades efetivas da secção transversal

Para a verificação de serviço, a largura efetiva dos elementos sujeitos à compressão deve ser baseada no esforço de compressão do elemento devido ao carregamento calculado de acordo com a SLS.

O esforço de compressão máximo na secção efetiva para o SLS é feita uma aproximação conservadora com base em:  $W_u$  determinado acima para o ULS.

EN 1993-1-3  
Cláusula  
5.5.1

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G + Q)L^2}{8} = \frac{(0,07 + 1,4) \times 2,9^2}{8} = 1,55 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{1,55 \times 10^6}{15\,105} = 102,6 \text{ N/mm}^2$$

As propriedades da secção efetiva são determinadas como anteriormente para o ULS, com exceção de  $f_y$  que é substituído por  $\sigma_{com,Ed,ser}$  e a espessura do reforço do banzo não é reduzida. Os resultados dos cálculos são:

Largura efetiva do banzo comprimido:

Localização do centroide quando a alma é totalmente efetiva: O banzo é totalmente efetivo.

Secção transversal efetiva da zona da alma comprimida:  $e_c = 34,48 \text{ mm}$

Propriedades efetivas da secção transversal por meia nervura: A alma é totalmente efetiva.

Propriedades efetivas da secção por unidade de largura (1 m):

$$A_{\text{tot}} = 88,41 \text{ mm}^2$$

$$e_c = 34,48 \text{ mm}$$

$$I_{\text{tot}} = 63759,0 \text{ mm}^4$$

$$I = 600084,7 \text{ mm}^4$$

$$W_u = 17403,8 \text{ mm}^3$$

$$W_l = 16894,3 \text{ mm}^3$$

### Determinação do deslocamento máximo

Módulo de elasticidade secante correspondente ao valor máximo do momento fletor:

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_u} = \frac{1,55 \times 10^6}{17403,8} = 89,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_l} = \frac{1,55 \times 10^6}{16894,3} = 91,75 \text{ N/mm}^2$$

$n = 14$  (para aço inoxidável ferrítico 1.4003)

$$E_{S,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,089} \left( \frac{0,089}{0,28} \right)^{14}} = 200,0 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_{S,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,092} \left( \frac{0,092}{0,28} \right)^{14}} = 200,0 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_S = \frac{E_{S,1} + E_{S,2}}{2} = \frac{200 + 200}{2} = 200 \text{ kN/mm}^2$$

Não há efeito de não-linearidade material no cálculo do deslocamento máximo para a classe de aço e para o nível de tensão considerados.

### Verificação do deslocamento máximo:

No cálculo das propriedades da rigidez da secção transversal, deve ser considerado o efeito dos cantos arredondados. A influência é calculada pela seguinte aproximação:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{2 \times \frac{294,2^\circ}{90^\circ}}{149,3} = 0,019$$

$$I_{y,r} = I (1 - 2\delta) = 600084,7 (1 - 2 \times 0,019) = 577281,5 \text{ mm}^4$$

Para a localização do deslocamento máximo:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 2,9 = 1,22 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_S I_{y,r}} \left( \frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right)$$

$$\delta = \frac{(0,07 + 1,4) \times 10^3 \times 2,9^4}{48 \times 200 \times 10^6 \times 577281,5 \times 10^{-12}} \times \left( \frac{1,48}{2,9} - 3 \times \frac{1,48^3}{2,9^3} + 2 \times \frac{1,48^4}{2,9^4} \right)$$

$$\delta = 4,64 \text{ mm}$$

O deslocamento máximo permitido é  $L/200 = 2900/200 = 14,5 \text{ mm} > 4,64 \text{ mm}$ , portanto, o deslocamento calculado é aceitável.

Tabela 6.4

Eq. 6.53

Eq. 6.53

Eq. 6.52

Eq. 5.22

Eq. 5.20



|  |               |   |             |      |       |       |
|--|---------------|---|-------------|------|-------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 2 |   |             |      |       |       |
|  | Título        | Exemplo de dimensionamento 4 – Fadiga numa ligação soldada entre perfis tubulares |             |      |       |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel  | Feito por   | AAAT | Data  | 06/02 |
|  |               |   | Revisto por | MEB  | Data  | 04/06 |
|  |               | Revisto por   | UDE         | Data | 01/17 |       |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 4 – FADIGA NUMA LIGAÇÃO SOLDADA ENTRE PERFIS TUBULARES**

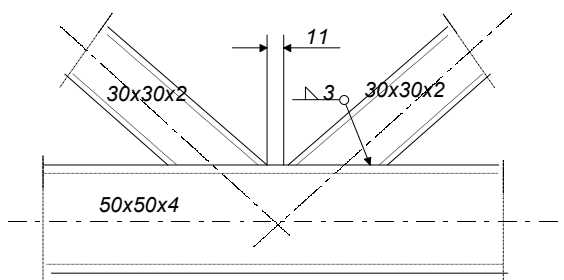
Cálculo da resistência à fadiga de uma das cordas de uma ligação tubular soldada. A fadiga deve ser considerada no dimensionamento de estruturas em aço inoxidável que estão sujeitas a ações cíclicas, ex.: plataformas petrolíferas, postes, chaminés, pontes, guias e equipamentos de transporte.

Para estimar a resistência à fadiga de estruturas em aço inoxidável austeníticos e duplex aplica-se a EN 1993-1-9

Este exemplo segue os seguintes procedimentos:

- Determinação da curva de resistência à fadiga;
- Determinação de momentos fletores secundários na ligação;
- Determinação dos coeficientes parciais de segurança para o cálculo da resistência à fadiga;
- Determinação da variação das amplitudes de carga de fadiga.

A secção transversal das cordas da ligação são perfis de secção RHS 50×50×4 e as diagonais são perfis de secção RHS 30×30×2. O material utilizado é um aço inoxidável austenítico de classe 1.4301 com uma tensão limite de proporcionalidade a 0,2% igual a 210 N/mm<sup>2</sup>.



**Ações**

O espectro das tensões de fadiga a considerar para a corda durante o tempo de vida útil considerado é:

Variação das tensões nominais:

$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$

$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$

$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$

Número de ciclos:

$n_1 = 10 \times 10^3$

$n_2 = 100 \times 10^3$

$n_3 = 1000 \times 10^3$

Secção 9

Tabela 2.2

| Exemplo de dimensionamento 4  | Página 2 de 2                            |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |
|---|--|--------------------------|---|-------------------------|---|--------------------------|--|------------------|---|------------------|---|------------------|--|
| <p><b>Análise estrutural</b></p> <p>A categoria do pormenor de construção da junta depende das dimensões da corda e dos elementos diagonais. Neste exemplo <math>b_0 = 50</math> mm, <math>b_i = 30</math> mm, <math>t_0 = 4</math> mm e <math>t_i = 2</math> mm.</p> <p>Uma vez que <math>t_0/t_i = 2</math>, tem-se que a categoria do pormenor de construção é 71.</p> <p>Dado que <math>0,5(b_0 - b_i) = 10</math> mm, <math>g = 11</math> mm, <math>1,1(b_0 - b_i) = 22</math> mm e <math>2t_0 = 8</math> mm, a junta também satisfaz a seguinte condição <math>0,5(b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_i)</math> e <math>g \geq 2t_0</math>.</p> <p><b>Efeito dos momentos fletores secundários na ligação</b></p> <p>Os efeitos dos momentos fletores secundários são tidos em conta multiplicando a amplitude de tensão devido aos esforços axiais por um coeficiente <math>k_1 = 1,5</math>.</p> <p><b>Coeficientes parciais de segurança</b></p> <p>Quando se assume o dano controlado da estrutura e que a consequência de falha é baixa, o valor recomendado para o coeficiente parcial para a resistência à fadiga é <math>\gamma_{Mf} = 1,0</math>.</p> <p><b>Verificação à fadiga</b></p> <p>O valor de referência de resistência à fadiga correspondente a <math>2 \times 10^6</math> ciclos para a categoria do pormenor 71 é <math>\Delta\sigma_c = 71</math> N/mm<sup>2</sup>.</p> <p>A curva de resistência à fadiga para vigas reticuladas possui um declive constante <math>m = 5</math>.</p> <p>O número de flutuações de tensão correspondentes à amplitude de tensão nominal <math>\Delta\sigma_i</math> é:</p> $N_i = 2 \times 10^6 \left[ \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf} \gamma_{FF} (k_1 \Delta\sigma_i)} \right]^m$ <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"><math>\Delta\sigma_1 = 100</math> N/mm<sup>2</sup></td> <td style="width: 50%;"><math>N_1 = 47,5 \times 10^3</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_2 = 70</math> N/mm<sup>2</sup></td> <td><math>N_2 = 283 \times 10^3</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_3 = 40</math> N/mm<sup>2</sup></td> <td><math>N_3 = 4640 \times 10^3</math></td> </tr> </table> <p><b>Dano acumulado (regra de Palmgren-Miner)</b></p> <p>Dano parcial devido a <math>n_i</math> ciclos com um determinado intervalo de tensão <math>\Delta\sigma_i</math>: <math>D_{d,i} = n_{Ei} / N_{Ri}</math>.</p> <p>Portanto, para:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;"><math>\Delta\sigma_1 = 100</math> N/mm<sup>2</sup></td> <td style="width: 50%;"><math>D_{d,1} = 0,21</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_2 = 70</math> N/mm<sup>2</sup></td> <td><math>D_{d,2} = 0,35</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_3 = 40</math> N/mm<sup>2</sup></td> <td><math>D_{d,3} = 0,22</math></td> </tr> </table> <p>O dano acumulado durante o tempo de vida é:</p> $D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = \sum D_{d,i} = 0,78 \leq 1,0$ <p>Como o dano acumulado é menor do que a unidade, a vida de projeto calculada para a corda excede a vida de projeto requerida.</p> <p>O procedimento descrito acima deve ser repetido para as diagonais.</p> | $\Delta\sigma_1 = 100$ N/mm <sup>2</sup> | $N_1 = 47,5 \times 10^3$ | $\Delta\sigma_2 = 70$ N/mm <sup>2</sup> | $N_2 = 283 \times 10^3$ | $\Delta\sigma_3 = 40$ N/mm <sup>2</sup> | $N_3 = 4640 \times 10^3$ | $\Delta\sigma_1 = 100$ N/mm <sup>2</sup> | $D_{d,1} = 0,21$ | $\Delta\sigma_2 = 70$ N/mm <sup>2</sup> | $D_{d,2} = 0,35$ | $\Delta\sigma_3 = 40$ N/mm <sup>2</sup> | $D_{d,3} = 0,22$ | <p>Todas as referências subsequentes à EN 1993-1-9</p> <p>Tabela 8.7</p> <p>Cláusula 4 (2), Tabela 4.2</p> <p>Cláusula 3 (7), Tabela 3.1</p> <p>Figura 7.1</p> <p>A.5 (1)</p> <p>Eq. A.1</p> <p>Cláusula 8 (4)</p> |
| $\Delta\sigma_1 = 100$ N/mm <sup>2</sup>  | $N_1 = 47,5 \times 10^3$                 |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |
| $\Delta\sigma_2 = 70$ N/mm <sup>2</sup>   | $N_2 = 283 \times 10^3$                  |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |
| $\Delta\sigma_3 = 40$ N/mm <sup>2</sup>   | $N_3 = 4640 \times 10^3$                 |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |
| $\Delta\sigma_1 = 100$ N/mm <sup>2</sup>  | $D_{d,1} = 0,21$                         |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |
| $\Delta\sigma_2 = 70$ N/mm <sup>2</sup>   | $D_{d,2} = 0,35$                         |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |
| $\Delta\sigma_3 = 40$ N/mm <sup>2</sup>   | $D_{d,3} = 0,22$                         |                          |   |                         |   |                          |  |                  |   |                  |   |                  |  |

**Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)**

**FOLHA DE CÁLCULO**

Título Exemplo de dimensionamento 5 – Ligação soldada

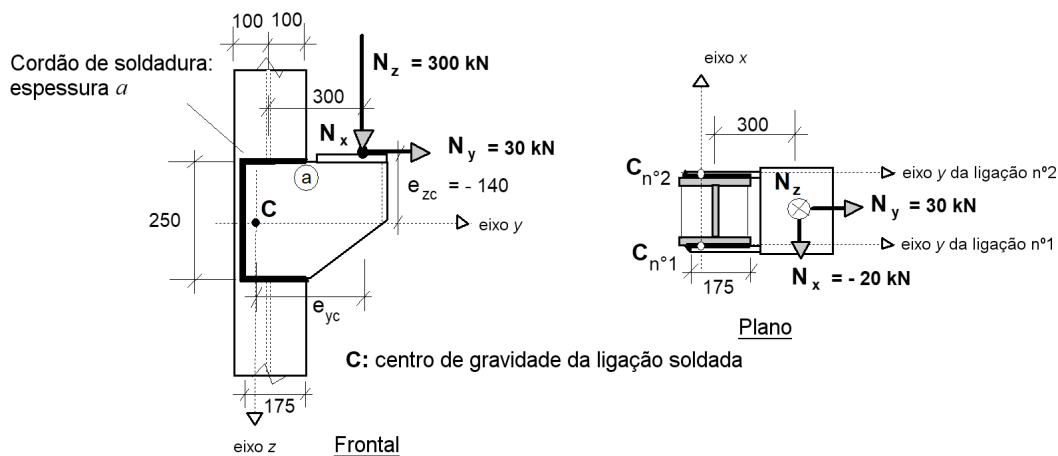
Cliente Research Fund for Coal and Steel

|             |     |      |       |
|-------------|-----|------|-------|
| Feito por   | IR  | Data | 08/02 |
| Revisto por | MEB | Data | 04/06 |
| Revisto por | UDE | Data | 01/17 |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 5 – LIGAÇÃO SOLDADA**

Na figura abaixo, está representado a configuração da ligação e as cargas que nela atuam.

A carga atua igualmente nas duas ligações soldadas com soldadura de ângulo de cordão de espessura constante. Determinar a espessura do cordão de soldadura. Soldadura em ângulo reto (abas iguais) serão utilizadas.



**Propriedades dos materiais**

Considerar aço inox austenítico da classe 1.4401:

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2, f_u = 530 \text{ N/mm}^2, E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ e } G = 76900 \text{ N/mm}^2.$$

Assumir que tanto a tensão de cedência como a tensão última das soldaduras são superiores às do material base.

**Coefficiente parcial de segurança**

O coeficiente parcial de segurança a considerar para a resistência das soldaduras é  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

É necessário incluir um fator de redução no cálculo da resistência da soldadura para se ter em conta o comprimento estudado.

Tabela 2.2  
Secção 2.3.1  
Secção 7.4.1

Tabela 4.1

**Análise de ligações soldadas**

O dimensionamento da soldadura em ângulo reto para o caso de carga indicado acima será feito através de uma análise elástica. Deste modo, será obtido um valor conservativo da resistência da ligação.

EN 1993-1-8  
clausula 2.5

As coordenadas ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ) de um determinado ponto da ligação serão calculadas tendo como referencia o sistema de eixos com origem no centro de gravidade da ligação ( no presente caso a ligação está no plano y-z, portanto  $x_c = 0$ ).

O principal objetivo da utilização de uma análise elástica é obter as forças de dimensionamento a atuar na soldadura no(s) ponto(s) mais crítico(s) da ligação. Na presente ligação, os pontos críticos são tidos como os pontos mais afastados do centro de gravidade da ligação.

Os vetores da força atuante, a excentricidade da mesma e os momentos fletores resultantes dessa excentricidade que atuam numa ligação soldada com centro de gravidade C, podem ser determinados como indicado abaixo:

Força atuante

$$\overline{N}_{w,Ed} = [N_{x,Ed}, N_{y,Ed}, N_{z,Ed}]$$

Excentricidades da força atuante

$$\overline{e}_N = [e_{xc}, e_{yc}, e_{zc}]$$

(estas são as coordenadas do ponto de aplicação da força)

Momentos fletores atuantes

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed}$$

Ao adotar uma análise elástica linear da ligação para um determinado caso de carga, a força por unidade de comprimento da soldadura a atuar no ponto com coordenadas ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ), pode ser decomposta nos seguintes componentes (a espessura do cordão de soldadura é denominada por  $a$ ):

$$F_{wx,Ed} = a \left[ \frac{N_{x,Ed}}{A_w} + \frac{z_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} - \frac{y_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} \right]$$

$$F_{wy,Ed} = a \left[ \frac{N_{y,Ed}}{A_w} + \frac{x_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} - \frac{z_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} \right]$$

$$F_{wz,Ed} = a \left[ \frac{N_{z,Ed}}{A_w} + \frac{y_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} - \frac{x_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} \right]$$

A área da seção do cordão de soldadura a considerar para a resistência da ligação e os momentos de inércia segundo os eixos principais da ligação, são dados pelas expressões abaixo:

$$A_w = \int a dl = \sum a_i l_i$$

Para uma soldadura de segmentos retos de comprimento  $l_i$  e com uma espessura do cordão de soldadura igual a  $a_i$ ,

$$I_{xc} = \int a (y_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{yc} = \int a (x_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{zc} = \int a (x_c^2 + y_c^2) dl$$

Assumindo que todas as soldaduras têm uma espessura igual a  $a$ :

$$\frac{A_w}{a} = \int dl = \sum l_i$$

E visto que  $x_c = 0$ :

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 dl$$

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 dl$$

$$\frac{I_{xc}}{a} = \int y_c^2 + z_c^2 dl = \frac{I_{yc}}{a} + \frac{I_{zc}}{a}$$

### Dimensionamento de soldaduras de ângulo

Podem ser utilizados dois métodos no dimensionamento de soldadura de ângulo e desta maneira, determinar a espessura de cordão de soldadura necessária no ponto crítico:

O primeiro procedimento é baseado num dimensionamento simplificado e mais conservativo da resistência ao corte da soldadura de ângulo. O valor de cálculo do esforço de corte atuante por unidade de comprimento da soldadura num determinado ponto é definido como a soma dos vetores das forças de dimensionamento por unidade de comprimento provenientes de todas as forças e momentos fletores transmitidos pela ligação. Este valor de cálculo, não deverá exceder o valor de cálculo da resistência ao corte por unidade de comprimento da soldadura que é determinado multiplicando o valor de cálculo da resistência da soldadura pela espessura do cordão de soldadura.

O segundo procedimento é baseado na comparação do valor de cálculo da resistência da zona mais fraca da ligação com as tensões aplicadas na soldadura determinadas tendo em conta a formulação de Von Mises. Este procedimento é o procedimento mais preciso, pois permite considerar a orientação do plano da espessura em relação à direção da força na soldadura por unidade de comprimento.

#### 1. Método simplificado

O valor do cálculo do esforço atuante numa soldadura de ângulo é dado pela seguinte expressão:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} \leq F_{w,Rd} = a f_{vw,d} = a \left( \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)$$

onde:

$f_{vw,d}$  é o valor de cálculo da resistência ao corte da soldadura,

$F_{w,Rd}$  é o valor de cálculo da resistência ao corte da soldadura por unidade de comprimento.

Para aço inoxidável,  $\beta_w$  é considerado igual a 1,0.

Secção 7.4.2

EN 1993-1-8  
clausula  
4.5.3.3

Secção 7.4.2



Quando o procedimento requiere a obtenção da espessura do cordão de soldadura, deverá ser utilizada a seguinte expressão:

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}}$$

## 2. Método direcional

No método direcional, as forças transmitidas à soldadura são decompostas em forças normais e transversais em relação ao eixo longitudinal da soldadura (ver Fig. 4.5 em EN 1993-1-8):

- Tensão normal  $\sigma_{\perp}$  perpendicular à espessura,
- Tensão tangencial  $\tau_{\parallel}$  no plano da espessura e paralela ao eixo da soldadura,
- Tensão tangencial  $\tau_{\perp}$  no plano da espessura e perpendicular ao eixo da soldadura.

Não é necessário considerar a tensão normal  $\sigma_{\parallel}$  paralela ao eixo de soldadura.

Para a combinação de tensões stresses  $\sigma_{\perp}$ ,  $\tau_{\parallel}$  e  $\tau_{\perp}$ , é necessário satisfazer as duas condições seguintes:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{and} \quad \sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Eqs. 7.14 e 7.15

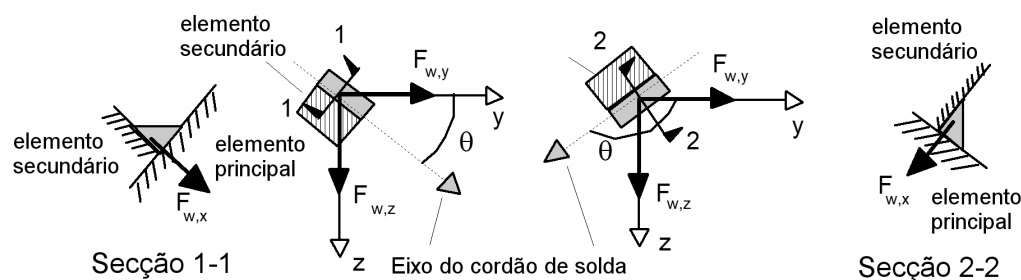
No caso de uma ligação soldada com soldaduras em ângulo reto (abas iguais) as condições acima apresentadas não são críticas. No entanto, poderão ser críticas em ligações de canto com soldadura de penetração parcial.

Em vez de calcular as componentes de tensões a atuar no cordão de soldadura, pode ser utilizada a seguinte expressão de dimensionamento para a ligação no plano  $y$ - $z$  com soldaduras em ângulo reto (abas iguais):

$$2F_{w,x}^2 + 2F_{w,y}^2 + 2F_{w,z}^2 + F_{w,y}^2 \cos^2 \theta + F_{w,z}^2 \sin^2 \theta - 2F_{w,x} F_{w,y} \sin \theta + 2F_{w,x} F_{w,z} \cos \theta + 2F_{w,y} F_{w,z} \sin \theta \cos \theta \leq \left( a \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)^2$$

*Nota:* Os índices foram encurtados:  $F_{w,x}$  para  $F_{w,x,Ed}$  etc.

Na expressão acima, o ângulo  $\theta$  é o ângulo entre o eixo  $y$  e o eixo da soldadura, como representado na figura abaixo:



**As componentes das forças no ponto crítico da soldadura são determinadas no anexo deste exemplo de dimensionamento.**

## 1. Método simplificado

A força de cálculo de corte utilizada no método simplificado é;

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} = \frac{530}{1,0 \times 1,25 \times \sqrt{3}} \approx 245 \text{ N/mm}^2$$

EN 1993-1-8:  
Eq. 4.4

O valor da força resultante induzida por unidade de comprimento numa garganta de soldadura com 1 mm é:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} = \sqrt{243^2 + 747^2 + 966^2} = 1245 \text{ N/mm}$$

A espessura do cordão de soldadura requerida é portanto:

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}} = \frac{1245}{245} \approx 5,0 \text{ mm}$$

## 2. Método direcional

No ponto (a), onde o ângulo  $\theta$  é  $0^\circ$ , a expressão de verificação do dimensionamento é:

$$2F_{wx,Ed}^2 + 3F_{wy,Ed}^2 + 2F_{wz,Ed}^2 + 2F_{wx,Ed}F_{wz,Ed} \leq \left( a \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \right)^2$$

A espessura do cordão de soldadura requerida é portanto:

$$a \geq \frac{\sqrt{2 \times (-243)^2 + 3 \times (747)^2 + 2 \times (966)^2 + 2 \times (-243) \times (966)}}{530/1,25} = 4,8 \text{ mm}$$

Adotar uma espessura do cordão de soldadura de 5 mm e assumir que a soldadura ao longo de todo o comprimento da secção.

*Nota: É necessário um fator de redução quando o comprimento efetivo da soldadura de canto for superior a  $150a$ . O fator de redução parece não ser relevante para o presente caso. No entanto, ao considerar por segurança o comprimento total da ligação soldada e uma espessura do cordão de soldadura de 5 mm, obtém-se:*

$$\beta_{LW,1} = 1,2 - \frac{0,2L_j}{150a} = 1,2 - \frac{0,2 \times 600}{150 \times 5} = 1,04 > 1,0$$

Tendo  $\beta_{LW,1} = 1,0$ .

Conclui-se que não é necessário o uso de um fator de redução na resistência da soldadura.

EN 1993-1-8  
Eq. 4.9

## Anexo I – Cálculo dos componentes da força no ponto crítico da soldadura

### Propriedades geométricas da ligação soldada

Existem duas ligações semelhantes, uma em cada lado da coluna, resistindo às cargas aplicadas. Apenas uma das ligações precisa de ser avaliada.

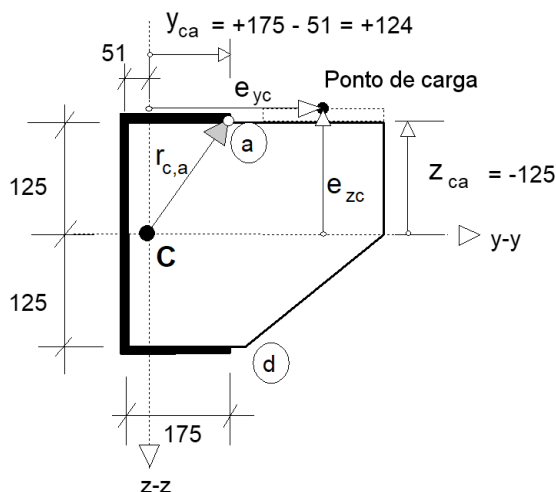
#### Área do cordão de soldadura e posições do centro de gravidade e ponto crítico

A área do cordão de soldadura (secção resistente) de cada uma das ligações constituídas por segmentos retos de comprimento  $L_i$  e espessura do cordão constante  $a$  é para cada 1 mm de espessura:

$$\frac{A_w}{a} = \frac{a \int ds}{a} = \frac{\sum A_{w,i}}{a} = \frac{\sum aL_{w,i}}{a} = \sum L_i = 2 \times 175 + 250 = 600 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Distância do centro de gravidade do lado vertical (paralelo ao eixo z) da ligação com espessura de cordão constante  $a$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i \frac{A_{w,i}}{a}}{\sum \frac{A_{w,i}}{a}} = \frac{\sum y_i L_i}{\sum L_i} = \frac{2 \times (87,5 \times 175) + 0 \times 250}{600} \approx 51 \text{ mm}$$



As coordenadas do ponto crítico da junta (a) em relação aos eixos principais através do centro de gravidade C são:

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = -125 \text{ mm}$$

*Nota:* O ponto (d) também pode ser escolhido como ponto crítico potencial, para o qual:

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = +125 \text{ mm}$$

No entanto, para o caso de carga considerado, é evidente que o ponto (a) é o mais crítico.

#### Momento de inércia da secção resistente da junta

Para cada uma das ligações, para cada 1 mm de espessura do cordão de soldadura:

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 ds = 2 \times 175 \times 125^2 + \frac{250^3}{12} = 6,77 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 ds = 250 \times 51^2 + 2 \times \frac{175^3}{12} + 2 \times 175 \times (87,5 - 51)^2 = 2,01 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Para o momento torsor, a inércia relevante por junta é:

$$I_{xc} = a \int r_c^2 ds = a \int y_c^2 ds + a \int z_c^2 ds = I_{zc} + I_{yc}$$

De modo a:

$$\frac{I_{xc}}{a} = (6,77 + 2,01) \times 10^6 = 8,78 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

#### Forças e momentos aplicados

É assumido que as cargas e momentos aplicados são igualmente partilhados por ambas as ligações.

Os componentes da força axial e de corte aplicados por ligação são:

$$N_{x,Ed} = -\frac{20}{2} = -10 \text{ kN} \quad N_{y,Ed} = +\frac{30}{2} = +15 \text{ kN} \quad N_{z,Ed} = +\frac{300}{2} = +150 \text{ kN}$$

Os momentos aplicados são calculados utilizando os componentes da força aplicada e as suas excentricidades. As excentricidades, isto é, as coordenadas do ponto de carga efetivo são:

$e_{xc} = 0$ , como o ponto efetivo de carga é considerado como sendo no plano  $y$ - $z$  da ligação

$$e_{yc} = 300 - 100 + 175 - 51 = + 324 \text{ mm}$$

$$e_{zc} = - 140 \text{ mm}$$

Como resultado os momentos aplicados por ligação são:

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed} = (+324) \times (+150) - (-140) \times (+15) = +50,7 \text{ kNm}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed} = (-140) \times (-10) - (0) \times (+150) = +1,4 \text{ kNm}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed} = (0) \times (+15) - (+324) \times (-10) = +3,24 \text{ kNm}$$

### Componentes da força no ponto crítico da soldadura

Para a ligação no plano  $y$ - $z$ , os componentes da força por unidade de comprimento da soldadura, no ponto (a) são os seguintes:

$$F_{wx,Ed} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w/a} + \frac{z_{ca} M_{yc,Ed}}{I_{yc}/a} - \frac{y_{ca} M_{zc,Ed}}{I_{zc}/a}$$

$$F_{wy,Ed} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w/a} - \frac{z_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc}/a}$$

$$F_{wz,Ed} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w/a} - \frac{y_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc}/a}$$

As contribuições para os componentes da força de soldadura (em todos os pontos da ligação soldada) a partir dos componentes da força aplicada são:

$$F_{w,x}^{N_x} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w/a} = \frac{-10}{600} = -17 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,y}^{N_y} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w/a} = \frac{+15}{600} = +25 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{N_z} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w/a} = \frac{+150}{600} = + 250 \text{ N/mm}$$

As várias contribuições para os componentes da força de soldadura por unidade de comprimento de soldadura no ponto (a), a partir dos componentes do momento aplicado são:

$$F_{w,y}^{M_{xc}} = -M_{xc,Ed} \frac{z_{c,a}}{I_{xc}/a} = -50,7 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{8,78 \times 10^6} = +722 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{M_{xc}} = +M_{xc,Ed} \frac{y_{c,a}}{I_{xc}/a} = +50,7 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{8,78 \times 10^6} = +716 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{yc}} = +M_{yc,Ed} \frac{z_{c,a}}{I_{yc}/a} = +1,41 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{6,77 \times 10^6} = -26 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{zc}} = -M_{zc,Ed} \frac{y_{c,a}}{I_{zc}/a} = -3,24 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{2,01 \times 10^6} = -200 \text{ N/mm}$$

Combinando as contribuições das forças e dos momentos no ponto (a) obtém-se:

$$F_{wx,Ed} = F_{wx}^{N_x} + F_{wx}^{M_{yc}} + F_{wx}^{M_{zc}} = -17 - 26 - 200 = -243 \text{ N/mm}$$

$$F_{wy,Ed} = F_{wy}^{N_y} + F_{wy}^{M_{xc}} = +25 + 722 = +747 \text{ N/mm}$$

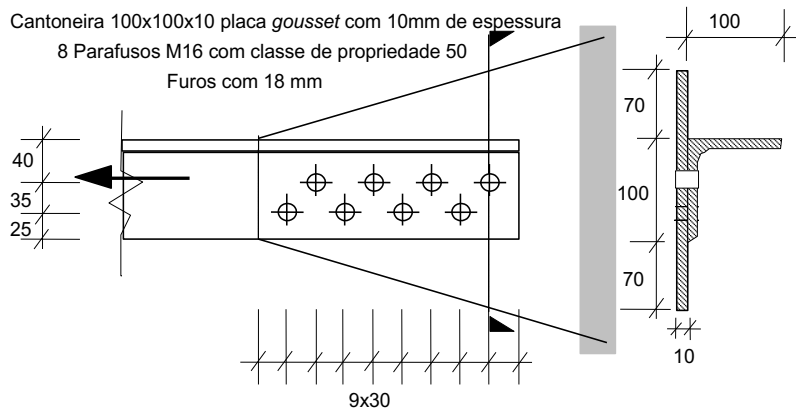
$$F_{wz,Ed} = F_{wz}^{N_z} + F_{wz}^{M_{xc}} = +250 + 716 = +966 \text{ N/mm}$$

Estes componentes resultam da força de cálculo por unidade de comprimento e aplicam-se a uma ligação soldada com uma espessura do cordão de soldadura de 1 mm ao longo de todo o seu comprimento efetivo.

|  |               |  |             |      |       |       |
|--|---------------|--|-------------|------|-------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 6 |  |             |      |       |       |
|  | Título        | Exemplo de dimensionamento 6 – Ligação aparafusada |             |      |       |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel                   | Feito por   | IR   | Data  | 10/02 |
|  |               |  | Revisto por | MEB  | Data  | 04/06 |
|  |               | Revisto por  | UDE         | Data | 01/17 |       |

### EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 6 – LIGAÇÃO APARAFUSADA

Cálculo da resistência de uma ligação de uma cantoneira (100×100×10) tracionada ligada a uma placa *gousset* com 10 mm de espessura. Tanto a cantoneira como o *gousset* são em aço inoxidável austeníticos de classe 1.4401. Para ligar uma das abas da cantoneira ao *gousset* utilizam-se oito parafusos com 16 mm de diâmetro em aço inoxidável austenítico, de classe 50 e dispostos em quincôncio.



Ligação de categoria A: Ligação resistente ao esmagamento.

O valor de cálculo da resistência ao corte no estado limite último não deverá exceder o valor de cálculo da resistência ao corte nem o valor de cálculo da resistência ao esmagamento.

#### Propriedades dos materiais

Tanto a cantoneira como o *gousset* são em aço inoxidável austeníticos de classe 1.4401:

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2 \text{ e } f_u = 530 \text{ N/mm}^2$$

O material do parafuso pertence à classe de propriedade 50:

$$f_{yb} = 210 \text{ N/mm}^2 \text{ e } f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2.$$

#### Coefficientes parciais de segurança

Coefficientes parciais de segurança para a resistência da secção transversal bruta e do elemento:

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$$

Coefficiente parcial de segurança para a resistência da secção transversal útil:  $\gamma_{M2} = 1,25$

Coefficiente parcial de segurança para a resistência do parafuso ao corte e ao esmagamento:  $\gamma_{M2} = 1,25$

#### Posição e tamanho dos furos

Para os parafusos M16, é recomendado furos de diâmetro  $d_0 = 18 \text{ mm}$ .

EN 1993-1-8  
clausula 3.4.1

Tabela 2.2  
Secção 2.3.1

Tabela 2.6

Tabela 4.1

Secção.2.3

Distância à extremidade  $e_1 = 30$  mm e distância ao bordo lateral  $e_2 = 25$  mm.

$$e_1 \text{ e } e_2 < 4t + 40 = 4 \times 10 + 40 = 80 \text{ mm e} \\ > 1,2d_0 = 1,2 \times 18 = 21,6 \text{ mm}$$

Para as linhas de parafusos em quincôncio:

- Espaçamentos  $p_1 = 60$  mm  $> 2,2d_0 = 39,6$  mm

- Distância entre dois parafusos numa linha em quincôncio:

$$\sqrt{30^2 + 35^2} = 46,1 \text{ mm} > 2,4d_0 = 43,2 \text{ mm}$$

- assim, o espaçamento para as linhas em quincôncio  $p_2 = 35$  mm  $> 1,2d_0 = 21,6$  mm

*Nota:* para esforços de compressão,  $e_2$  e  $p_1$  devem ser verificados de modo a satisfazer os requisitos de encurvadura local para um elemento exterior e interior. Estes requisitos devem ser verificados tanto para a cantoneira como para o gousset.

### Dimensionamento da secção transversal bruta da cantoneira sujeita a tração

Secção 7.2.3

Secção transversal bruta da cantoneira  $A_g = 1915$  mm<sup>2</sup>

Resistência plástica da secção:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1915 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 383 \text{ kN}$$

Eq. 7.6

### Dimensionamento da secção transversal efetiva sujeita a tração

Para furos em quincôncio a área efetiva deve ser tida como a menor área bruta, menos a dedução para furos em quincôncio ou: Secção 5.6.4

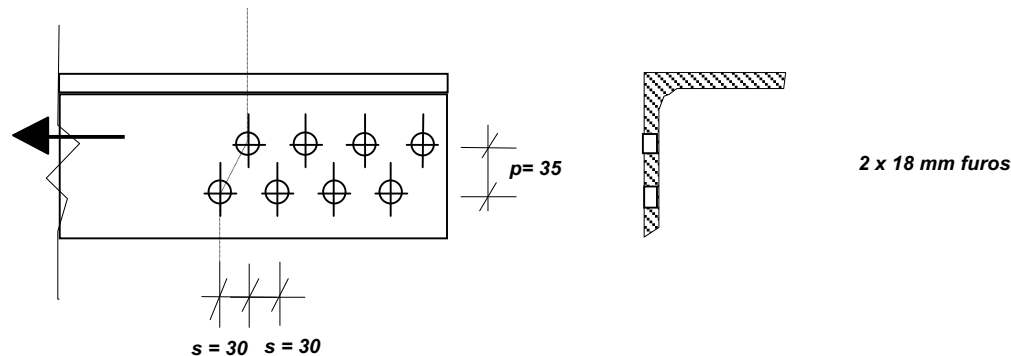
$$A_g - t \left( nd_0 - \sum \left[ \frac{s^2}{4p} \right] \right)$$

Deduções para furos não dispostos em quincôncio:

$$A_g - td_0 = 1915 - 10 \times 18 = 1735 \text{ mm}^2$$

Área transversal efetiva através de dois furos em quincôncio:

$$n = 2, s = 30 \text{ mm e } p = 35 \text{ mm}$$



$$A_{net} = A_g - t \left( nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) = 1915 - 10 \times \left( (2 \times 18) - \frac{30^2}{4 \times 35} \right) \\ = 1915 - 10 \times (36 - 6,4) = 1619 \text{ mm}^2$$

Assim,  $A_{net} = 1619$  mm<sup>2</sup>.

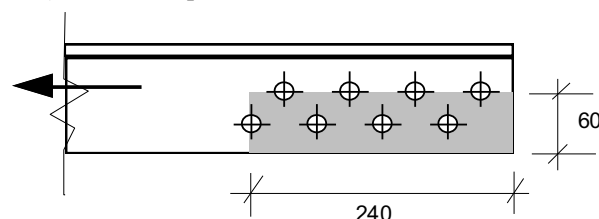
Conservativamente, pode ser utilizado o fator de redução para uma cantoneira ligada por uma perna com uma única fila de parafusos. Por interpolação, para mais de 3 parafusos numa única fila:  $\beta_3 = 0,57$ .

Resistência última da secção transversal efetiva da cantoneira:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,57 \times 1619 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 391 \text{ kN}$$

### Resistência à rotura em bloco da cantoneira

As expressões para a rotura em bloco são retiradas da EN 1993-1-8 (ao invés da EN 1993-1-1), uma vez que a EN 1993-1-8 cobre de forma explícita as cantoneiras.



Resistência à rotura em bloco considerando filas em quincôncio:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 530 \times (60 - 18) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 89 + 194 = 283 \text{ kN}$$

Resistência à rotura em bloco considerando filas não dispostas em quincôncio:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 530 \times (60 - 18 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 70 + 204 = 274 \text{ kN}$$

### Resistência da secção transversal bruta do gousset

Área da secção transversal bruta no final da cantoneira:

$$A_g = 10 \times (100 + 70 + 70) = 2400 \text{ mm}^2$$

Resistência plástica da secção:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2400 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 480 \text{ kN}$$

### Resistência da secção transversal efetiva do gousset

Área da secção transversal efetiva na extremidade da cantoneira (onde a carga aplicada é maior) com um furo colocado não-simetricamente num elemento da largura:

$$b = 100 + 70 + 70 = 240 \text{ mm}$$

$$A_{net} = A_g - d_0 t = 2400 - 18 \times 10 = 2220 \text{ mm}^2$$

Área da secção transversal efetiva em direção à extremidade da cantoneira com dois orifícios em quincôncio:  $s = 30 \text{ mm}$  e  $p = 35 \text{ mm}$ :

$$A_{net} = A_g - 2d_0 t + \frac{s^2 t}{4p} = 2400 - 2 \times 18 \times 10 + \frac{30^2 \times 10}{4 \times 35}$$

$$= 2400 - 360 + 64 = 2104 \text{ mm}^2$$

Assim,  $A_{net} = 2104 \text{ mm}^2$ .

Tabela 7.1

Secção 7.2.3

Eq. 7.10

EN 1993-1-8  
cláusula  
3.10.2(3)  
Eq. 3.10EN 1993-1-8  
cláusula  
3.10.2(3)  
Eq. 3.10

Secção 5.7.2

Eq. 5.23

Secção 5.7.2



Resistência última da secção transversal efetiva do *gousset* perto da extremidade da cantoneira:

$$N_{u,Rd} = \frac{kA_{net}f_u}{\gamma_{M2}}$$

Eq. 5.24

Tendo para este exemplo o fator  $k = 1,0$  ( $k = 1,0$  para secções com furos sem entalhes)

$$N_{u,Rd} = \frac{1,0 \times 2104 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 892 \text{ kN}$$

É aconselhável verificar a resistência das secções transversais efetivas nas secções transversais intermédias ao longo do *gousset*.

Secção transversal no 1º furo do parafuso junto à extremidade do *gousset*

(onde  $b = 100 + 30 / 240 \times 140 = 117,5$  mm)

$$A_{net} = A_g - d_0 t = 117,5 \times 10 - 18 \times 10 = 995 \text{ mm}^2$$

Esta secção transversal deve ser capaz de transmitir a carga de um parafuso.

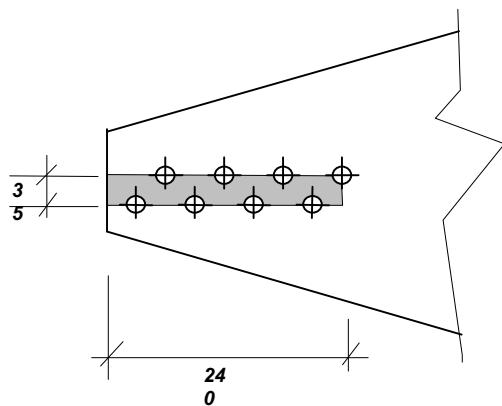
Resistência última na secção:

$$N_{u,Rd} = \frac{kA_{net}f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{1,0 \times 995 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 421 \text{ kN}$$

Eq. 5.24

É óbvio que não é necessário verificar quaisquer outras secções transversais do *gousset*, uma vez que a carga aplicada não pode exceder a resistência de cálculo do próprio ângulo, que mostrou ser menor do que o valor acima.

### Resistência do *gousset* à rotura em bloco



Resistência à rotura em bloco considerando filas em quincôncio:

$$\begin{aligned} V_{eff,1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \\ &= \frac{530 \times (35 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18 + 240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3} \\ &= 110,2 + 398,4 = 508 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8  
cláusula  
3.10.2(2)  
Eq. 3.9

Resistência à rotura em bloco considerando filas não dispostas quincôncio:

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}}$$

$$= \frac{530 \times (35 - 2 \times 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (2 \times 240 - 6 \times 18 - 2 \times 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 72,1 + 408,8 = 480 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8  
cláusula  
3.10.2(2)  
Eq. 3.9

### Resistência dos parafusos ao corte

Resistência do parafuso de classe 50 e M15 com uma secção transversal  $A = A_s = 157 \text{ mm}^2$ :

$$F_{v,\text{Rd}} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$$

Eq. 7.11

O valor de  $\alpha$  pode ser definido de acordo com o Anexo Nacional. O valor recomendado é de 0,6, que se aplica quando o plano de corte passa pelas zonas roscadas ou não roscadas do parafuso.

Secção 7.2.4

$$F_{v,\text{Rd}} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 500 \times 157}{1,25 \times 10^3} = 37,7 \text{ kN}$$

Resistência do grupo de parafusos em corte:

$$n_b F_{v,\text{Rd}} = 8 \times 37,7 = 302 \text{ kN}$$

### Resistência dos parafusos ao esmagamento

A resistência de cálculo para ligações aparafusadas suscetíveis à rotura por esmagamento é dada por:

Secção 7.2.3

$$F_{b,\text{Rd}} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}}$$

Eq. 7.1

Resistência ao esmagamento com  $t = 10 \text{ mm}$  para o parafuso M16, na extremidade.

Onde  $e_1 = 30 \text{ mm}$ ,  $e_2 = 25 \text{ mm}$  ( $> 1,2d_0 = 21,6 \text{ mm}$ ) e espaçamento entre parafusos  $p_1 = 60 \text{ mm}$  e  $p_2 = 35 \text{ mm}$ .

As ligações aparafusadas são classificadas em dois grupos, com base na espessura das placas ligadas. As ligações de placas grossas são aquelas entre placas com espessuras superiores a 4 mm, enquanto as ligações entre placas com espessuras menores ou iguais a 4 mm são definidas como ligações de placas finas.

Secção 7.2.3

Este exemplo é uma ligação de placas grossas com  $t_{\text{min}} = 10 \text{ mm}$  e a deformação não é uma verificação necessária.

Para o parafuso onde  $e_1 = 30 \text{ mm}$  e  $p_1 = 60 \text{ mm}$ , o coeficiente de esmagamento  $\alpha_b$  na direção de transferência de carga é determinado da seguinte forma:

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{e_1}{3d_0} \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{30}{3 \times 18} = 0,556 \end{array} \right\} = 0,556$$

O coeficiente de esmagamento  $k_t$  na direção perpendicular à de transferência de carga é determinado da seguinte forma:

$$k_t = \begin{cases} 1,0 & \text{for } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{for } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases}$$

$$k_t = 0,8 \quad \text{for } \frac{e_2}{d_0} = \frac{25}{18} = 1,39 \leq 1,5$$

A resistência de cálculo para esta ligação aparafusada suscetível ao esmagamento é a seguinte:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 0,556 \times 0,8 \times 10 \times 16 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 75,44 \text{ kN}$$

Eq. 7.1

A resistência da ligação ao esmagamento:

$$n_b F_{b,Rd} = 8 \times 75,44 = 604 \text{ kN}$$

### Resistência da ligação para os estados limites últimos

|  |                |               |
|--|----------------|---------------|
| Resistência da secção transversal bruta da cantoneira em tração  | $N_{pl,Rd}$    | 383 kN        |
| Resistência da secção transversal efetiva da cantoneira em tração  | $N_{u,Rd}$     | 391 kN        |
| Resistência da cantoneira à rotura em bloco (para filas em quincôncio)   | $V_{eff,2,Rd}$ | 283 kN        |
| Resistência da cantoneira à rotura em bloco (para filas não dispostas em quincôncio)                               | $V_{eff,2,Rd}$ | <b>274 kN</b> |
| Resistência da secção transversal bruta do <i>gousset</i> em tração  | $N_{pl,Rd}$    | 480 kN        |
| Resistência da secção transversal efetiva do <i>gousset</i> em tração  | $N_{u,Rd}$     | 892 kN        |
| Resistência da secção transversal efetiva do <i>gousset</i> em tração (no 1º furo do parafuso junto à extremidade) | $N_{u,Rd}$     | 421 kN        |
| Resistência do <i>gousset</i> à rotura em bloco (para filas em quincôncio)   | $V_{eff,1,Rd}$ | 508 kN        |
| Resistência do <i>gousset</i> à rotura em bloco (para filas não dispostas em quincôncio)                           | $V_{eff,1,Rd}$ | 480 kN        |
| Resistência dos parafusos em corte   | $F_{v,Rd}$     | 302 kN        |
| Resistência dos parafusos ao esmagamento   | $F_{b,Rd}$     | 604 kN        |

A menor resistência do cálculo ocorre para resistência da cantoneira à rotura em bloco (para filas não dispostas em quincôncio):

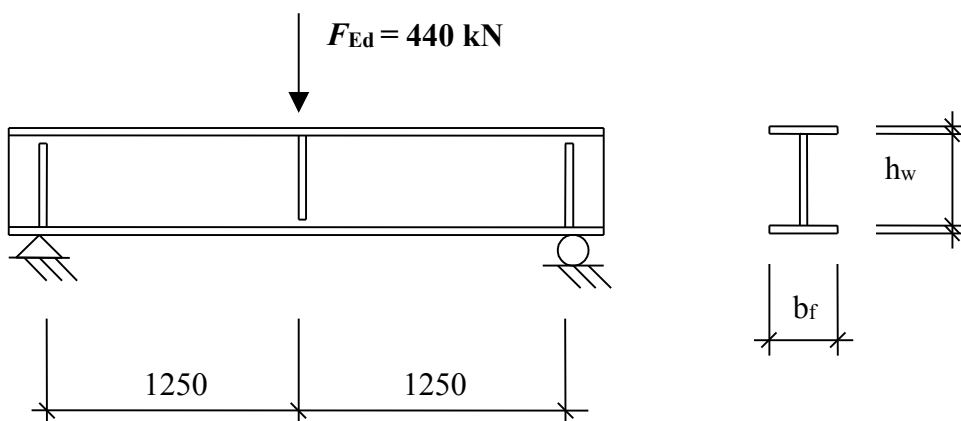
$$V_{eff,2,Rd} = 274 \text{ kN}$$

Nota: O modo crítico para todos os parafusos da junta é o corte ( $F_{v,Rd} = 302 \text{ kN}$ ).

|  |               |  |           |      |       |
|--|---------------|--|-----------|------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 5 |  |           |      |       |
|  | Título        | Exemplo de dimensionamento 7 – Corte numa viga de alma cheia |           |      |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel                             | Feito por | AO   | Data  |
| Revisto por  |               |  | MEB       | Data | 04/06 |
| Revisto por  |               |  | ER/IA     | Data | 04/17 |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 7 – CORTE NUMA VIGA DE ALMA CHEIA**

Dimensionamento de uma viga de alma cheia relativamente à sua resistência ao corte. Esta viga é constituída por uma secção em I simplesmente apoiada com a distância entre apoios representada na figura abaixo. O banzo superior é lateralmente restringido.



Considere aço inox *lean duplex* de classe 1.4162  
 $f_y = 480 \text{ N/mm}^2$  para chapas laminadas a quente  
 $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

E as seguintes dimensões da secção transversal:  
 Banzos:  $12 \times 200 \text{ mm}^2$   
 Alma:  $4 \times 500 \text{ mm}^2$   
 Reforços:  $12 \times 98 \text{ mm}^2$   
 Espessura do cordão de soldadura: 4 mm

**Análise estrutural**

O esforço transversal e momento fletor máximo atuantes devem ser determinados da seguinte forma:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{440}{2} = 220 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{440 \times 2,5}{4} = 275 \text{ kNm}$$

**Coefficientes parciais de segurança**

Coefficientes parciais de segurança para a resistência da secção transversal bruta e do elemento:

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Tabela 2.2  
 Secção 2.3.1

Tabela 4.1

| Exemplo de dimensionamento 7   | Página 2 de 5  |
|--|--|
| <p><b>Classificação da secção transversal</b></p> $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{480} \times \frac{200}{210}} = 0,683$ <p>Alma sujeita a flexão</p> $\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,683} = 178,9 > 90 \text{ portanto a alma é Classe 4.}$ <p>Banzo sujeito a compressão</p> $\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,683} = 11,3 \leq 14,0 \text{ portanto o banzo sujeito à compressão é Classe 3.}$ <p>Assim, a classificação da secção transversal é Classe 4.</p> | <p>Secção 5.3<br/>Tabela 5.2<br/>Tabela 5.2<br/>Tabela 5.2</p> |
| <p><b>Resistência ao corte</b></p> <p>A resistência à encurvadura por esforço transversal tem de ser verificada quando:</p> $h_w / t_w \geq \frac{24,3}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \text{ para almas reforçadas verticalmente.}$ <p><math>a/h_w = 1250/500 = 2,5 &gt; 1</math>, e uma vez que a alma não apresenta reforços, <math>k_{\tau st} = 0</math>. Assim,</p> $k_\tau = 5,34 + 4 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4 \left( \frac{500}{1250} \right)^2 = 5,98$  | <p>Secção 6.4.3</p>  |
| <p>EN 1993-1-4 recomenda <math>\eta = 1,2</math></p> $h_w/t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{24,3}{1,2} \times 0,683 \times \sqrt{5,98} = 33,8$  | <p>Eq. 6.26</p>  |
| <p>Portanto, a resistência à encurvadura por esforço transversal deve ser verificada.</p>  | <p>Secção 6.4.3</p>  |
| $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \times 480 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} \times 10^{-3} = 604,6 \text{ kN}$  | <p>Eq. 6.22</p>  |
| $V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$   | <p>Eq. 6.23</p>  |
| <p>Para extremidades não rígidas:</p>  |  |
| $\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) = \left( \frac{500}{37,4 \times 4 \times 0,683 \times \sqrt{5,98}} \right) = 2,00 > 0,65$   | <p>Eq. 6.25</p>  |
| $\chi_w = \frac{1,19}{(0,54 + \bar{\lambda}_w)} \text{ para } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$   | <p>Tabela 6.3</p>  |
| <p>A contribuição da alma é obtida por:</p>  |  |
| $\chi_w = \frac{1,19}{(0,54 + 2,00)} = 0,468$  | <p>Tabela 6.3</p>  |
| $V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,468 \times 480 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} \times 10^{-3} = 235,9 \text{ kN}$  | <p>Eq. 6.23</p>  |
| <p>A contribuição dos banzos pode ser utilizada se os mesmos não forem totalmente utilizados para suportar o momento fletor. A resistência à flexão de uma secção transversal constituída apenas pelos banzos é obtida por:</p>  | <p>Secção 6.4.3</p>  |

$$M_{f,Rd} = 12 \times 200 \times \frac{480}{1,1} \times (500 + 12) \times 10^{-6} = 536,2 \text{ kNm}$$

$M_{f,Rd} > M_{Ed} = 275 \text{ kNm}$ , portanto, os banzos podem contribuir para a resistência à encurvadura por esforço transverso

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left[ \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right]^2 \right] \quad \text{Eq. 6.29}$$

$$c = a \left[ 0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right] \quad \text{mas } \frac{c}{a} \leq 0,65 \quad \text{Eq. 6.30}$$

$$= 1250 \times \left[ 0,17 + \frac{3,5 \times 200 \times 12^2 \times 480}{4 \times 500^2 \times 480} \right] = 338,5 \text{ mm}$$

$$338,5 \text{ mm} < 0,65 \times 1250 = 812,5 \text{ mm}$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{200 \times 12^2 \times 480}{338 \times 1,1} \times \left[ 1 - \left[ \frac{275}{536,2} \right]^2 \right] = 27,4 \text{ kN} \quad \text{Eq. 6.29}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 235,8 + 27,4 = 263,2 \text{ kN} \leq 604,6 \text{ kN} \quad \text{Eq. 6.22}$$

### Reforços transversais

Os reforços transversais devem ser verificados quanto ao esmagamento e à encurvadura por flexão, utilizando  $\alpha = 0,49$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ . Deste modo considera-se então uma secção transversal efetiva que consiste nos reforços e partes da alma. A parte da alma incluída corresponde a  $11 \varepsilon t_w$ , portanto a secção transversal do reforço é de Classe 3.

$a/h_w = 1250/500 = 2,5 \geq \sqrt{2}$ , portanto, o momento de inércia do reforço intermédio deve verificar: Eq. 6.51

$$I_{st} \geq 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \times 500 \times 4^3 = 24000 \text{ mm}^4 \quad \text{Eq. 6.51}$$

$$I_{st} = 2 \times \frac{(11 \times 0,683 \times 4) \times 4^3}{12} + \frac{12 \times 200^3}{12} = 8,00 \times 10^6 \text{ mm}^4, \text{ logo é verificado.}$$

A resistência ao esmagamento é obtida por:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{Eq. 5.27}$$

$$A_g = (12 \times 200 + 11 \times 0,683 \times 4 \times 2) = 2460,1 \text{ mm}^2$$

$$N_{c,Rd} = 2460,1 \times 480 \times 10^{-3} / 1,1 = 1073,5 \text{ kN}$$

A resistência à encurvadura por flexão é obtida por:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad \text{Eq. 6.2}$$

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad \text{Eq. 6.4}$$

$$\varphi = 0,5 \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad \text{Eq. 6.5}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}} \quad \text{Eq. 6.6}$$

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \times 500 = 375 \text{ mm} \quad \text{Secção 6.4.5}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{375}{\sqrt{8 \times 10^6}} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{480}{200000}} = 0,103$$

Eq. 6.6

$$\varphi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,103 - 0,2) + 0,103^2) = 0,48$$

Eq. 6.5

$$\chi = \frac{1}{0,48 + [0,48^2 - 0,103^2]^{0,5}} = 1,05 > 1 \Rightarrow \chi = 1,0$$

Eq. 6.4

Como  $N_{b,Rd} = N_{c,Rd} = 1073,5 \text{ kN} > N_{Ed}$ , os reforços transversais são suficientes.

### Interação esforço de corte e momento fletor

Se a utilização da resistência ao corte, expressa pelo fator  $\bar{\eta}_3$ , exceder 0,5, o efeito da interação entre o momento fletor e o esforço de corte tem de ser tido em conta.

Secção 6.4.3

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

Eq. 6.36

$$\bar{\eta}_3 = \frac{220}{235,9} = 0,933 > 0,5, \text{ portanto a interação tem de ser tida em conta.}$$

A condição é

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \text{ para } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

Eq. 6.34

Onde:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

Eq. 6.35

$M_{f,Rd} = 536,2 \text{ kNm}$  (folha 3)

$M_{pl,Rd}$  é a resistência plástica da secção transversal.

$$M_{pl,Rd} = M_{f,Rd} + \frac{t_w h_w^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = 536,2 + \frac{4 \times 500^2 \times 480}{4 \times 1,1 \times 10^6} = 645,3 \text{ kNm}$$

### Avaliação das condições

$M_{Ed} = 275 \text{ kNm}$ , por isso:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{275}{645,3} = 0,426 \leq 1,0 \text{ OK}$$

Eq. 6.35

$\bar{\eta}_1$  verifica a condição. Agora falta verificar a interação.

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,426 + \left(1 - \frac{536,2}{645,3}\right) \times (2 \times 0,933 - 1)^2 = 0,553 < 1,0$$

Portanto, para condições dadas, a resistência do componente é suficiente em relação ao esforço de corte, de flexão e interação entre corte e flexão.

### Cálculo das propriedades efetivas da secção transversal

Os banzos são de Classe 3 e, portanto, totalmente efetivos.

A profundidade da alma deve ser reduzida por um fator de redução  $\rho$ , alma soldada.

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$$

Eq. 5.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{onde } \bar{b} = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$$

Eq. 5.3

Assumindo uma variação linear e simétrica da tensão na alma,

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

$$\Rightarrow k_\sigma = 23,9$$

Tabela 5.3

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,683 \times \sqrt{23,9}} = 1,29$$

Eq. 5.3

$$\rho = \frac{0,772}{1,29} - \frac{0,079}{1,29^2} = 0,55 \leq 1$$

Eq. 5.1

$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi) = 0,55 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 134,76 \text{ mm}$$

Tabela 5.3

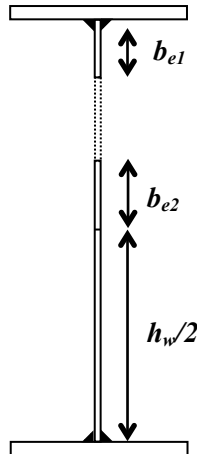
$$b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} = 0,4 \times 134,76 = 53,9 \text{ mm}$$

Tabela 5.3

$$b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}} = 0,6 \times 134,76 = 80,9 \text{ mm}$$

### Cálculo do módulo de flexão mínimo da secção sujeita a flexão

$e_i$  é tido como positivo desde o centroide do banzo superior e para baixo.



$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w + b_{e2} t_w + (h_w / 2) t_w = 6361,7 \text{ mm}^2$$

$$e_{\text{eff}} =$$

$$\frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f) ] + \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w (0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)) + b_{e2} t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2} / 2) + (h_w / 2) t_w (0,75 h_w + 0,5 t_f) ] = 266,4 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w (b_{e1} + 4\sqrt{2})^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w / 2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w [e_{\text{eff}} - 0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)]^2 + b_{e2} t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f - b_{e2})]^2 + (h_w / 2) t_w [e_{\text{eff}} - (0,75 h_w + 0,5 t_f)]^2 = 3,472 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

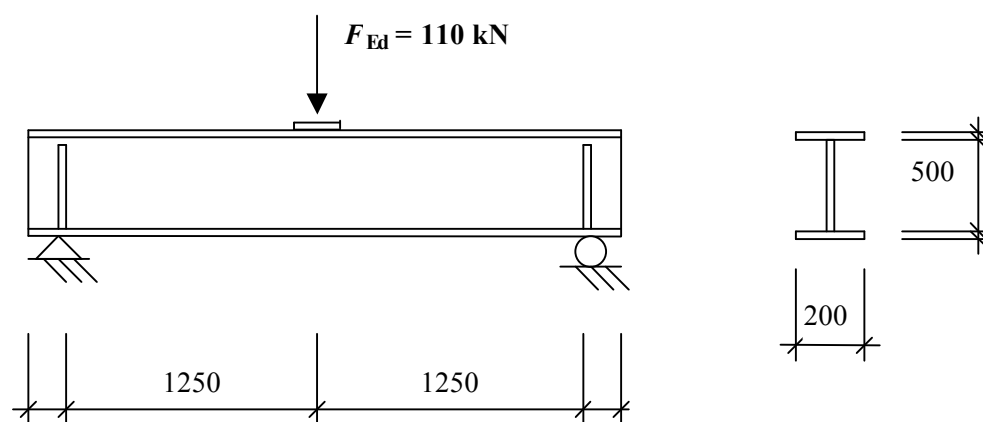




|   |               |   |           |      |       |
|---|---------------|---|-----------|------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b> | Página 1 de 5 |   |           |      |       |
|   | Título        | Exemplo de dimensionamento 8 – Viga sujeita a cargas pontuais |           |      |       |
|   | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel                              | Feito por | AO   | Data  |
|   |               | Revisto por   | MEB       | Data | 04/06 |
|   |               | Revisto por   | ER/IA     | Data | 04/17 |
| <b>FOLHA DE CÁLCULO</b>   |               |   |           |      |       |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 8 – VIGA SUJEITA A CARGAS PONTUAIS**

Uma viga de alma cheia, previamente sujeita a uma carga uniformemente distribuída, será reconstruída para suportar uma carga pontual. Verifique se a viga consegue resistir a esta nova carga aplicada a meio-vão através de uma chapa de com 12 mm. A viga é constituída por uma secção em I e é simplesmente apoiada com a distância entre apoios representada na figura abaixo. O banzo superior é lateralmente restringido.



Considere aço inox duplex de classe 1.4462

$f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ , para chapas enformadas a frio  
 $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

E as seguintes dimensões da secção transversal:

- Banzos:  $12 \times 200 \text{ mm}^2$
- Alma:  $4 \times 500 \text{ mm}^2$
- Reforços:  $12 \times 98 \text{ mm}^2$
- Espessura do cordão de soldadura: 4 mm

**Análise estrutural**

Esforço transversal e momento fletor máximo atuantes devem ser determinados de acordo com:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{110}{2} = 55 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{110 \times 2,5}{4} = 68,75 \text{ kNm}$$

**Coefficientes parciais de segurança**

Coefficientes parciais de segurança para a resistência da secção transversal bruta e do elemento:  $\gamma_{M0} = 1,1$ ;  $\gamma_{M1} = 1,1$

**Classificação da secção transversal**

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{460} \times \frac{200}{210}} = 0,698$$

Tabela 2.2  
Secção 2.3.1

Tabela 4.1

Secção 5.3

Tabela 5.2

Alma sujeita à flexão

$$\frac{c}{t\epsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,698} = 175,1 > 90, \text{ portanto a alma é Classe 4.}$$

Banzo sujeito à compressão

$$\frac{c}{t\epsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,698} = 11,0 \leq 14,0, \text{ e o banzo em compressão é Classe 3.}$$

Assim, a classificação geral da secção transversal é Classe 4.

### Resistência à carga concentrada

O valor de cálculo atuante não deve exceder o valor da resistência de cálculo, i.e.

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1}$$

O comprimento efetivo  $L_{eff}$  é calculado por

$$L_{eff} = \chi_F l_y$$

Onde o coeficiente de redução é

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0$$

Com a esbelteza dada por

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}$$

O comprimento efetivo carregado é dado por

$$l_y = s_s + 2t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$$

Onde

$s_s$  é o comprimento de reforço e  $m_1$  e  $m_2$  são parâmetros adimensionais:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w}$$

$$m_2 = 0,02 \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{para } \bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$m_2 = 0 \quad \text{para } \bar{\lambda}_F \leq 0,5$$

$s_s$  é conservativamente tido como duas vezes a espessura da placa carregada, i.e. 24 mm.

$$m_1 = \frac{460 \times 200}{460 \times 4} = 50$$

$$m_2 = 0,02 \times \left[ \frac{500}{12} \right]^2 = 34,7, \text{ assumindo } \bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$l_y = 24 + 2 \times 12 \times (1 + \sqrt{50 + 34,7}) = 268,9 \text{ mm}$$

A carga crítica é obtida por

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}$$

Onde o coeficiente de encurvadura é dado pelo tipo de carregamento, tipo a.

$$k_F = 6 + 2 \left[ \frac{h_w}{a} \right]^2 = 6 + 2 \times \left[ \frac{500}{2500} \right]^2 = 6,08$$

Tabela 5.2

Tabela 5.2

Secção 6.4.4

Eq. 6.37

Eq. 6.45

Eq. 6.46

Eq. 6.47

Eq. 6.41

Eq. 6.38

Eq. 6.39

Eq. 6.40

Figura 6.5

Eq. 6.38

Eq. 6.39

Eq. 6.41

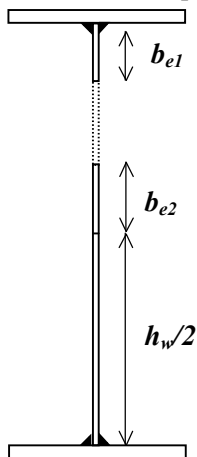
Eq. 6.48

Figura 6.4

| Exemplo de dimensionamento 8  | Página 3 de 5         |
|---|-----------------------|
| $F_{cr} = 0,9 \times 6,08 \times 200000 \times \frac{4^3}{500} \times 10^{-3} = 140,1 \text{ kN}$   | Eq. 6.48              |
| $\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{268,9 \times 4 \times 460}{140,1 \times 10^3}} = 1,88 > 0,5, \text{ Pressuposto confirmado!}$                      | Eq. 6.47              |
| $\chi_F = \frac{0,5}{1,88} = 0,27 \leq 1,0, \text{ OK!}$  | Eq. 6.46              |
| $L_{eff} = 0,27 \times 268,9 = 72,6 \text{ mm}$   |                       |
| $F_{Ed} = 110 \leq 460 \times 72,6 \times 4 / (1,1 \times 10^3) = 121,4 \text{ kN}$   | Eq. 6.37              |
| <p>A resistência é superior ao carregamento.</p>  |                       |
| <p><b>Interação entre esforço transversal, momento fletor e força axial</b></p>   |                       |
| <p>A interação entre a carga concentrada e o momento fletor é verificada de acordo com EN1993-1-5:2006.</p>                                       |                       |
| $0,8 \times \eta_1 + \eta_2 \leq 1,4$   | EN 1993-1-5, Eq. 7.2  |
| <p>Onde</p>   |                       |
| $\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0$                              | EN 1993-1-5, Eq. 4.14 |
| $\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1}} \leq 1,0$   | EN 1993-1-5, Eq. 6.14 |
| <p><b>Cálculo das propriedades efetivas da secção</b></p>   |                       |
| <p>Os banzos são Classe 3 e, portanto, totalmente eficazes.</p>   |                       |
| <p>Alma soldada: a profundidade da alma deve ser reduzida com o fator de redução <math>\rho</math>.</p>   |                       |
| $\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$   | Eq. 5.1               |
| $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \text{ onde } b = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$ | Eq. 5.3               |
| <p>Assumindo uma variação linear e simétrica da tensão na alma,</p>   |                       |
| $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$   |                       |
| $\Rightarrow k_\sigma = 23,9$   | Tabela 5.3            |
| $\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{23,9}} = 1,26$  |                       |
| $\rho = \frac{0,772}{1,26} - \frac{0,079}{1,26^2} = 0,562 \leq 1$   |                       |
| $b_{eff} = \rho b_c = \rho b / (1 - \psi) = 0,562 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 137,3 \text{ mm}$  | Tabela 5.3            |
| $b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \times 137,3 = 54,9 \text{ mm}$   |                       |
| $b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \times 137,3 = 82,4 \text{ mm}$   |                       |

**Cálculo do módulo de flexão efetivo da secção sujeita a flexão**

$e_i$  é tido como positivo desde o centroide do banzo superior e para baixo.



$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w + b_{e2}t_w + (h_w/2)t_w = 6372,2 \text{ mm}^2$$

$e_{\text{eff}} =$

$$\frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f) ] + \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w (0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)) + b_{e2}t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2}/2) + (h_w/2)t_w (0,75h_w + 0,5t_f) ] = 266,4 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w (b_{e1} + 4\sqrt{2})^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w/2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w [e_{\text{eff}} - 0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)]^2 + b_{e2}t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f - b_{e2})]^2 + (h_w/2)t_w [e_{\text{eff}} - (0,75h_w + 0,5t_f)]^2 = 3,475 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{e_{\text{eff}} + 0,5t_f} = 1,293 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\eta_1 = \frac{68,75 \times 10^6}{460 \times 1,293 \times 10^6 / 1,1} = 0,127$$

$$\eta_2 = \frac{110}{119,63} = 0,919$$

$$0,8\eta_1 + \eta_2 = 0,8 \times 0,127 + 0,919 = 1,021 < 1,4$$

Portanto, é adequada a resistência da viga à interação entre a carga concentrada e o momento fletor.

**Resistência ao corte**

A resistência à encurvadura por esforço transversal tem de ser verificada quando

$$h_w / t_w \geq \frac{56,2}{\eta} \varepsilon, \text{ para almas sem reforços.}$$

$$h_w / t_w = 500/4 = 125 \geq \frac{56,2}{1,2} \times 0,698 = 32,7$$

Portanto, deve ser verificada a resistência à encurvadura por esforço transversal.

EN 1993-1-5  
Eq. 4.14

EN 1993-1-5  
Eq. 6.14

Secção 6.4.3

Eq. 6.20

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Eq. 6.22

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}$$

Eq. 6.23

Para extremidades não rígidas, de acordo com a Tabela 6.3

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) = \left( \frac{500}{86,4 \times 4 \times 0,698} \right) = 2,07 > 0,65$$

Eq. 6.24

$$\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + \bar{\lambda}_w} \quad \text{para } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$$

Tabela 6.3

$$\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + 2,07} = 0,455$$

Tabela 6.3

A contribuição dos banzos pode ser utilizada se os mesmos não forem totalmente utilizados para suportar o momento fletor. No entanto, a sua contribuição é pequena e de forma conservativa não é considerada, i.e.  $V_{bf,Rd} = 0$ .

A resistência à encurvadura por esforço transversal pode ser calculada por:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = \frac{0,455 \times 460 \times 500 \times 4}{1,1 \times \sqrt{3}} \times 10^{-3} = 219,8 \text{ kN} < \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 579,45 \text{ kN}$$

Eq. 6.23

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} > V_{Ed} = 55 \text{ kN}$$

A resistência é superior ao carregamento.

### Interação entre corte e flexão

Se  $\bar{\eta}_3$  não exceder 0,5, a resistência ao momento fletor e a força axial não precisa de ser reduzida.

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

Eq. 6.36

$$= \frac{55}{219,8} = 0,25 \leq 0,5, \text{ portanto a interação não precisa de ser considerada.}$$

Observações finais:

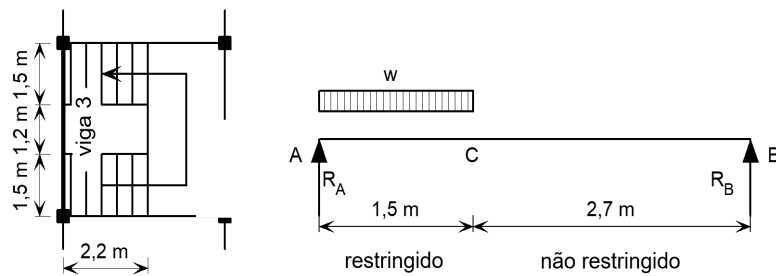
A resistência da viga é superior à carga imposta. Os reforços verticais nos suportes não foram verificados. Tal deve ser feito de acordo com o procedimento utilizado no Exemplo 7.



|  |               |  |   |           |     |      |       |             |     |      |       |             |     |      |
|--|---------------|--|---|-----------|-----|------|-------|-------------|-----|------|-------|-------------|-----|------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página 1 de 7 |  |   |           |     |      |       |             |     |      |       |             |     |      |
|  | Título        | Exemplo de dimensionamento 9 – Viga com banzo comprimido não restringido |   |           |     |      |       |             |     |      |       |             |     |      |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel   | <table border="1"> <tr> <td>Feito por</td> <td>SMH</td> <td>Data</td> <td>09/01</td> </tr> <tr> <td>Revisto por</td> <td>NRB</td> <td>Data</td> <td>04/06</td> </tr> <tr> <td>Revisto por</td> <td>SJR</td> <td>Data</td> <td>04/17</td> </tr> </table> | Feito por | SMH | Data | 09/01 | Revisto por | NRB | Data | 04/06 | Revisto por | SJR | Data |
| Feito por  | SMH           | Data   | 09/01   |           |     |      |       |             |     |      |       |             |     |      |
| Revisto por  | NRB           | Data   | 04/06   |           |     |      |       |             |     |      |       |             |     |      |
| Revisto por  | SJR           | Data   | 04/17   |           |     |      |       |             |     |      |       |             |     |      |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 9 – VIGA COM BANZO COMPRIMIDO NÃO RESTRINGIDO**

Dimensione a viga de suporte de uma caixa de escada. A viga apresenta perfil de secção em U e encontra-se simplesmente apoiada entre pilares. O lance de escadas entre os pontos A e C fornece restrição ao banzo superior da viga. Entre os pontos B e C o banzo superior não se encontra restringido. O comprimento total da viga é 4,2 m.



**Ações**

Assumindo que a viga apenas suporta a carga desde o primeiro lance de escadas até ao patamar:

Ações permanentes (*G*): Carga nas escadas  $1,0 \text{ kN/m}^2 = 1,0 \times 2,2 = 2,2 \text{ kN/m}$   
 Peso próprio da viga  $0,13 \text{ kN/m}$

Ações variáveis (*Q*): Carga nas escadas  $4 \text{ kN/m}^2 = 4,0 \times 2,2 = 8,8 \text{ kN/m}$

Caso de carga a considerar (Estado limite último):

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{kj} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Como existe apenas uma ação variável ( $Q_{k,1}$ ) não é necessário ser considerado o último termo da expressão apresentada.

$$\gamma_{G,j} = 1,35 \text{ (efeitos desfavoráveis)}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5$$

Ações tendo em conta os coeficientes parciais

Ações permanentes : Carga nas escadas =  $1,35 \times 2,2 = 2,97 \text{ kN/m}$

Peso próprio da viga =  $1,35 \times 0,13 = 0,18 \text{ kN/m}$

Ações variáveis: Carga nas escadas =  $1,5 \times 8,8 = 13,2 \text{ kN/m}$

**Análise estrutural**

Reações nos apoios:

$$R_A + R_B = (2,97 + 13,2) \times 1,5 + 0,18 \times 4,2 = 25,01 \text{ kN}$$



Momento em relação a A:

$$R_B = \frac{1,5 \times (2,97 + 13,2) \times 0,75 + 0,18 \times 4,2 \times (4,2/2)}{4,2} = 4,71 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow R_A = 25,01 - 4,71 = 20,30 \text{ kN}$$

O momento fletor máximo ocorre a uma distância igual a:

$$1,5 \times \left(1 - \frac{1,5}{2 \times 4,2}\right) = 1,23 \text{ m de A.}$$

$$M_{Ed,max} = 20,30 \times 1,23 - (2,97 + 13,2) \times \frac{1,23^2}{2} - 0,18 \times \frac{1,23^2}{2} = 12,60 \text{ kNm}$$

Esforço transversal máximo ocorre no ponto A:

$$F_{Ed,max} = 20,30 \text{ kN}$$

### Propriedades dos materiais

Considere aço inox austenítico de classe 1.4401

0,2% proof stress = 240 N/mm<sup>2</sup> (Para chapas enformadas a frio)

$$f_y = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ e } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

Tabela 2.2

Secção 2.3.1

### Propriedades da secção transversal

⇒ Considerar uma secção em U com dimensões 200 × 75, espessura  $t = 5$  mm.

$$I_y = 9,456 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 94,56 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_z = 0,850 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = 112,9 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_w = 5085 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_g = 1650 \text{ mm}^2$$

$$I_t = 1,372 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

### Classificação da secção transversal

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{240} \times \frac{200000}{210000}} = 0,97$$

Assumindo de forma conservativa que  $c = h - 2t = 200 - 2 \times 5 = 190$  mm para a alma

$$\text{Alma sujeita a flexão: } \frac{c}{t} = \frac{190}{5} = 38$$

Para Classe 1,  $\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon = 69,8$ , portanto a alma é Classe 1.

Tabela 5.2

Banzo em consola sujeito a compressão:  $\frac{c}{t} = \frac{75}{5} = 15$

Para Classe 3,  $\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon = 13,6$ , portanto o banzo em consola é Classe 4.

Tabela 5.2

⇒ Portanto, a classificação geral da secção transversal é Classe 4.

**Cálculo das propriedades efetivas da secção**Cálculo do fator de redução  $\rho$  para elementos exteriores enformados a frio:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{mas } \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{onde } \bar{b} = c = 75 \text{ mm}$$

Assumindo uma distribuição uniforme da tensão no banzo em compressão

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \quad \Rightarrow k_\sigma = 0,43$$

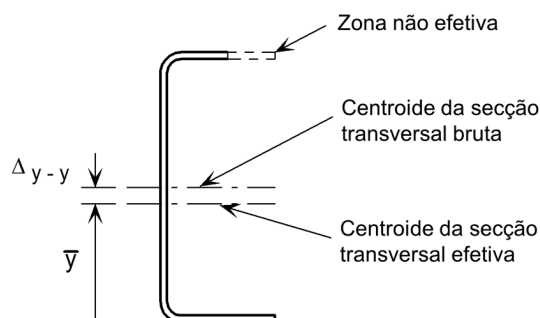
$$\bar{\lambda}_p = \frac{75/5}{28,4 \times 0,97 \times \sqrt{0,43}} = 0,830$$

$$\rho = \frac{1}{0,830} - \frac{0,188}{0,830^2} = 0,932$$

$$c_{\text{eff}} = \rho \times c = 0,932 \times 75 = 69,9$$

$$A_{\text{eff}} = A_g - (1 - \rho)ct = 1650 - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 = 1625 \text{ mm}^2$$

Cálculo da mudança do eixo neutro sob ação de flexão:



$$\bar{y} = \frac{A_g \times \frac{h}{2} - (1 - \rho) \times c \times t \times \left( \frac{h - t}{2} \right)}{A_{\text{eff}}} = \frac{1650 \times \frac{200}{2} - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 \times \left( 200 - \frac{5}{2} \right)}{1625}$$

$$\bar{y} = 98,44$$

$$\text{Mudança da posição do eixo neutro, } \Delta_{y-y} = \frac{h}{2} - \bar{y} = \frac{200}{2} - 98,44 = 1,56 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff},y} = \left( I_y - \frac{(1 - \rho)ct^3}{12} - (1 - \rho)ct \left( \frac{h - t}{2} \right)^2 - A_{\text{eff}} \Delta_{y-y}^2 \right)$$

$$I_{\text{eff},y} = 9,456 \times 10^6 - \frac{(1 - 0,932) \times 75 \times 5^3}{12} - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 \times (100 - 2,5)^2 - 1625 \times 1,56^2$$

$$I_{\text{eff},y} = 9,21 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h}{2} + \Delta_{y-y}} = \frac{9,21 \times 10^6}{\frac{200}{2} + 1,56} = 90,69 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Secção 5.4.1

Eq. 5.2

Eq. 5.3

Tabela 5.4

Tabela 5.4

|   |   |
|---|---|
| Exemplo de dimensionamento 9  | Página 4 de 7   |
| <p><b>Shear lag</b></p> <p><i>Shear lag</i> pode ser desprezado desde que <math>b_0 \leq L_e/50</math> para banzos em consola.</p> <p><math>L_e = 4200</math> mm (distância entre pontos com momento nulo).</p> <p><math>L_e/50 = 84</math> mm, <math>b_0 = 75</math> mm, portanto o efeito <i>shear lag</i> é desprezado.</p> <p><b>Enrugamento dos banzos</b></p> $u = \frac{2\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z}$ <p><math>\sigma_a = 240</math> N/mm<sup>2</sup> (valor máximo possível)</p> <p><math>b_s = 75 - 5 = 70</math> mm</p> <p><math>z = 100 - 2,5 = 97,5</math> mm</p> $u = \frac{2 \times 240^2 \times 70^4}{200000^2 \times 5^2 \times 97,5} = 0,028 \text{ mm}$ <p>Enrugamento dos banzos pode ser desprezado se <math>u &lt; 0,05 \times 200 = 10</math> mm</p> <p>Assim o efeito enrugamento dos banzos é desprezado.</p> <p><b>Coeficientes parciais de segurança</b></p> <p>Neste exemplo foram utilizados os seguintes fatores parciais:</p> <p><math>\gamma_{M0} = 1,1</math> e <math>\gamma_{M1} = 1,1</math></p> <p><b>Momento fletor resistente da secção transversal</b></p> <p>Para uma secção transversal de Classe 4:</p> $M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} = \frac{90,69 \times 10^3 \times 240}{1,1 \times 10^6} = 19,79 \text{ kNm}$ <p><math>M_{Ed,max} = 12,60</math> kNm <math>&lt; M_{c,Rd} = 19,79</math> kNm</p> <p>⇒ a resistência da secção transversal ao momento fletor é verificada!.</p> <p><b>Resistência da secção transversal ao corte</b></p> $V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$ <p><math>A_v = h \times t = 200 \times 5 = 1000</math> mm<sup>2</sup></p> $V_{pl,Rd} = \frac{1000 \times 240}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 1000} = 125,97 \text{ kN}$ <p><math>F_{Ed,max} = 20,30</math> kNm <math>&lt; V_{pl,Rd} = 125,97</math> kNm</p> <p>⇒ Resistência da secção transversal ao corte OK.</p> <p>Verificação se a resistência ao corte não está limitada pela encurvadura por esforço transversal:</p> <p>Assumindo que <math>h_w = h - 2t = 200 - 2 \times 5 = 190</math> mm</p> $\frac{h_w}{t} = \frac{190}{5} = 38, \text{ a encurvadura por esforço transversal tem de ser verificada}$ $\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2\varepsilon}{\eta}$ <p><math>\eta = 1,20</math></p> | <p>Secção 5.4.2</p> <p>Secção 5.4.2<br/>EN 1993-1-3<br/>cláusula 5.4<br/>Eq. 5.3a</p> <p>Tabela 4.1</p> <p>Eq. 5.31</p> <p>Eq. 5.32</p> <p>Secção 6.4.3</p> <p>Eq. 6.20</p> |

$$\frac{h_w}{t} = 38 < \frac{56,2\varepsilon}{\eta} = \frac{56,2 \times 0,97}{1,20} = 45,4$$

⇒ A resistência ao corte não é limitada pela encurvadura por esforço transversal.

### Resistência à encurvadura lateral

O banzo comprimido não está lateralmente restringido entre B e C. É necessário verificar esta porção da viga quanto à encurvadura lateral.

$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1}$  para uma secção transversal de Classe 4.

$$W_{eff,y} = 90,69 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

Determinação do momento crítico elástico ( $M_{cr}$ ):

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left( \left[ \left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - C_2 z_g \right)$$

C é simplesmente apoiado, enquanto que B se aproxima da fixação total. Assumindo o caso mais conservativo:

$$k = k_w = 1,00$$

$C_1$  e  $C_2$  são determinados a partir do diagrama do momento fletor e das condições de extremidade.

Do diagrama do momento fletor,  $\psi = 0$ , ⇒  $C_1 = 1,77$

$C_2 = 0$  (sem cargas transversais)

$$M_{cr} = 1,77 \times \frac{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6}{(1,00 \times 2700)^2} \times \left( \left[ \left( \frac{1,00}{1,00} \right)^2 \times \frac{5085 \times 10^6}{0,850 \times 10^6} + \frac{(1,00 \times 2700)^2 \times 76900 \times 1,372 \times 10^4}{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6} \right]^{0,5} \right)$$

$$M_{cr} = 41,9 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{90,69 \times 10^3 \times 240}{41,9 \times 10^6}} = 0,721$$

Utilizando o fator de imperfeição  $\alpha_{LT} = 0,34$  para secções enformadas a frio:

$$\phi_{LT} = 0,5 \times \left( 1 + 0,34 \times (0,721 - 0,4) + 0,721^2 \right) = 0,814$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,814 + [0,814^2 - 0,721^2]^{0,5}} = 0,839$$

$$M_{b,Rd} = 0,839 \times 90,69 \times 10^3 \times 240 \times 10^{-6} / 1,1$$

$$M_{b,Rd} = 16,60 \text{ kNm} < M_{Ed} = 12,0 \text{ kNm (momento fletor máximo na porção da viga não restringida)}$$

Secção 6.4.2

Eq.6.13

Eq.6.14

Eq.6.15

Eq.6.16

Anexo E

Eq. E.1

E.3

Tabela E.1

Secção 6.4.2

⇒ O elemento possui resistência adequada à encurvadura lateral.

Secção 6.4.6

### Deslocamento máximo

Caso de carga (estado limite de serviço):  $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Como existe apenas uma ação variável ( $Q_{k,1}$ ), o último termo da expressão acima não precisa de ser considerado neste exemplo.

O módulo secante é utilizado nos cálculos para o deslocamento máximo— portanto, é necessário encontrar a tensão máxima devida a ações permanentes e variáveis sem coeficiente.

O módulo secante  $E_s = \left( \frac{E_{S1} + E_{S2}}{2} \right)$

Eq. 6.52

Onde  $E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n}$  e  $i = 1,2$

Eq. 6.53

A partir dos cálculos da análise estrutural:

Momento fletor máximo devido a cargas permanentes = 1,90 kNm

Momento fletor máximo devido a cargas impostas = 6,68 kNm

Momento fletor total devido a cargas não fatorizadas = 8,58 kNm

A secção é de Classe 4, portanto  $W_{eff}$  é utilizado nos cálculos para a tensão máxima no elemento.

Assuma-se, de forma conservativa, que a tensão de compressão e tração no banzo são aproximadamente iguais, i.e.  $E_{S1} = E_{S2}$

Para a classe austeníticas de aço inoxidável 1.4401,  $n = 7$

A tensão de cálculo para o estado limite de serviço,

$$\sigma_{i,Ed,ser} = \frac{M_{max}}{W_{eff,y}} = \frac{8,58 \times 10^6}{90,69 \times 10^3} = 94,6 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{S,i} = \frac{200000}{1 + 0,002 \times \frac{200000}{94,6} \times \left( \frac{94,6}{240} \right)^7} = 198757,6 \text{ N/mm}^2$$

O deslocamento máximo devido ao carregamento ocorre a uma distância de aproximadamente 1,9 m do suporte A.

O deslocamento máximo a uma distância  $x$  do suporte A devido ao carregamento, que se estende uma distância  $a$  do suporte A, é dada pelas seguintes fórmulas:

$$\text{Quando } x \geq a: \delta = \frac{waL^4}{24aE_s I} n^2 [2m^3 - 6m^2 + m(4+n^2) - n^2]$$

Onde  $m = x/L$  e  $n = a/L$

Quando  $x = 1,9$  m e  $a = 1,5$  m:  $m = 1,9/4,2 = 0,452$ ;  $n = 1,5/4,2 = 0,357$

Caso de carga (permanente + carga variável sem coeficiente):  $w = 11,0$  kN/m

Carga uniforme (ação permanente):  $w = 0,128$  kN/m

O deslocamento máximo devido à caso de carga a uma distância de 1,9 m do suporte A,

$\delta_1$ :

Tabela 6.4

Steel Designer's Manual (5<sup>th</sup> Ed)

$$\delta_1 = \frac{11000 \times 1,5 \times 4200^4}{24 \times 1500 \times 198757,6 \times 9,06 \times 10^6} \times$$

$$0,357^2 \times [2 \times 0,452^3 - 6 \times 0,452^2 + 0,452(4 + 0,357^2) - 0,357^2]$$

$$\delta_1 = 7,04 \text{ mm}$$

O deslocamento máximo a meio do vão devido ao peso próprio,  $\delta_2$

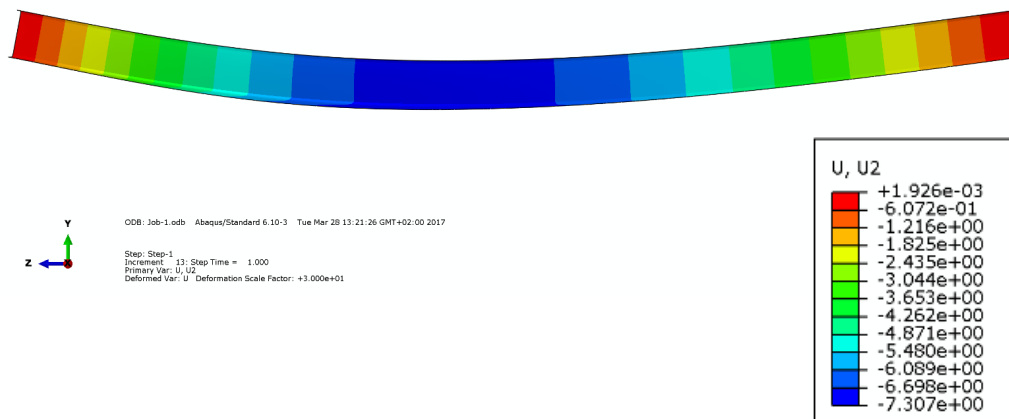
$$\delta_2 = \frac{5}{384} \times \frac{(w \times L)L^3}{E_s I} = \frac{5}{384} \times \frac{(0,128 \times 10^3 \times 4,2) \times 4200^3}{198757,6 \times 9,06 \times 10^6} = 0,29 \text{ mm}$$

Deslocamento máximo total  $\approx \delta_1 + \delta_2 = 7,04 + 0,29 = 7,33 \text{ mm}$

$$\delta_{\text{limite}} = \frac{L}{250} = \frac{4200}{250} = 16,8 \text{ mm} > 7,33 \text{ mm}$$

⇒ O deslocamento máximo é aceitável.

(Foi realizada uma análise de elementos finitos. O deslocamento máximo total da viga no ponto médio foi de 7.307 mm - veja a viga deformada em baixo.)



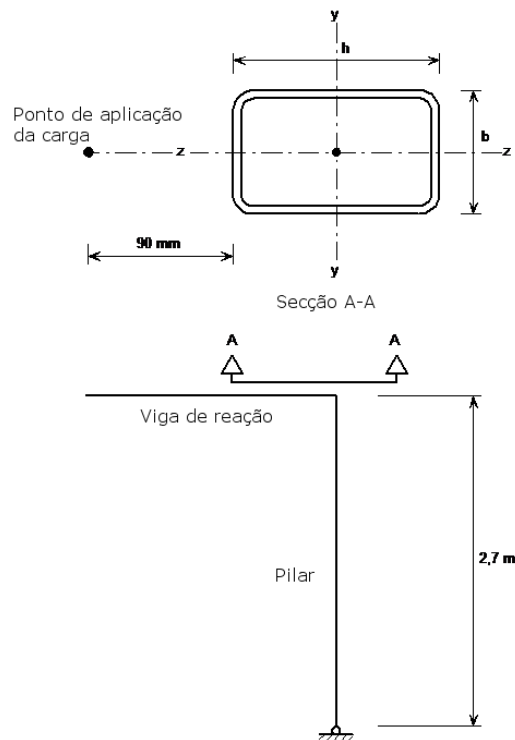


|  |              |  |             |      |       |       |
|--|--------------|--|-------------|------|-------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b> | Página1 de 7 |  |             |      |       |       |
|  | Título       | EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 10 – PILAR SUJEITO A CARGAS AXIAIS: DIMENSIONAMENTO AO FOGO |             |      |       |       |
|  | Cliente      | Research Fund for Coal and Steel   | Feito por   | SMH  | Data  | 08/01 |
|  |              |  | Revisto por | MEB  | Data  | 04/06 |
| Revisto por  |              |  | SA          | Data | 05/17 |       |

**EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 10 – PILAR SUJEITO A CARGAS AXIAIS: DIMENSIONAMENTO AO FOGO**

Dimensionamento de uma secção enformada a frio retangular aberta, sujeita a cargas axiais e momento fletor, considerando uma resistência ao fogo de 30 minutos. A secção não apresenta qualquer tipo de proteção ao fogo.

A altura do pilar é 2,7 m e está sujeito a uma carga axial aplicada a 90 mm desde a extremidade da viga de reação à face de menor dimensões da secção do pilar.



**Ações**

A excentricidade é dada por  $90\text{ mm} + h/2$ , onde  $h$  é a altura da secção. Deste modo, a viga introduz no pilar um momento fletor em relação ao eixo de maior inércia.

As ações desfavoráveis são: Ação permanente: 6 kN  
 Ação variável: 7 kN

O pilar será inicialmente verificado em relação aos estados limites últimos (LC1) e de seguida à ação do fogo (LC2) para um incêndio com duração de 30 minutos. Os casos de carga a considerar são os seguintes:

LC1 (estados limites últimos)  $\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$

$\gamma_{G,j} = 1,35$  (efeitos desfavoráveis)

$\gamma_{Q,1} = 1,5$



| Exemplo de dimensionamento 10   | Página 2 de 7   |
|---|---|
| <p>LC2 (para a ação do fogo) <math>\sum_j \gamma_{GAj} G_{kj} + \psi_{1,1} Q_{k,1}</math></p> <p><math>\gamma_{GA} = 1,0</math></p> <p>Os valores de <math>\psi_{1,1}</math> são dados na EN 1990 e no Anexo Nacional da EN 1990, mas para este exemplo considera-se, de modo conservativo, <math>\psi_{1,1} = 1,0</math>.</p> <p><b>Dimensionamento aos estados limites últimos (LC1)</b></p> <p>Carga a atuar no pilar devido à força transversal aplicada na extremidade da viga (LC1):</p> <p>Força axial <math>N_{Ed} = 1,35 \times 6 + 1,5 \times 7 = 18,6 \text{ kN}</math></p> <p>Considera-se a secção 100x50x6 RHS, enformada a frio.</p> <p>Momento fletor a atuar no eixo de maior inercia (devido à excentricidade da força transversal a partir do centro geométrico do pilar):</p> <p><math>M_{y,Ed} = 18,6 \times (0,09 + 0,10/2) = 2,60 \text{ kNm}</math></p> <p><b>Coefficientes parciais de segurança</b></p> <p>Coefficientes parciais de segurança para a resistência da secção transversal bruta e do elemento utilizados no dimensionamento aos estados limites últimos (LC1):</p> <p><math>\gamma_{M0} = 1,1</math> e <math>\gamma_{M1} = 1,1</math></p> <p><b>Propriedades dos materiais</b></p> <p>Utilize aço inox austenítico de classe 1.4401.</p> <p><math>f_y = 220 \text{ N/mm}^2</math> e <math>f_u = 530 \text{ N/mm}^2</math> (chapas laminadas a quente).</p> <p><math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math> e <math>G = 76900 \text{ N/mm}^2</math></p> <p><b>Propriedades da secção transversal- RHS 100 x 50 x 6 mm</b></p> <p><math>W_{el,y} = 32,58 \times 10^3 \text{ mm}^3</math>      <math>i_y = 32,9 \text{ mm}</math></p> <p><math>W_{pl,y} = 43,75 \times 10^3 \text{ mm}^3</math>      <math>i_z = 19,1 \text{ mm}</math></p> <p><math>A = 1500 \text{ mm}^2</math>      <math>t = 6,0 \text{ mm}</math></p> <p><b>Classificação da secção transversal</b></p> $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{220} \times \frac{200000}{210000} \right]^{0,5} = 1,01$ <p>Para secções RHS a largura de compressão <math>c</math> pode ser tida como <math>h - 3t</math>.</p> <p>Para a alma, <math>c = 100 - 3 \times 6 = 82 \text{ mm}</math></p> <p>Alma sujeita a compressão: <math>c/t = 82/6 = 13,7</math></p> <p>Limite para uma alma de Classe 1 = <math>33\varepsilon = 33,33</math></p> <p><math>33,33 &gt; 13,7 \therefore</math> A alma é de Classe 1</p> <p>Se a alma sujeita a compressão for Classe 1, então o banzo também será Classe 1.</p> <p><math>\therefore</math> A classificação geral da secção transversal é Classe 1 (sob compressão pura).</p> <p><b>Resistência da secção transversal à compressão</b></p> <p><math>N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}</math> para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3</p> | <p>Tabela 4.1</p> <p>Tabela 2.2</p> <p>Secção 2.3.1</p> <p>Secção 5.3.2</p> <p>Tabela 5.2</p> <p>Tabela 5.2</p> <p>Tabela 5.2</p> <p>Tabela 5.2</p> <p>Secção 5.7.3</p> <p>Eq. 5.27</p> |

| Exemplo de dimensionamento 10   | Página 3 de 7   |
|---|---|
| $N_{c,Rd} = \frac{1500 \times 220}{1,1} = 300 \text{ kN}$ <p>300 kN &gt; 18,6 kN ∴ verificado!</p>  |   |
| <p><b>Resistência da secção à flexão</b></p> $M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3}$ $M_{c,y,Rd} = \frac{43750 \times 220}{1,1} = 8,75 \text{ kNm}$ <p>8,75 kNm &gt; 2,60 kNm ∴ verificado!</p>   | <p>Secção 5.7.4<br/>Eq. 5.29</p>                                      |
| <p><b>Resistência da secção transversal à compressão axial e flexão</b></p> $M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}$ <p>Pode ser utilizada a seguinte aproximação para <math>M_{N,y,Rd}</math> em secções RHS:</p> $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1 - n) / (1 - 0,5a_w) \text{ but } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$ <p>Onde</p> $a_w = \frac{A - 2bt}{A} \text{ mas } a_w \leq 0,5$ $a_w = \frac{1500 - 2 \times 50 \times 6}{1500} = 0,6 \text{ mas } a_w \leq 0,5, \text{ portanto } a_w = 0,5$ $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{18,6}{300} = 0,062$ $M_{N,y,Rd} = 8,75 \left( \frac{1 - 0,062}{1 - 0,5 \times 0,5} \right) = 10,94 \leq M_{pl,y,Rd} = 8,75$ <p>Portanto <math>M_{N,y,Rd} = 8,75 \text{ kNm}</math>, e <math>M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}</math></p> | <p>Secção 5.7.6<br/>Eq. 5.33<br/>EN 1993-1-1, cláusula 6.2.9.1(5)</p> |
| <p><b>Resistência do elemento à encurvadura por compressão</b></p> $N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \text{ para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3}$ $\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$ <p>Onde</p> $\phi = 0,5 \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right)$ $\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \text{ para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3}$ <p><math>L_{cr}</math> = comprimento de encurvadura, tido de forma conservativa como <math>1,0 \times</math> comprimento da coluna = 2,7 m</p> $\bar{\lambda}_y = \frac{2700}{32,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 0,866$                    | <p>Secção 6.3.3<br/>Eq. 6.2<br/>Eq. 6.4<br/>Eq. 6.5<br/>Eq. 6.6</p>   |

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2700}{19,1} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 1,492$$

**Curvas de encurvadura: eixo principal (y-y):**

Para secções ocas em aço inoxidável austenítico enformado a frio sujeitos à encurvadura por flexão,  $\alpha = 0,49$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,30$ .

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,866 - 0,3) + 0,866^2) = 1,014$$

$$\chi_y = \frac{1}{1,014 + [1,014^2 - 0,866^2]^{0,5}} = 0,649$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{0,649 \times 1500 \times 220}{1,10} = 194,70 \text{ kN}$$

194,70 kN > 18,6 kN  $\therefore$  verificado!

**Curvas de encurvadura: eixo secundário (z-z):**

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,492 - 0,3) + 1,492^2) = 1,905$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,905 + [1,905^2 - 1,492^2]^{0,5}} = 0,324$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,324 \times 1500 \times 220}{1,10} = 97,20 \text{ kN}$$

97,20 kN > 18,6 kN  $\therefore$  verificado!

(A resistência à encurvadura lateral não será crítica para uma secção retangular oca com uma relação  $h/b$  de 2.)

**Resistência à encurvadura do elemento sujeito a flexão e compressão combinada**

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$$

$\beta_{w,y} = 1,0$  para secções transversais de Classe 1

$$k_y = 1,0 + D_1 (\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

A partir da tabela 6.6,  $D_1 = 2,0$  e  $D_2 = 0,3$  e  $D_3 = 1,3$

$$k_y = 1,0 + 2 \times (0,866 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,108 < 1 + 2 \times (1,3 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,191$$

$\therefore k_y = 1,108$

$$\frac{18,6}{97,20} + 1,108 \times \left( \frac{2,60 \times 10^6 + 0}{1,0 \times 43,75 \times 10^3 \times 220 / 1,10} \right) = 0,521 < 1 \therefore \text{acceptable}$$

Tabela 6.1

Secção 6.3.1

Secção 6.5.2

Eq. 6.56

Eq. 6.63

Tabela 6.6

| Exemplo de dimensionamento 10  | Página 5 de 7  |
|--|--|
| <p><b>Resistência ao estado limite de fogo (LC2)</b></p> <p>Para LC2, a coluna é dimensionada para as seguintes cargas axiais e momentos fletores.</p> <p>Força axial de compressão <math>N_{fi,Ed} = 1,0 \times 6 + 1,0 \times 7 = 13,0</math> kN</p> <p>Momento fletor máximo <math>M_{y,fi,Ed} = 13,0 \times (0,09 + 0,05) = 1,82</math> kNm</p> <p><b>Cálculo da temperatura no aço após 30 minutos de duração do fogo</b></p> <p>Assumindo que a secção está desprotegida e que a distribuição de temperatura é uniforme na secção transversal, o aumento da temperatura durante o intervalo de tempo <math>\Delta t</math> é calculado a partir de:</p> $\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c \rho} h_{net,d} \Delta t$ $\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$ $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta)$ $\dot{h}_{net,r} = \phi \epsilon_{res} 5,67 \times 10^{-8} \left[ (\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4 \right]$ <p>onde:</p> <p><math>\theta_g</math> = temperatura ambiente do gás, do elemento exposto ao fogo, dada pela curva nominal temperatura-tempo:</p> $\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$ <p><math>\theta</math> = temperatura na superfície do elemento</p> <p>Valores iniciais de entrada para a determinação da temperatura final do aço:</p> <p><math>A_m/V = 200</math> m<sup>-1</sup></p> <p><math>\alpha_c = 25</math> W/m<sup>2</sup>K</p> <p>Temperatura inicial do aço: <math>\theta = 20</math> °C</p> <p>Emissividade resultante: <math>\epsilon_{res} = 0,4</math></p> <p>Densidade do aço inoxidável: <math>\rho = 8000</math> kg/m<sup>3</sup> para aço inox austenítico de classe 1.4401</p> <p>Fator de configuração: <math>\phi = 1,0</math></p> <p>O calor específico depende da temperatura e é dado pela seguinte expressão:</p> $c = 450 + 0,28\theta - 2,91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta^3$ J/kgK <p><math>\Delta t = 2</math> segundos</p> <p>As fórmulas acima e os dados de entrada inicial foram codificadas numa folha de Excel, obtendo-se a seguinte temperatura para o aço, após 30 minutos de incêndio.</p> <p><math>\theta = 829</math> °C</p> <p><b>Redução das propriedades mecânicas a temperaturas elevadas</b></p> <p>Para o cálculo da resistência a temperaturas elevadas são necessários os seguintes fatores de redução:</p> <p>Fator de redução do módulo de Young: <math>k_{E,\theta} = E_\theta/E</math></p> <p>Fator de redução da tensão limite de elasticidade 0,2%: <math>k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta}/f_y</math></p> <p>Fator de redução a 2% da deformação total: <math>k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y</math> mas <math>f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}</math></p> | <p>Secção 8.4.4</p> <p>Eq. 8.41</p> <p>Eq. 8.42</p> <p>Eq. 8.43</p> <p>Eq. 8.44</p> <p>Eq. 8.45</p> <p>Secção 8.4.4</p> <p>Secção 8.4.4</p> <p>Tabela 2.7</p> <p>EN 1991-1-2<br/>cl. 3.1(7)</p> <p>Eq. 8.37</p> <p>Secção 8.2</p> <p>Eq. 8.4</p> <p>Eq. 8.1</p> <p>Eq. 8.2</p> |

| Exemplo de dimensionamento 10   | Página 6 de 7  |
|---|--|
| <p>Os valores para os fatores de redução a 829 ° C são obtidos por interpolação linear:</p> $k_{E,0} = 0,578$ $k_{p0,2,0} = 0,355$ $k_{2,0} = 0,430$ $k_{u,0} = 0,297$ $f_{2,0} = 0,430 \times 220 = 94,6 \text{ e } f_{u,0} = 0,297 \times 530 = 157, \text{ portanto } f_{2,0} \leq f_{u,0}$ <p><b>Coefficiente parcial de segurança</b></p> <p>Coefficientes parciais de segurança para o dimensionamento à ação do fogo (LC2): <math>\gamma_{M,fi} = 1,0</math></p> <p><b>Classificação da secção transversal</b></p> <p>Sobre compressão, <math>k_{y,0}</math> deve ser baseado em <math>f_{p0,2,0}</math>, i.e. <math>k_{y,0} = k_{p0,2,0}</math></p> $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,0}}{k_{y,0}} \right]^{0,5} = 1,01 \times \left[ \frac{0,578}{0,355} \right]^{0,5} = 1,29$ <p>Alma sujeita a compressão: <math>c/t = 82/6 = 13,7</math></p> <p>Limite para alma de Classe 1 = <math>33 \varepsilon_{\theta} = 42,57</math></p> <p><math>42,57 &gt; 13,7 \therefore</math> A alma é Classe 1</p> <p><math>\therefore</math> A classificação geral da secção transversal é Classe 1 (sob compressão pura).</p> <p><b>Resistência do elemento à encurvadura por compressão</b></p> $N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,0} f_y}{\gamma_{M,fi}} \text{ para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3}$ $\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + [\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_0^2]^{0,5}} \leq 1$ <p>onde</p> $\phi_{\theta} = 0,5 \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_0^2 \right)$ $\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \left[ \frac{k_{p0,2,0}}{k_{E,0}} \right]^{0,5} \text{ para todas as Classes de secções transversais}$ $\bar{\lambda}_{y,0} = 0,866 \left[ \frac{0,355}{0,578} \right]^{0,5} = 0,679$ $\bar{\lambda}_{z,0} = 1,492 \left[ \frac{0,355}{0,578} \right]^{0,5} = 1,169$ <p><b>Curvas: eixo principal (y-y):</b></p> <p>Para secções ocas em aço inoxidável austenítico enformado a frio sujeitas à encurvadura por flexão, <math>\alpha = 0,49</math> e <math>\bar{\lambda}_0 = 0,30</math>.</p> $\phi_{\theta,y} = 0,5 \times \left( 1 + 0,49 \times (0,679 - 0,3) + 0,679^2 \right) = 0,823$ | <p>Tabela 8.1</p> <p>Tabela 8.1</p> <p>Secção 8.1</p> <p>Secção 8.3.2</p> <p>Secção 8.2</p> <p>Eq. 8.6</p> <p>Eq. 8.10</p> <p>Eq. 8.12</p> <p>Eq. 8.13</p> <p>Eq. 8.14</p> <p>Tabela 6.1</p> |

$$\chi_{fi,y} = \frac{1}{0,823 + [0,823^2 - 0,679^2]^{0,5}} = 0,776$$

$$N_{b,y,fi,t,Rd} = \frac{0,776 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 90,91 \text{ kN}$$

90,91 kN > 13,0 kN ∴ verificado!

**Curvas de encurvadura: eixo secundário (z-z):**

$$\phi_{\theta,z} = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,169 - 0,3) + 1,169^2) = 1,396$$

$$\chi_{fi,z} = \frac{1}{1,396 + [1,396^2 - 1,169^2]^{0,5}} = 0,463$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \frac{0,463 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 54,24 \text{ kN}$$

54,24 kN > 18,6 kN ∴ verificado!

**Resistência à encurvadura do elemento com flexão e compressão combinada**

$$\frac{N_{fi,Ed}}{A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1$$

Eq. 8.26

Onde

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

Eq. 8.30

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

Eq. 8.31

Assumindo que a coluna tem uma ligação articulada na base, ocorre uma distribuição triangular do momento fletor e  $\beta_M = 1,8$ :

Tabela 8.3

$$\begin{aligned} \mu_y &= (1,2 \times 1,8 - 3) \times 0,679 + 0,44 \times 1,8 - 0,29 \\ &= -0,068 \end{aligned}$$

$$k_y = 1 - \frac{(-0,068) \times 13,0 \times 10^3}{0,776 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} = 1,010 < 3,0$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left( \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right) \text{ para secções transversais de Classe 1, 2 ou 3}$$

Eq. 8.15

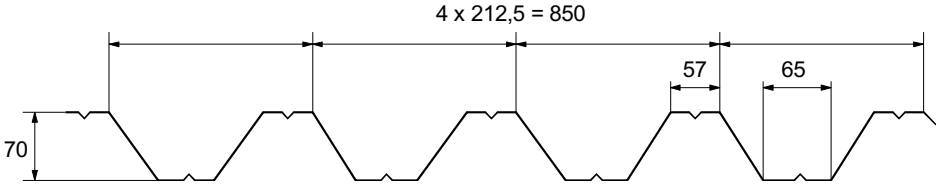
$$M_{y,fi,\theta,Rd} = 0,430 \times 8,75 \times \left( \frac{1,10}{1,0} \right) = 4,14 \text{ kNm}$$

$$\frac{13,0}{0,463 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} + \frac{1,010 \times 1,82}{4,14} = 0,444 \leq 1$$

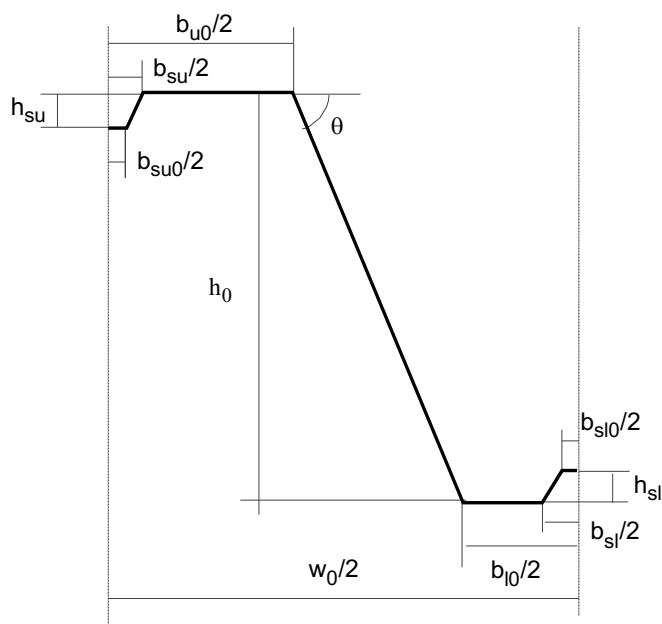
Eq. 8.26

Portanto, a secção tem resistência adequada para um incêndio de 30 minutos.



|   |               |   |                          |       |              |       |
|---|---------------|---|--------------------------|-------|--------------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b>  | Página 1 de 8 |   |                          |       |              |       |
|   | Título        | Exemplo de Dimensionamento 11 – Chapa perfilada com dois vãos |                          |       |              |       |
|   | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel                              | Feito por                | JG/AO | Data         | 02/06 |
|   |               |   | Revisto por              | GZ    | Data         | 03/06 |
|   |               | Revisto por   | SJ                       | Data  | 04/17        |       |
| <b>EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 11 – CHAPA PERFILADA COM DOIS VÃOS</b><br>Dimensionamento de uma chapa perfilada com dois vãos. O material utilizado é o aço inox austenítico de classe 1.4401 com 0,6 mm de espessura. Este exemplo de dimensionamento será comparado com o caso em que é utilizado o aço inox ferrítico (Exemplo de dimensionamento 3). As dimensões da secção transversal é a apresentada na figura abaixo (Não há diferenças no processo de dimensionamento entre o aço ferrítico e austenítico.)<br><br>As dimensões da secção transversal é a apresentada na figura abaixo.  |               |   |                          |       |              |       |
| Este exemplo ilustra as seguintes etapas de dimensionamento: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinação das propriedades da secção efetiva aos estados limites últimos;</li> <li>- Determinação da resistência à flexão da secção;</li> <li>- determinação da resistência do apoio intermédio;</li> <li>- Determinação dos deslocamentos máximos em relação aos estados limites de serviço.</li> </ul>   |               |   |                          |       |              |       |
| <b>Dados para dimensionamento</b>   |               |   |                          |       |              |       |
| Vãos  | $L$           | =   | 3500 mm                  |       |              |       |
| Largura dos apoios  | $s_s$         | =   | 100 mm                   |       |              |       |
| Carga de dimensionamento  | $Q$           | =   | 1,4 kN/m <sup>2</sup>    |       |              |       |
| Peso próprio  | $G$           | =   | 0,07 kN/m <sup>2</sup>   |       |              |       |
| Espessura   | $t$           | =   | 0,6 mm                   |       |              |       |
| Tensão de cedência  | $f_y$         | =   | 460 N/mm <sup>2</sup>    |       | Tabela 2.3   |       |
| Módulo de elasticidade  | $E$           | =   | 200000 N/mm <sup>2</sup> |       | Secção 2.3.1 |       |
| Coefficiente parcial de segurança   | $\gamma_{M0}$ | =   | 1,1                      |       | Tabela 4.1   |       |
| Coefficiente parcial de segurança   | $\gamma_{M1}$ | =   | 1,1                      |       | Tabela 4.1   |       |
| Coefficiente parcial relativo às ações permanentes  | $\gamma_G$    | =   | 1,35                     |       | Secção 4.3   |       |
| Coefficiente parcial relativo às ações variáveis  | $\gamma_Q$    | =   | 1,5                      |       | Secção 4.3   |       |
| Na figura abaixo é representado um esquema detalhado com todas as dimensões a serem consideradas para a chapa perfilada. O banzo superior encontra-se sujeito a compressão sobre o apoio intermédio.  |               |   |                          |       |              |       |





Dimensões em relação à linha média:

$$h_0 = 70 \text{ mm}$$

$$w_0 = 212,5 \text{ mm}$$

$$b_{u0} = 65 \text{ mm}$$

$$b_{l0} = 57 \text{ mm}$$

$$b_{su} = 20 \text{ mm}$$

$$b_{su0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{su} = 6 \text{ mm}$$

$$b_{sl} = 20 \text{ mm}$$

$$b_{sl0} = 8 \text{ mm}$$

$$h_{sl} = 6 \text{ mm}$$

$r = 2 \text{ mm}$  (raio interno dos cantos)

Ângulo da alma:

$$\theta = \text{atan} \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \text{atan} \left| \frac{70}{0,5 \times (212,5 - 65 - 57)} \right| = 57,1^\circ$$

### Propriedades da seção efetiva para o estado limite último (ULS)

Verificação da largura máxima para os raios de espessura:

$$h_0/t = 70/0,6 = 117 \leq 400 \sin \theta = 336$$

Ângulo da alma e raio do canto:

$$\max(b_{l0}/t; b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0,6 = 108 \leq 400$$

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

A influência dos cantos arredondados na resistência da seção transversal pode ser desprezado caso o raio interno  $r \leq 5t$  and  $r \leq 0,10b_p$

$$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t; 0,1b_p) = \min(5 \times 0,6; 0,1 \times 22,5) = 2,25 \text{ mm}$$

A influência dos cantos arredondados na resistência da seção transversal pode ser desprezada.

### Localização do centroide quando a alma é totalmente efetiva

Cálculo do fator de redução  $\rho$  para a largura efetiva do banzo comprimido:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ mas } \leq 1$$

onde

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{22,5/0,6}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{4}} = 0,946$$

$$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$$

Seção 5.2

Tabela 5.1

Tabela 5.1

Seção 5.6.2

Seção 5.4.1  
Eq. 5.1

Eq. 5.3

Tabela 5.3

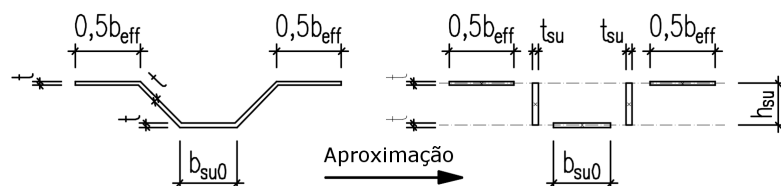
$$\bar{b} = b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{460} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,698$$

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,946} - \frac{0,079}{0,946^2} = 0,728 \leq 1$$

$$b_{\text{eff},u} = \rho \bar{b} = 0,728 \times 22,5 = 16,38 \text{ mm}$$

### Propriedades efetivas do reforço



$$t_{su} = \frac{\sqrt{h_{su}^2 + \left(\frac{b_{su} - b_{su0}}{2}\right)^2}}{h_{su}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},u} + b_{su0})t + 2h_{su}t_{su} = (16,38 + 8) \times 0,6 + 2 \times 6 \times 0,849 = 24,82 \text{ mm}^2$$

$$e_s = \frac{b_{su0}h_{su}t + 2h_{su}\frac{h_{su}}{2}t_{su}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0,6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0,849}{24,82} = 2,39 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{su0}t(h_{su} - e_s)^2 + 2h_{su}t_{su}\left(\frac{h_{su}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{su0}t^3}{12} + 2\frac{t_{su}h_{su}^3}{12}$$

$$I_s = 2 \times (15 \times 0,6^2 \times 2,39^2) + 8 \times 0,6 \times (6 - 2,39)^2 + 2 \times 6 \times 0,849 \times \left(\frac{6}{2} - 2,39\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0,6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0,6^3}{12} + 2 \times \frac{0,849 \times 6^3}{12} = 159,07 \text{ mm}^4$$

$$b_s = 2\sqrt{h_{su}^2 + \left(\frac{b_{su} - b_{su0}}{2}\right)^2} + b_{su0} = 2 \times \sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2} + 8 = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \left[ I_s b_p^2 \left( \frac{2b_p + 3b_s}{t^3} \right) \right]^{1/4} = 3,07 \times \left[ 159,07 \times 22,5^2 \times \left( \frac{2 \times 22,5 + 3 \times 25}{0,6^3} \right) \right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{212,5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83,4 \text{ mm}$$

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22,5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = \sqrt{\frac{83,4 + 2 \times 70}{83,4 + 0,5 \times 70}} = 1,37$$

Tabela 5.2

Tabela 5.3

Fig. 5.3

Fig. 5.3

Eq. 5.10

Fig. 5.5

Eq. 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83,4} = 3,01 \geq 2 \Rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Eq. 5.8

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}}$$

Eq. 5.4

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \times 1,37 \times 200 \times 10^3}{24,82} \times \sqrt{\frac{159,07 \times 0,6^3}{4 \times 22,5^2 \times (2 \times 22,5 + 3 \times 25)}} = 551,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{460}{551,3}} = 0,913$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,913 < 1,38 \Rightarrow$$

Eq. 5.17

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 0,913 = 0,81$$

$$t_{red,u} = \chi_d t = 0,81 \times 0,6 = 0,486 \text{ mm}$$

A distância do eixo neutro ao banzo comprimido:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{h_{sl}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin\theta = 0,6 / \sin(57,1^\circ) = 0,714 \text{ mm}$$

| $e_i$ [mm]             | $A_i$ [mm <sup>2</sup> ]        |
|------------------------|---------------------------------|
| 0                      | $0,5b_{eff,u} t = 4,9$          |
| 0                      | $0,5b_{eff,u} \chi_d t = 3,98$  |
| $0,5h_{su} = 3$        | $h_{su} \chi_d t_{su} = 4,13$   |
| $h_{su} = 6$           | $0,5b_{su0} \chi_d t = 1,94$    |
| $0,5h_0 = 35$          | $h_0 t_w = 49,98$               |
| $h_0 = 70$             | $0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$ |
| $h_0 - 0,5h_{sl} = 67$ | $h_{sl} t_{sl} = 5,09$          |
| $h_0 - h_{sl} = 64$    | $0,5b_{sl0} t = 2,4$            |

$$A_{tot} = \sum A_i = 83,52 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 36,46 \text{ mm}$$

### Secção transversal efetiva da zona comprimida da alma

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{200}{1,1 \times 460 \times 10^{-3}}}$$

$$= 9,07 \text{ mm}$$

$$s_{eff,n} = 1,5s_{eff,0} = 1,5 \times 9,07 = 13,61 \text{ mm}$$

EN 1993-1-3  
5.5.3.4.3(4-5)

### Propriedades da secção transversal por meia nervura

$$h_{eff,1} = s_{eff,1} \sin\theta = 9,07 \times \sin(57,1^\circ) = 7,62 \text{ mm}$$

$$h_{eff,n} = s_{eff,n} \sin\theta = 13,61 \times \sin(57,1^\circ) = 11,43 \text{ mm}$$

| $e_{\text{eff},i}$ [mm]  | $A_{\text{eff},i}$ [mm <sup>2</sup> ]      | $I_{\text{eff},i}$ [mm <sup>4</sup> ]                      |
|--|--|--|
| 0  | $0,5b_{\text{eff},u}t = 4,9$               | $\approx 0$  |
| 0  | $0,5b_{\text{eff},u}\chi_d t = 4,0$        | $\approx 0$  |
| $0,5h_{\text{su}} = 3$   | $h_{\text{su}}\chi_d t_{\text{su}} = 4,1$  | $\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 = 12,4$         |
| $h_{\text{su}} = 6$  | $0,5b_{\text{su}0}\chi_d t = 1,9$          | $\approx 0$  |
| $0,5h_{\text{eff},1} = 3,8$  | $h_{\text{eff},1}t_w = 5,4$                | $t_w h_{\text{eff},1}^3 / 12 = 26,3$                       |
| $h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) = 47,5$   | $(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})t_w = 32,1$ | $t_w \frac{(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3}{12} = 5411,1$ |
| $h_0 = 70$   | $0,5(b_{l0} - b_{sl})t = 11,1$             | $\approx 0$  |
| $h_0 - 0,5h_{sl} = 67$   | $h_{sl}t_{sl} = 5,1$                       | $t_{sl}h_{sl}^3 / 12 = 15,3$                               |
| $h_0 - h_{sl} = 64$  | $0,5b_{sl0}t = 2,4$                        | $\approx 0$  |
| $A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff},i} = 71,0 \text{ mm}^2$<br>$e_c = \frac{\sum A_{\text{eff},i} e_{\text{eff},i}}{A_{\text{tot}}} = 40,0 \text{ mm}$<br>$I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff},i} + \sum A_{\text{eff},i} (e_c - e_{\text{eff},i})^2 = 5\,465,1 + 46\,021,6 = 51\,486,7 \text{ mm}^2$   |  |  |
| <p>Como opção, as propriedades efetivas da secção também podem ser redefinidas iterativamente com base na localização do eixo efetivo do centroide.</p> <p><b>Resistência à flexão por unidade de largura (1 m)</b></p> $I = \frac{1000}{0,5w_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 51\,486,7 = 484\,580,7 \text{ mm}^4$ $W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{484\,580,7}{40} = 12\,114,5 \text{ mm}^3$ $W_l = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{484\,580,7}{70 - 40} = 16\,152,7 \text{ mm}^3$ <p>Porque <math>W_u &lt; W_l \Rightarrow W_{\text{eff},\text{min}} = W_u = 12\,114,5 \text{ mm}^3</math></p> $M_{c,\text{Rd}} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} f_y}{\gamma_{M0}} = 12\,114,5 \times 460 \times \frac{10^{-6}}{1,1} = 5,07 \text{ kNm}$ |  |  |
| <p><b>Determinação da resistência no suporte intermédio</b></p> <p><b>Resistência ao enrugamento da alma</b></p> $c \geq 40 \text{ mm}$ $r/t = 2/0,6 = 3,33 \leq 10$ $h_w/t = 70/0,6 = 117 \leq 200 \sin \theta = 200 \sin(57,1^\circ) = 168$ $45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$ $\beta_V = 0 \leq 0,2 \Rightarrow l_a = s_s = 100 \text{ mm}$ $\alpha = 0,15$ (categoria 2)  |  |  |

EN 1993-1-3

Eq. 5.31

Secção 6.4.4

EN 1993-1-3

cláusula 6.1.7

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left( 1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left( 0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}} \right) \left[ 2,4 + \left( \frac{\varphi}{90} \right)^2 \right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000}{0,5 w_0}$$

$$R_{w,Rd} = 0,15 \times 0,6^2 \sqrt{460 \times 200\,000} \times \left( 1 - 0,1 \sqrt{\frac{2}{0,6}} \right) \left( 0,5 + \sqrt{0,02 \times \frac{100}{0,6}} \right) \times \left[ 2,4 + \left( \frac{57,1}{90} \right)^2 \right] \times \frac{1}{1,1} \times \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 10^{-3} = 23,6 \text{ kN}$$

EN 1993-1-3  
Eq. 6.18**Combinação do momento fletor e da reação no suporte**

Ações por unidade de largura (1 m):

$$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1,35 \times 0,07 + 1,5 \times 1,4 = 2,19 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2,19 \times 3,5^2}{8} = 3,35 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4} qL = \frac{5}{4} \times 2,19 \times 3,5 = 9,58 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,35}{5,07} = 0,661 \leq 1,0$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{9,58}{23,6} = 0,406 \leq 1,0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,661 + 0,406 = 1,067 \leq 1,25$$

EN 1993-1-3  
Eq. 6.28a - c

A resistência da secção transversal satisfaz as condições.

**Determinação dos deslocamentos máximos para o estado limite de serviço (SLS)****Propriedades efetivas da secção transversal**

Para a verificação de serviço, a largura efetiva dos elementos sujeitos à compressão deve ser baseada no esforço de compressão do elemento sob o carregamento calculado de acordo com o SLS.

EN 1993-1-3  
cláusula 5.5.1

Tensão de compressão máxima na secção efetiva para o SLS. É feita uma aproximação conservadora com base em  $W_u$  determinado acima para o ULS.

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G + Q)L^2}{8} = \frac{(0,07 + 1,4) \times 3,5^2}{8} = 2,25 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{2,25 \times 10^6}{12114,5} = 185,7 \text{ N/mm}^2$$

As propriedades da secção efetiva são determinadas como anteriormente para o ULS, excetuando que  $f_y$  é substituído por  $\sigma_{com,Ed,ser}$  e a espessura do reforço do banzo não é reduzida. Os resultados dos cálculos são:

Largura efetiva do banzo comprimido: O banzo é totalmente efetivo.

Localização do centroide quando a alma é totalmente efetiva:  $e_c = 34,1 \text{ mm}$

Secção transversal efetiva da zona da alma comprimida: A alma é totalmente efetiva.

Parte efetiva da alma:  $s_{eff,l} = 14,268 \text{ mm}$

$s_{eff,n} = 21,4 \text{ mm}$

Propriedades efetivas da secção transversal por meia nervura:

$$A_{\text{tot}} = 82,44 \text{ mm}^2$$

$$e_c = 36,25 \text{ mm}$$

$$I_{\text{tot}} = 59726,1 \text{ mm}^4$$

Propriedades da secção efetiva por unidade de comprimento (1 m):

$$I = 562128,0 \text{ mm}^4$$

$$W_u = 15507,0 \text{ mm}^4$$

$$W_l = 16655,6 \text{ mm}^4$$

### Determinação do deslocamento máximo

Módulo de elasticidade secante correspondente ao valor máximo do momento fletor:

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_u} = \frac{2,25 \times 10^6}{15\,507} = 145,096 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_l} = \frac{2,25 \times 10^6}{16\,655,6} = 135,090 \text{ N/mm}^2$$

$n = 7$  (para a classe austenítica de aço inoxidável 1.4401)

$$E_{S,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,145} \left( \frac{0,145}{0,460} \right)^7} = 199,83 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_{S,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,135} \left( \frac{0,135}{0,460} \right)^7} = 199,89 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_S = \frac{E_{S,1} + E_{S,2}}{2} = \frac{199,83 + 199,89}{2} = 199,86 \text{ kN/mm}^2$$

### Verificação do deslocamento máximo:

Como uma simplificação conservadora, a variação de  $E_{s,\text{ser}}$  ao longo do comprimento do membro é negligenciada.

Para o cálculo das propriedades da rigidez da secção transversal, deve ser considerado o efeito dos cantos arredondados deve ser tida em consideração. A influência é considerada pela seguinte aproximação:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{2 \times \frac{294,2^\circ}{90^\circ}}{149,3} = 0,019$$

$$I_{y,r} = I (1 - 2\delta) = 562128,0 (1 - 2 \times 0,019) = 540767,1 \text{ mm}^4$$

Para a localização do deslocamento máximo:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 3,5 = 1,48 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_S I_{y,r}} \left( \frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right)$$

$$\delta = \frac{(0,07 + 1,4) \times 10^3 \times 3,5^4}{48 \times 199,86 \times 10^6 \times 540767,1 \times 10^{-12}} \times \left( \frac{1,48}{3,5} - 3 \times \frac{1,48^3}{3,5^3} + 2 \times \frac{1,48^4}{3,5^4} \right)$$

$$\delta = 11,1 \text{ mm}$$

O deslocamento máximo permitido é  $L/200 = 3500/200 = 17,5 \text{ mm} > 11,1 \text{ mm}$ , portanto, o

Tabela 6.4

Eq. 6.53

Eq. 6.53

Eq. 6.52

Eq. 5.22

Eq. 5.20

deslocamento máximo calculado é aceitável.

**Comparação entre chapas recozidas ou enformadas a frio**

De seguida apresenta-se a comparação da resistência à flexão por unidade de largura e resistência a forças transversais locais de chapas idênticas na condição recozida ( $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ ) e na condição de enformadas a frio ( $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ ) é dada em baixo:

$$f_y = 280 \text{ N/mm}^2 \text{ (Exemplo 3)} \quad M_{c,Rd} = 3,84 \text{ kNm} \text{ and } R_{w,Rd} = 18,4 \text{ kN}$$

$$f_y = 460 \text{ N/mm}^2 \text{ (Exemplo 11)} \quad M_{c,Rd} = 5,07 \text{ kNm} \text{ and } R_{w,Rd} = 23,6 \text{ kN}$$

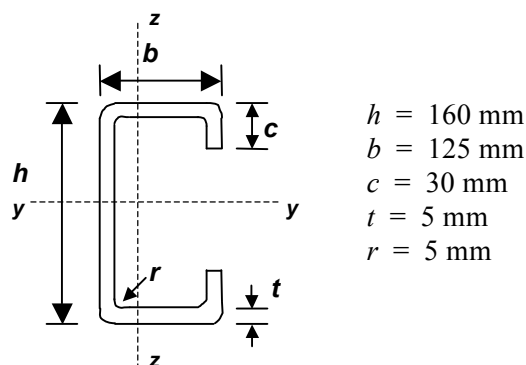
Para as chapas no estado recozido, o vão deve ser reduzida para 2,9 m em comparação com 3,5 m para o material na condição de enformado a frio. Assim, as chapas feitas em material enformado a frio permitem utilizar vãos superiores, o que significa que o número de vigas secundárias pode ser reduzido, levando a reduções de custos.

|  |               |  |             |       |                            |       |
|--|---------------|--|-------------|-------|----------------------------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br><b>FOLHA DE CÁLCULO</b>   | Página 1 de 8 |  |             |       |                            |       |
|  | Título        | Exemplo de dimensionamento 12 – Viga com secção transversal C sujeita à flexão |             |       |                            |       |
|  | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel   | Feito por   | ER/EM | Data                       | 02/06 |
|  |               |  | Revisto por | HB    | Data                       | 03/06 |
|  |               | Revisto por  | ER/IA       | Data  | 04/17                      |       |
| <b>EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 12 – VIGA COM SECÇÃO TRANSVERSAL C SUJEITA À FLEXÃO</b><br><p>Dimensionamento de um perfil estrutural em C em aço inox austenítico de classe 1.4401 enformado a frio em condições de tratamento a frio CP500 e sujeito à flexão. O banzo comprimido não está restringindo. A viga é simplesmente apoiada com um vão <math>l = 4,0</math> m. A distância entre vigas é 1,0 m.</p> <p>Como a carga não é aplicada no centro de corte da secção, é necessário verificar a interação entre a resistência à torção da secção transversal e da encurvadura lateral do elemento. No entanto, neste exemplo apenas se verifica a resistência à encurvadura lateral.</p> <p><b>Coefficientes parciais de segurança</b></p> <p>Coefficientes parciais de segurança para a resistência da secção transversal bruta e do elemento: <math>\gamma_{M0} = 1,1</math> e <math>\gamma_{M1} = 1,1</math></p> <p>Coefficiente parcial de combinação para ações: <math>\gamma_G = 1,35</math> (cargas permanentes) e <math>\gamma_Q = 1,5</math> (cargas variáveis)</p> <p><b>Ações</b></p> <p>Ações permanentes (<math>G</math>): <math>2 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Ações variáveis (<math>Q</math>): <math>3 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Visto que a distância entre duas vigas adjacentes é 1m,</p> <p><math>G_k = 2 \text{ kN/m}</math></p> <p><math>Q_k = 3 \text{ kN/m}</math></p> <p>Caso de carga a considerar para os estados limites últimos:</p> $q^* = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7,2 \text{ kN/m}$ <p><b>Análise Estrutural</b></p> <p>Reações nos apoios (Esforço transversal atuante)</p> $V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN}$ <p>Momento fletor atuante</p> $M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}$ <p><b>Propriedades dos materiais</b></p> <p><math>f_y = 460 \text{ N/mm}^2</math></p> <p>Módulo de elasticidade <math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math>, e módulo de elasticidade transversal <math>G = 76900 \text{ N/mm}^2</math></p> |               |  |             |       |                            |       |
|  |               |  |             |       | Tabela 4.1                 |       |
|  |               |  |             |       | EN 1991                    |       |
|  |               |  |             |       | EN 1991                    |       |
|  |               |  |             |       | Tabela 2.3<br>Secção 2.3.1 |       |



**Propriedades da secção transversal**

A influência dos cantos arredondados na resistência da secção transversal pode ser desprezada se o raio interno  $r \leq 5t$  e  $r \leq 0,10b_p$  e a secção transversal puderem ser considerados como elementos planos com cantos afiados. Para as propriedades da rigidez da secção transversal, a influência de cantos arredondados deve ser sempre tida em consideração.



$$r_m = r + t/2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\varphi/2) - \sin(\varphi/2)] = 2,2 \text{ mm}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 25 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 11,56 \text{ mm}$$

A influência dos cantos arredondados nas propriedades da secção pode ser tida em consideração com precisão, através da redução das propriedades calculadas para uma secção transversal similar com cantos afiados, usando as seguintes aproximações:

$$\text{Largura plana nominal do banzo, } b_{p,f} = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$\text{Largura plana nominal da alma, } b_{p,w} = h - t - 2g_r = 150,6 \text{ mm}$$

$$\text{Largura plana nominal da aba, } b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 25,3 \text{ mm}$$

$$A_{g,sh} = t [2b_{p,f} + b_{p,w} + 2b_{p,l}] = 2162 \text{ mm}^2$$

$$I_{y,g,sh} = 2 \times \left[ \frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t)^2 \right] + 2 \times \left[ \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t + b_{p,l} t (0,5h - (c - b_{p,l}) - 0,5b_{p,l})^2 \right] + \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t = 9,376 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 2119 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) = 9,0 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

**Classificação da secção transversal**

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 0,698$$

**Banzo:** Peças internas comprimidas. Parte sujeita a compressão.

Secção  
5.6.2

Figura 5.5

Eq. 5.22

Eq. 5.19

Eq. 5.20

Secção 5.3

Tabela 5.2

$$c = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm e } c/t = 23,12$$

Para Classe 2,  $c/t \leq 35\epsilon = 24,43$ , portanto os banzos são de Classe 2

**Alma:** Peças internas comprimidas. Parte sujeita a flexão.

$$c = b_{p,w} = 150,6 \text{ mm e } c/t = 30,12$$

Para Classe 1,  $c/t \leq 72\epsilon = 50,26$ , portanto a alma é de Classe 1.

**Aba:** Banzos salientes. Parte submetida a compressão, aba em compressão.

$$c = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm e } c/t = 5,06$$

Para Classe 1,  $c/t \leq 9\epsilon = 6,28$ , portanto a aba é de Classe 1.

### Efeitos de *shear lag*

O *shear lag* nos banzos pode ser desprezado se  $b_0 < L_e/50$ , onde  $b_0$  é tomado como o banzo saliente ou metade da largura de um elemento interno e  $L_e$  é o comprimento entre os pontos com flexão nula.

$$\text{Para elementos internos: } b_0 = (b - t)/2 = 60 \text{ mm}$$

$$\text{O comprimento entre os pontos com flexão nula é: } L_e = 4000 \text{ mm, } L_e/50 = 80 \text{ mm}$$

Portanto, o *shear lag* pode ser desprezado.

### Enrugamento dos banzos

O enrugamento dos banzos pode ser desprezada se a curvatura em direção ao eixo neutro,  $u$ , é inferior a 5% da profundidade da secção transversal do perfil:

$$u = 2 \frac{\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z}$$

$\sigma_a$  é a tensão nos banzos calculada considerando a área bruta (assumiu-se  $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ )

$b_s$  é a distância entre as almas =  $b_{p,f} + b_{p,l} = 140,9 \text{ mm}$

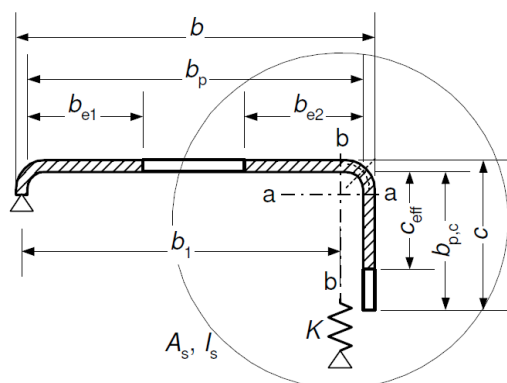
$$t = 5 \text{ mm}$$

$z$  é a distância do banzo relativamente ao eixo neutro =  $77,5 \text{ mm}$

$u = 2,15 \text{ mm} < 0,05h = 8 \text{ mm}$ , portanto o enrugamento dos banzos pode ser desprezada.

### Elementos reforçados. Reforços de bordo

### Encurvadura distorcional. Elementos planos com reforços de bordo



$$b/t \leq 60$$

Secção  
5.4.2

Secção  
5.4.3

EN 1993-1-3,  
cláusula 5.4  
Eq. 5.3a

secção 5.5.1  
e EN 1993-  
1-3, clausula  
5.5.3

| Exemplo de Dimensionamento 12  | Página 4 de 8  |
|--|--|
| <p><b>Passo 1:</b> Secção transversal efetiva inicial para o reforço</p> <p>Para banzos (como calculado antes)</p> $b = 125 \text{ mm e } b_p = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}$ <p>Para a aba, a largura efetiva <math>c_{\text{eff}}</math> deve ser calculada utilizando as expressões correspondentes para o fator de encurvadura <math>k_\sigma</math>, <math>\bar{\lambda}_p</math> e <math>\rho</math> da seguinte maneira:</p> $b_{p,c} = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}$ $b_{p,c}/b_p = 0,22 < 0,35 \quad \text{então} \quad k_\sigma = 0,5$ $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,36 \quad (\bar{b} = 25,3 \text{ mm})$ <p>Elementos externos enformados a frio: <math>\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = 1,33 &gt; 1 \quad \text{então} \quad \rho = 1,0</math></p> $c_{\text{eff}} = \rho b_{p,c} = 25,30 \text{ mm}$ <p><b>Passo 2:</b> Fator de redução para a encurvadura distorcional</p> <p>Cálculo das propriedades geométricas da secção efetiva de bordo reforçada</p> $b_{e2} = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}$ <p>Neste exemplo, uma vez que o banzo comprimido é de Classe 2, <math>b_{e2}</math> já considera o banzo inteiro e, portanto, é adotado <math>b_{e1} = 0</math>.</p> $c_{\text{eff}} = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}$ $A_s = (b_{e2} + c_{\text{eff}})t = (b_{b,f} + b_{b,l}) \times t = 704,5 \text{ mm}^2$ <p>Cálculo da rigidez linear de mola</p> $K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \left( \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} \right) = 6,4 \text{ N/mm}^2$ <p><math>b_1 = b - y_b - t/2 - r = 71,1 \text{ mm}</math> (a distância entre a ligação alma-banzo até ao centro de gravidade da área efetiva do reforço de borda, incluindo a parte efetiva do banzo <math>b_{e2}</math>).</p> <p><math>k_f = 0</math> (Banzo 2 em tração)</p> $h_w = h - 2t - 2r = 160 - 2 \times 5 - 2 \times 5 = 140 \text{ mm}$ <p>Tensão de flexão plástica crítica para a secção de reforço efetiva, adotando <math>K = K_1</math></p> $\sigma_{\text{cr,s}} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 565,8 \text{ N/mm}^2$ <p>Fator de redução <math>\chi_d</math> para a encurvadura distorcional</p> $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{\text{cr,s}}} = 0,90$ $0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \text{então} \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,82$ <p>Área reduzida e espessura para a secção de reforço efetiva, considerando <math>\sigma_{\text{com,Ed}} = f_{yb}/\gamma_{M0}</math></p> $A_{s,\text{red}} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{\text{com,Ed}}} = 576,4 \text{ mm}^2$ $t_{\text{red}} = t A_{s,\text{red}}/A_s = 4,1 \text{ mm}$ <p>Cálculo de propriedades efetivas da secção com o efeito da encurvadura distorcional</p> | <p>EN 1993-1-3, clausula 5.5.3.2</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.13b</p> <p>Eq. 5.3</p> <p>Eq. 5.2</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.13a</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.10b</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.15</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.12d</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.12b</p> <p>EN 1993-1-3, Eq. 5.17</p> |

$$A_{g,sh} = t [b_{p,f} + b_{p,w} + b_{p,l}] + t_{red} [b_{p,f} + b_{p,l}] = 2034,0 \text{ mm}^2$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 1993,3 \text{ mm}^2$$

O novo  $e_{eff}$ , adotando distâncias ao centroide da alma, positivas para baixo:

$$e_{eff} = \frac{-b_{p,f} t_{red} (0,5h - 0,5t_{red}) + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t) - b_{p,l} t_{red} (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l})}{A_{g,sh}} + \frac{b_{p,l} t (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l}) + b_{p,l} 0}{A_{g,sh}} = 4,7 \text{ mm}$$

$$I_{y,g,sh} =$$

$$\frac{1}{12} b_{p,f} t_{red}^3 + b_{p,f} t_{red} (0,5h - 0,5t_{red} + e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t_{red} + b_{p,l} t_{red} (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l} + e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t - e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t + b_{p,l} t (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l} - e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t + b_{p,w} t (e_{eff})^2 = 8,64 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,g} = I_{y,g,sh} (1 - 2\delta) = 8,297 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$z_{max} = h/2 + e_{eff} = 160/2 + 4,7 = 84,7 \text{ mm (distância da fibra superior ao eixo neutro)}$$

$$W_{y,g} = I_{y,g} / z_{max} = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

### Resistência da secção transversal

#### Secção transversal sujeita a um momento fletor

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} = 41,0 \text{ kNm}$$

Momento fletor  $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}$ , portanto, a resistência da secção transversal ao momento fletor satisfaz a condição de segurança.

#### Secção transversal sujeita ao corte

$$A_v = 800 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 193,15 \text{ kN}$$

Esforço de corte  $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN}$ , portanto, a resistência da secção transversal ao esforço de corte é OK

#### Secção transversal sujeita à combinação de esforços

$$V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} > 0,5 V_{pl,Rd} = 96,57 \text{ kN}$$

Portanto, não há necessidade de ter em consideração a interação entre o momento fletor e o esforço de corte.

Eq. 5.22

Eq. 5.19

Eq. 5.20

Secção 5.7

Secção 5.7.4

Eq. 5.29

Secção 5.7.5

Eq. 5.32

Secção 5.7.6

**Elementos em flexão****Encurvadura lateral**

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

$$\phi_{LT} = 0,5 (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

$\alpha_{LT} = 0,34$  para secções enformadas a frio

Determinação do momento crítico elástico para a encurvadura lateral

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left( \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right)$$

Para vigas simplesmente apoiadas com uma carga uniformemente distribuída:  $C_1 = 1,13$ , e  $C_2 = 0,454$

Assumindo condições normais de restrições nas extremidades:  $k = k_w = 1$

$z_a$  é a coordenada do ponto de aplicação da carga pontual

$z_s$  é a coordenada do centro de corte

$$z_g = z_a - z_s = h/2 = 80 \text{ mm}$$

$y_G$  = distância entre o eixo central da alma e o centro de gravidade

$$y_G = \frac{2b_{p,f}t(g_r + 0,5b_{p,f}) + 2b_{p,l}t(b - 0,5t)}{A_s} = 46,4 \text{ mm}$$

$$I_{z,sh} = 4,590 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{t,sh} = 18,02 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_{w,sh} = 23,19 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

$$I_z = I_{z,sh} (1 - 2\delta) = 4,406 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_t = I_{t,sh} (1 - 2\delta) = 17,30 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) = 21,33 \times 10^9 \text{ mm}^6$$

$$\text{Então, } M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left( \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right) = 34,76 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,g} f_y}{M_{cr}}} = 1,14 \quad (W_{y,g} = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3, \text{banzo comprimido})$$

$$\phi_{LT} = 0,5 (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2) = 1,27$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} = 0,54$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} = 22,21 \text{ kNm}$$

Secção 6.4

Secção  
6.4.2

Eq. 6.13

Eq. 6.14

Eq. 6.15

Eq. 6.16

Eq. E.1

Tabela E.2

Eq. E.1

Eq. 6.16

Eq. 6.15

Eq. 6.14

Eq. 6.13

Momento fletor  $M_{Ed} = 14,4$  kNm, portanto, a resistência à encurvadura lateral satisfaz a condição de segurança.

Nota: Como a carga não é aplicada através do centro de corte do elemento, também é necessário verificar a interação entre a resistência à torção da secção transversal e a resistência à encurvadura lateral do membro.

### Resistência à encurvadura por corte

A resistência à encurvadura por corte precisa de ser verificada quando  $h_w / t \geq 56,2\varepsilon/\eta$  para almas sem reforços.

Valor recomendado para  $\eta = 1,20$ .

$h_w / t = (h - 2t - 2r) / t = 140 / 5 = 28,0$ ,  $56,2\varepsilon/\eta = 32,67$ , portanto não é necessário realizar verificações adicionais.

### Deslocamentos máximos

Os deslocamentos máximos devem ser determinados para a combinação de cargas para o Estado Limite de Serviço, com:

Fator de carga  $\gamma_G = 1,00$  (cargas permanentes) e  $\gamma_Q = 1,00$  (cargas variáveis)

Ações permanentes ( $G$ ):  $2$  kN/m<sup>2</sup> e ações variáveis ( $Q$ ):  $3$  kN/m<sup>2</sup>

Combinação de cargas a ser considerada para o SLS, assumindo que a distância entre vigas adjacentes é de  $1,0$  m :

$$q = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 5,0 \text{ kN/m}$$

O deslocamento máximo das vigas elásticas pode ser estimado pela teoria estrutural, excetuando que o módulo secante de elasticidade deve ser utilizado em vez do módulo de elasticidade:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2}$$

Onde:

$E_{S1}$  é o módulo secante correspondente à tensão no banzo sujeito a tração e

$E_{S2}$  é o módulo secante correspondente à tensão no banzo sujeito a compressão

$E_{S1}$  e  $E_{S2}$  podem ser estimados por:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{e } i = 1,2$$

onde:

$\sigma_{i,Ed,ser}$  é a tensão de serviço no banzo sujeito à tração ou compressão

$n$  é o parametro de Ramberg Osgood; para aço inoxidável austenítico 1.4401,  $n = 7$ .

A relação não linear tensão-deformação do aço inoxidável significa que o módulo de elasticidade varia dentro da secção transversal e ao longo do comprimento de um elemento. Como simplificação, a variação de  $E_S$  ao longo do comprimento do elemento pode ser negligenciada e o valor mínimo de  $E_S$  para esse elemento (correspondente aos valores máximos das tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  no elemento) pode ser utilizado ao longo do seu comprimento.

Secção  
6.4.3

Eq. 6.20

Secção  
6.4.6

EN 1991

EN 1991

Eq. 6.52

Eq. 6.53

Tabela 6.4



|   |               |  |             |         |       |       |
|---|---------------|--|-------------|---------|-------|-------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b><br><br>FOLHA DE CÁLCULO | Página 1 de 9 |  |             |         |       |       |
|   | Título        | Exemplo de dimensionamento 13 – Treliza com secção transversal fechada |             |         |       |       |
|   | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel                                       | Feito por   | PTY/AAT | Data  | 01/06 |
|   |               |  | Revisto por | MAP     | Data  | 02/06 |
|   |               | Revisto por  | MIG         | Data    | 06/17 |       |

### EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 13 – TRELIÇA COM SECÇÃO TRANSVERSAL FECHADA

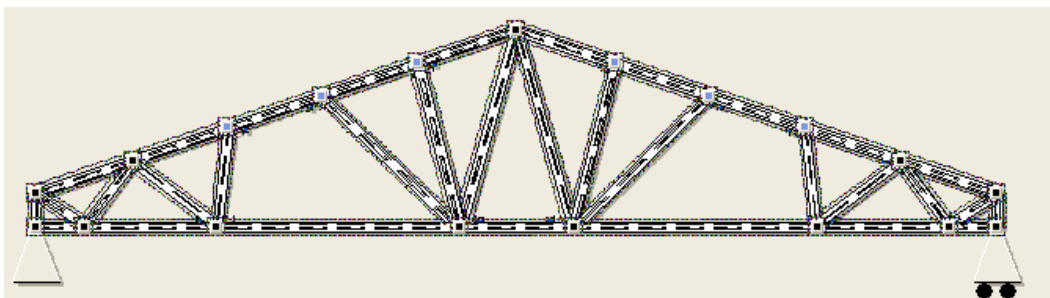
A treliza suporta uma cobertura envidraçada e é constituída por secções fechadas quadradas e retangulares em aço inox de classe 1.4301; é feita a comparação do material em dois tipos de condições – condições de recozimento ( $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$ ) e trabalhado a frio (condições de tratamento a frio CP500,  $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ ).

Os cálculos serão feitos para os estados limites últimos e à ação do fogo considerando um incêndio com a duração de 30 minutos. Para o material em condições de enformado a frio CP500, os fatores de redução das propriedades dos materiais a temperaturas elevadas devem ser determinados considerando a Secção 8.2.

A análise estrutural foi feita através do software de elementos finitos WINRAMI comercializado pela *Finnish Constructional Steelwork Association (FCSA)* ([www.terasrakennedyhdistys.fi](http://www.terasrakennedyhdistys.fi)). Este software permite a consideração de secções quadradas, retangulares e circulares fechadas para a análise estrutural de aço inoxidável. É capaz de determinar as forças aplicadas aos elementos, deslocamentos e resistência dos mesmos à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. Além disso, também é capaz de determinar a resistência de uma ligação à temperatura ambiente (também verifica todas as restrições geométricas de ligações de trelizas). Neste exemplo, as cordas são modeladas como vigas contínuas e as diagonais como rotuladas. De acordo com a EN 1993-1-1, o comprimento de encurvadura para as cordas e as diagonais deve ser 0,9 e 0,75 vezes a distancia entre nós, respetivamente. No entanto, neste exemplo a distancia entre nós foi utilizada como comprimento de encurvadura. As forças atuantes foram calculadas utilizando o WINRAMI com perfis baseados nas condições de recozimento. Estas forças foram utilizadas tanto no dimensionamento considerando a treliza com secções no estado recozido como considerando a treliza constituída por secções trabalhadas a frio (CP500).

Este exemplo é focado na verificação de 3 elementos: corda inferior principalmente sujeita a esforços axiais (elemento 0), diagonal à compressão axial (elemento 31) e corda superior sujeita a esforço axial de compressão e momento fletor (elemento 5). O peso das trelizas é também comparado.

As ligações soldadas são dimensionamento de acordo com a secção 7.4, que não está incluída neste exemplo.



**Recozido:** Corda inferior 100x60x4, Corda superior 80x80x5, canto vertical 60x60x5 diagonais da esquerda para o meio: 50x50x3, 50x50x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3.

**CP500:** Corda inferior 60x40x4, Corda superior 70x70x4, canto vertical 60x60x5, todas as diagonais 40x40x3.



Vão 15 m, altura a meio vão: 3,13 m, altura na extremidade: 0,5 m.  
Peso das treliças: recozida: 407 kg, CP500: 307 kg. O peso não foi totalmente otimizado.

### Ações

Assumindo que a ação da neve, envidraçados e suportes são igualmente distribuídos:

Ações permanentes ( $G$ ): Carga do envidraçado e apoios  $1 \text{ kN/m}^2$

Peso-próprio da treliça: (calculado por WINRAMI)

Ações variáveis ( $Q$ ): Neve  $2 \text{ kN/m}^2$

Caso de carga 1 (Estados limites últimos):  $\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$

Caso de carga 2 (situação de incêndio):  $\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \gamma_{\psi,1,1} Q_{k,1}$

Estados limites últimos (dimensionamento a temperatura ambiente)      Dimensionamento ao fogo

$\gamma_{G,j} = 1,35$  (efeitos desfavoráveis)

$\gamma_{GA,j} = 1,0$

$\gamma_{Q,1} = 1,5$

$\gamma_{\psi,1,1} = 0,2$

(Devem ser utilizados coeficientes parciais recomendados para as ações)

Ações tendo em conta os coeficientes parciais para o estado limite último:

Ação permanente: Carga nos nós:  $1,35 \times 4,1 \text{ kN}$

Peso-próprio da treliça: (é incluído pelo WINRAMI)

Ação variável: Carga da neve:  $1,5 \times 8,1 \text{ kN}$

### Forças nos elementos críticos são:

As forças são determinadas a partir de um modelo em que se utiliza os perfis em condições de recozimento.

#### Corda inferior, elemento 0

Recozido:  $100 \times 60 \times 4 \text{ mm}$ , CP500:  $60 \times 40 \times 4 \text{ mm}$

$N_{t,Ed} = 142,2 \text{ kN}$ ,

$N_{t,fi,Ed} = 46,9 \text{ kN}$

$M_{max,Ed} = 0,672 \text{ kNm}$ ,

$M_{max,fi,Ed} = 0,245 \text{ kNm}$

#### Corda superior, elemento 5

Recozido:  $80 \times 80 \times 5 \text{ mm}$ , CP500:  $70 \times 70 \times 4 \text{ mm}$

$N_{c,Ed} = -149,1 \text{ kN}$ ,

$N_{c,fi,Ed} = -49,2 \text{ kN}$

$M_{max,Ed} = 2,149 \text{ kNm}$ ,

$M_{max,fi,Ed} = 0,731 \text{ kNm}$

#### Diagonal, elemento 31

Recozido:  $50 \times 50 \times 3 \text{ mm}$ ,

CP500:  $40 \times 40 \times 3 \text{ mm}$

$N_{c,Ed} = -65,9 \text{ kN}$ ,

$N_{c,fi,Ed} = -21,7 \text{ kN}$

### Propriedades dos materiais

Utilizar material de classe 1.4301.

**Recozido:**  $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$        $f_u = 520 \text{ N/mm}^2$        $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

**CP500:**  $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$        $f_u = 650 \text{ N/mm}^2$        $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

Tabela 2.2

Tabela 2.3

### Coefficientes parciais de segurança

Os coeficientes parciais de segurança a serem utilizados no dimensionamento são:

$\gamma_{M0} = 1,1$ ,  $\gamma_{M1} = 1,1$ ,  $\gamma_{M,fi} = 1,0$

Tabela 4.1 e  
Secção 8.1

**Propriedades da secção transversal: Recozido**

|              |                         |   |                         |   |
|--------------|-------------------------|---|-------------------------|---|
| Elemento 0:  | $A = 1175 \text{ mm}^2$ |   |                         | $W_{pl,y} = 37,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$ |
| Elemento 5:  | $A = 1436 \text{ mm}^2$ | $I_y = 131,44 \times 10^4 \text{ mm}^4$ | $i_y = 30,3 \text{ mm}$ | $W_{pl,y} = 39,74 \times 10^3 \text{ mm}^3$ |
| Elemento 31: | $A = 541 \text{ mm}^2$  | $I_y = 19,47 \times 10^4 \text{ mm}^4$  | $i_y = 19 \text{ mm}$   | $W_{pl,y} = 9,39 \times 10^3 \text{ mm}^3$  |

**Propriedades da secção transversal: CP500**

|              |                         |  |                         |   |
|--------------|-------------------------|--|-------------------------|---|
| Elemento 0:  | $A = 695 \text{ mm}^2$  |  |                         | $W_{pl,y} = 13,16 \times 10^3 \text{ mm}^3$ |
| Elemento 5:  | $A = 1015 \text{ mm}^2$ | $I_y = 72,12 \times 10^4 \text{ mm}^4$ | $i_y = 26,7 \text{ mm}$ | $W_{pl,y} = 24,76 \times 10^3 \text{ mm}^3$ |
| Elemento 31: | $A = 421 \text{ mm}^2$  | $I_y = 9,32 \times 10^4 \text{ mm}^4$  | $i_y = 14,9 \text{ mm}$ | $W_{pl,y} = 5,72 \times 10^3 \text{ mm}^3$  |

**Classificação da secção transversal dos elementos 5 e 31**

Recozido :  $\varepsilon = 1,03$  CP500 :  $\varepsilon = 0,698$

Recozido 80x80x5 :  $c = 80 - 15 = 65 \text{ mm}$  CP500 70x70x4 :  $c = 70 - 12 = 58 \text{ mm}$

Recozido 50x50x3 :  $c = 50 - 9 = 41 \text{ mm}$  CP500 40x40x3 :  $c = 40 - 9 = 31 \text{ mm}$

Banzo/alma sujeitos a compressão:

Recozido 80x80x5 :  $c/t = 13$  CP500 70x70x4 :  $c/t = 14,5$

Recozido 50x50x3 :  $c/t = 13,7$  CP500 40x40x3 :  $c/t = 10,3$

Para Classe 1,  $\frac{c}{t} \leq 33,0\varepsilon$ , portanto ambos os perfis são Classe 1

**CORDA INFERIOR, DIMENSIONAMENTO À TEMPERATURA AMBIENTE E AO FOGO**

Tabela 5.2

**A) Dimensionamento à temperatura ambiente****Resistência à tração da secção transversal**

$$N_{pl,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$$

Recozido :  $N_{pl,Rd} = 1175 \times 210 / 1,1 = 224,3 \text{ kN} > 142,2 \text{ kN OK.}$

CP500 :  $N_{pl,Rd} = 695 \times 460 / 1,1 = 290,6 \text{ kN} > 142,2 \text{ kN OK.}$

Secção 5.7.2

Eq. 5.23

**Resistência à flexão da secção transversal**

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$$

Recozido :  $M_{c,Rd} = \frac{37,93 \times 10^3 \times 210}{1,1 \times 10^6} = 7,24 \text{ kNm} > 0,672 \text{ kNm OK.}$

CP500 :  $M_{c,Rd} = \frac{13,16 \times 10^3 \times 460}{1,1 \times 10^6} = 5,50 \text{ kNm} > 0,672 \text{ kNm OK.}$

Sec. 5.7.4

Eq. 5.29

**Interação entre tração e flexão**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

Recozido :  $\frac{142,2}{224,3} + \frac{0,672}{7,24} = 0,73 \leq 1 \quad \text{OK.}$

CP500 :  $\frac{142,2}{290,6} + \frac{0,672}{5,50} = 0,61 \leq 1 \quad \text{OK.}$

Eq. 6.55

**B) Dimensionamento ao de fogo**

$$\varepsilon_{res} = 0,4$$

Temperatura do aço para 100x60x4 depois de 30 min de fogo para  $A_m/V = 275 \text{ m}^{-1}$ :

$$\theta = 833 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura do aço para 60x40x4 depois de 30 min de fogo para  $A_m/V = 290 \text{ m}^{-1}$ :

$$\theta = 834 \text{ }^\circ\text{C}$$

Conservadoramente tome-se  $\theta = 834 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Recozido:

Os valores dos fatores de redução a  $834 \text{ }^\circ\text{C}$  são obtidos por interpolação linear:

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y = 0,292, \text{ mas } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u = 0,209$$

$$f_{2,\theta} = 0,292 \times 210 = 61,3 \text{ e } f_{u,\theta} = 0,209 \times 520 = 108,7, \text{ portanto } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

### CP500 :

Para material na condição de trabalhado a frio para  $\theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$k_{2,\theta,CF} = f_{2,\theta,CF}/f_y = 0,9k_{2,\theta} = 0,9f_{2,\theta}/f_y = 0,9 \times 0,292 = 0,263, \text{ mas } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0,209$$

$$f_{2,\theta,CF} = 0,263 \times 460 = 121,0 \text{ e } f_{u,\theta,CF} = 0,209 \times 650 = 135,9, \text{ portanto } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

### Resistência à tração da secção transversal

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}]$$

**Recozido :**  $N_{fi,\theta,Rd} = 0,292 \times 224,3 \times 1,1/1,0 = 72,0 \text{ kN} > 46,9 \text{ kN OK.}$

**CP500 :**  $N_{fi,\theta,Rd} = 0,263 \times 290,6 \times 1,1/1,0 = 84,1 \text{ kN} > 46,9 \text{ kN OK.}$

### Resistência à flexão da secção transversal

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}]$$

**Recozido :**  $M_{fi,\theta,Rd} = 0,292 \times 7,24 \times 1,1/1,0 = 2,33 \text{ kNm} > 0,245 \text{ kNm OK.}$

**CP500 :**  $M_{fi,\theta,Rd} = 0,263 \times 5,50 \times 1,1/1,0 = 1,59 \text{ kNm} > 0,245 \text{ kNm OK.}$

### Interação entre tração e flexão

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

**Recozido**  $\frac{46,9}{72,0} + \frac{0,245}{2,33} = 0,75 \leq 1 \text{ OK}$

**CP500 :**  $\frac{46,9}{84,1} + \frac{0,245}{1,59} = 0,71 \leq 1 \text{ OK.}$

### ELEMENTO DIAGONAL, DIMENSIONAMENTO À TEMPERATURA AMBIENTE E AO FOGO

(Elemento 31)

Comprimento de encurvadura = 1253 mm

#### A) Dimensionamento à temperatura ambiente

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$$

Eq. 6.2

**Recozido :**

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{19} \frac{1}{\pi} \sqrt{(210 / 200000)} = 0,680$$

Eq. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,680 - 0,3) + 0,680^2) = 0,824$$

Eq. 6.5  
Tabela 6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{0,824 + \sqrt{(0,824^2 - 0,680^2)}} = 0,776$$

Eq. 6.4

$$N_{b,Rd} = 0,776 \times 541 \times 210 / 1,1 = 80,1 \text{ kN} > 65,9 \text{ kN OK.}$$

**CP500 :**

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{14,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)} = 1,284$$

Eq. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,284 - 0,3) + 1,284^2) = 1,565$$

Eq. 6.5  
Tabela 6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{1,565 + \sqrt{(1,565^2 - 1,284^2)}} = 0,407$$

Eq. 6.4

$$N_{b,Rd} = 0,407 \times 421 \times 460 / 1,1 = 71,7 \text{ kN} > 65,9 \text{ kN OK.}$$

**B) Dimensionamento ao fogo**

$$\varepsilon_{res} = 0,4$$

Secção 8.4.4

Temperatura do aço para 80x80x5 depois de 30 min de fogo para  $A_m/V = 220 \text{ m}^{-1}$ :

$$\theta = 830 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura do aço para 70x70x5 depois de 30 min de fogo para  $A_m/V = 225 \text{ m}^{-1}$ :

$$\theta = 831 \text{ }^\circ\text{C}$$

Conservadoramente tome-se  $\theta = 831 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Recozido:**

Os valores dos fatores de redução a  $831 \text{ }^\circ\text{C}$  são obtidos por interpolação linear:

$$k_{p0,2,\theta} = 0,219 \text{ e } k_{E,\theta} = 0,574$$

Secção 8.2  
Tabela 8.1**Classificação da secção transversal :**

Secção 8.3.2

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 1,03 \times \left[ \frac{0,574}{0,219} \right]^{0,5} = 1,67$$

Eq. 8.6

Secções de Classe 1:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,67 = 55,1$

Classe 1,  $c/t = 13$ , portanto o perfil é classificado como Classe 1.

**CP500:**

Para material na condição de trabalhado a frio para  $\theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} = 0,8 \times 0,219 = 0,175$$

$$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta} = 0,574$$

Secção 8.2  
Tabela 8.1

**Classificação da secção transversal**

Secção 8.3.2

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 0,698 \times \left[ \frac{0,574}{0,175} \right]^{0,5} = 1,26$$

Eq. 8.6

Secções de Classe 1:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_{\theta} = 33,0 \times 1,26 = 41,6$

Classe 1,  $c/t = 14,5$ , portanto o perfil é classificado como Classe 1.

$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi}$  uma vez que ambos os perfis são de Classe 1.

Eq. 8.10

**Recozido:**

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0} / k_{E,\theta})} = 0,680 \times \sqrt{(0,219 / 0,574)} = 0,420$$

Eq. 8.14

$$\phi_{\theta} = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,420 - 0,3) + 0,420^2) = 0,618$$

Eq. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{(\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2)}} = \frac{1}{0,618 + \sqrt{(0,618^2 - 0,420^2)}} = 0,933$$

Eq. 8.12

$N_{b,fi,t,Rd} = 0,933 \times 541 \times 0,219 \times 210 / 1,0 = 23,2 \text{ kN} > 21,7 \text{ kN OK.}$

**CP500:**

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0,CF} / k_{E,0,CF})} = 1,284 \times \sqrt{(0,175 / 0,574)} = 0,709$$

Eq. 8.14

$$\phi_{\theta} = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,709 - 0,3) + 0,709^2) = 0,852$$

Eq. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{(\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2)}} = \frac{1}{0,852 + \sqrt{(0,852^2 - 0,709^2)}} = 0,755$$

Eq. 8.12

$N_{b,fi,t,Rd} = 0,755 \times 421 \times 0,175 \times 460 / 1,0 = 25,6 \text{ kN} > 21,7 \text{ kN OK.}$

**CORDA SUPERIOR, DIMENSIONAMENTO À TEMPERATURA AMBIENTE E DE FOGO**

(Elemento 5)

Comprimento de encurvadura = 1536 mm

**A) Dimensionamento à temperatura ambiente**

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0$$

Eq. 6.56

**Recozido:**

$\beta_{W,y} = 1,0$  Secção transversal de Classe 1

Sec. 6.5.2

$k_y = 1 + D_1(\bar{\lambda}_y - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$ , mas  $k_y \leq 1 + D_1(D_3 - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$

Eq. 6.63

Onde:  $D_1 = 2,0$ ,  $D_2 = 0,3$  e  $D_3 = 1,3$

Tabela 6.6

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1536}{30,3} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(210 / 200000)} = 0,523$$

Eq. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,523 - 0,3) + 0,523^2) = 0,691$$

Eq. 6.5

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{0,691 + \sqrt{(0,691^2 - 0,523^2)}} = 0,875$$

Eq. 6.4

$$N_{b,Rd,y} = 0,875 \times 1436 \times 210 / 1,1 = 239,9 \text{ kN} > 149,1 \text{ kN}$$

$$k_y = 1,0 + 2,0 \times (0,523 - 0,30) \times 149,1 / 239,9 = 1,277$$

$$k_y \leq 1,0 + 2,0 \times (1,3 - 0,30) \times 149,1 / 239,9 = 2,243, \text{ portanto, } k_y = 1,277$$

$$\frac{149,1}{239,9} + 1,277 \times \left( \frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1,1} \right) = 0,98 < 1,0 \text{ OK.}$$

Eq. 6.2

Tabela 6.6

Eq. 6.56

**CP500:**

$\beta_{w,y} = 1,0$  Secção transversal de Classe 1

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1536}{26,7} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)} = 0,878$$

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,878 - 0,3) + 0,878^2) = 1,027$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \bar{\lambda}^2)}} = \frac{1}{1,027 + \sqrt{(1,027^2 - 0,878^2)}} = 0,641$$

$$N_{b,Rd,y} = 0,641 \times 1015 \times 460 / 1,1 = 272,1 \text{ kN} > 149,1 \text{ kN}$$

$$k_y = 1,0 + 2 \times (0,878 - 0,30) \times 149,1 / 272,1 = 1,633$$

$$k_y \leq 1,0 + 2,0 \times (1,3 - 0,30) \times 149,1 / 272,1 = 2,096, \text{ portanto, } k_y = 1,633$$

$$\frac{149,1}{272,1} + 1,633 \times \left( \frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460 / 1,1} \right) = 0,89 < 1,0 \text{ OK.}$$

Sec. 6.5.2

Eq. 6.6

Eq. 6.5

Eq. 6.4

Eq. 6.2

Tabela 6.6

Eq. 6.56

**B) Dimensionamento ao fogo**

$$\epsilon_{res} = 0,4$$

Temperatura do aço para 50x50x3 depois de 30 min de fogo para  $A_m/V = 370 \text{ m}^{-1}$ :

$$\theta = 836 \text{ }^\circ\text{C}$$

Temperatura do aço para 40x40x3 depois de 30 min de fogo para  $A_m/V = 380 \text{ m}^{-1}$ :

$$\theta = 836 \text{ }^\circ\text{C}$$

Secção 8.4.4

**Recozido:**

Os valores dos fatores de redução a 836 ° C são obtidos por interpolação linear:  $k_{p0,2,\theta} = 0,214$

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y = 0,289, \text{ mas } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u = 0,207$$

$$f_{2,\theta} = 0,289 \times 210 = 60,7 \text{ e } f_{u,\theta} = 0,207 \times 520 = 107,6, \text{ portanto } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{E,\theta} = 0,565$$

Secção 8.2  
Tabela 8.1**Classificação da secção transversal**

$$\epsilon_\theta = \epsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 1,03 \times \left[ \frac{0,565}{0,214} \right]^{0,5} = 1,67$$

Secções de Classe 1:  $c/t \leq 33,0 \epsilon_\theta = 33,0 \times 1,67 = 55,1$

Classe 1,  $c/t = 13,7$ , portanto o perfil é classificado como Classe 1.

Secção 8.3.2

Eq. 8.6

**CP500:**

Para material na condição de trabalhado a frio para  $\theta \geq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8k_{p0,2,\theta} = 0,8 \times 0,214 = 0,171$$

$$k_{2,\theta,CF} = f_{2,\theta,CF}/f_y = 0,9k_{2,\theta} = 0,9f_{2,\theta}/f_y = 0,9 \times 0,289 = 0,260, \text{ mas } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0,207$$

$$f_{2,\theta,CF} = 0,260 \times 460 = 94,8 \text{ e } f_{u,\theta,CF} = 0,207 \times 650 = 134,6, \text{ portanto } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta} = 0,565$$

**Classificação da secção transversal**

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 0,698 \times \left[ \frac{0,565}{0,171} \right]^{0,5} = 1,27$$

Secções de classe 1:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,27 = 41,9$

Classe 1,  $c/t = 10,3 < 41,9$ , portanto o perfil é classificado como Classe 1.

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A_g k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq 1,0 \text{ uma vez que ambos os perfis são de Classe 1.}$$

**Recozido:**

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,\theta} / k_{E,\theta})} = 0,523 \times \sqrt{(0,214 / 0,565)} = 0,322$$

$$\phi_0 = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,322 - 0,3) + 0,322^2) = 0,557$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{(\phi_0^2 - \bar{\lambda}_\theta^2)}} = \frac{1}{0,557 + \sqrt{(0,557^2 - 0,322^2)}} = 0,989$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A_g k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 3$$

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44\beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

$$\chi_{\min,fi} A_g k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} = 0,989 \times 1436 \times 0,214 \times 210 / 1,0 = 63,8 \text{ kN} > 49,2 \text{ kN OK.}$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} = 0,289 \times 1,1 / 1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1000^2 = 2,65 \text{ kNm}$$

> 0,731 kNm OK.

$$\psi = -0,487 / 0,731 = -0,666$$

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7\psi = 2,266$$

$$\mu_y = (1,2 \times 2,266 - 3) \times 0,322 + 0,44 \times 2,266 - 0,29 = 0,617 < 0,8$$

$$k_y = 1 - 0,617 \times 49,2 \text{ kN} / 63,8 \text{ kN} = 0,524 < 3$$

$$\frac{49,2}{63,8} + 0,524 \times \frac{0,731}{2,65} = 0,92 < 1,0 \quad \text{OK.}$$

**CP500:**

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,\theta} / k_{E,\theta})} = 0,878 \times \sqrt{(0,171 / 0,565)} = 0,483$$

$$\phi_0 = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,483 - 0,3) + 0,483^2) = 0,661$$

Secção 8.2  
Tabela 8.1

Secção 8.3.2

Eq. 8.6

Eq. 8.26

Eq. 8.14

Eq. 8.13

Eq. 8.12

Eq. 8.30

Eq. 8.31

Eq. 8.26

Eq. 8.15

Tabela 8.3

Eq. 8.14

Eq. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{(\phi_0^2 - \lambda_0^2)}} = \frac{1}{0,661 + \sqrt{(0,661^2 - 0,483^2)}} = 0,899$$

Eq. 8.12

$$\chi_{\min,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi} = 0,899 \times 1015 \times 0,171 \times 460 / 1,0 = 71,8 \text{ kN} > 49,2 \text{ kN OK.}$$

Eq. 8.26

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} = 0,260 \times 1,1 / 1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460 / 1000^2 = 3,26 \text{ kNm} > 0,731 \text{ kNm OK.}$$

Eq. 8.15

$$\psi = -0,487 / 0,731 = -0,666$$

Tabela 8.3

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7\psi = 2,266$$

$$\mu_y = (1,2 \times 2,266 - 3) \times 0,483 + 0,44 \times 2,266 - 0,29 = 0,571 \leq 0,8$$

$$k_y = 1 - 0,571 \times 49,2 / 71,8 = 0,609$$

$$\frac{49,2}{71,8} + 0,609 \times \frac{0,731}{3,26} = 0,82 < 1,0 \quad \text{OK.}$$





|   |               |  |                |            |
|---|---------------|--|----------------|------------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b> | Página 1 de 3 |  |                |            |
|   | Título        | Exemplo de dimensionamento 14 – Aumento da tensão média de cedência para secções enformadas a frio |                |            |
|   | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel   | Feito por SA   | Data 05/17 |
|   |               |  | Revisto por FW | Data 05/17 |
| Revisto por LG  |               |  | Data 05/17     |            |
| <b>FOLHA DE CÁLCULO</b>   |               |  |                |            |

|  |   |
|--|---|
| <p><b>EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 14 – AUMENTO DA TENSÃO MÉDIA DE CEDÊNCIA PARA SECÇÕES ENFORMADAS A FRIO</b></p> <p>Este exemplo ilustra a determinação do aumento da tensão de cedência <math>f_{ya}</math> para uma secção quadrada aberta (SHS) enformada a frio de acordo com o Anexo B. Para os cálculos, considerou-se uma secção SHS 80×80×4 em aço inox austeníticos de classe 1.4301. Será comparada a resistência da secção à flexão considerando o valor mínimo especificado para a tensão de cedência <math>f_y</math> e considerando o aumento médio da tensão de cedência <math>f_{ya}</math>.</p> <p><b>Aumento da tensão média de cedência</b></p> <p>Para secções em caixão (RHS e SHS) enformadas a frio, o aumento médio da tensão de cedência <math>f_{ya}</math> é:</p> $f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$ <p><b>Propriedades da secção transversal</b></p> <p>Propriedades geométricas da secção SHS 80×80×4 (propriedades medidas a partir de uma secção testada experimentalmente):</p> <p><math>h = 79,9 \text{ mm}</math>      <math>b = 79,6 \text{ mm}</math><br/> <math>t = 3,75 \text{ mm}</math>      <math>A = 1099 \text{ mm}^2</math><br/> <math>W_{el} = 25967 \text{ mm}^3</math>    <math>W_{pl} = 30860 \text{ mm}^3</math><br/> <math>r_i = 4,40 \text{ mm}</math> (Note que <math>r_i</math> pode ser considerada igual a <math>2t</math> caso o valor seja desconhecido)</p> $A_{c,rolled} = \left( n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) + 4n_c t^2$ $A_{c,rolled} = \left( 4 \times \pi \times \frac{3,75}{4} \right) \times (2 \times 4,40 + 3,75) + 4 \times 4 \times 3,75^2 = 373 \text{ mm}^2$ <p><b>Propriedades dos materiais</b></p> <p><math>f_y = 230 \text{ N/mm}^2</math> e <math>f_u = 540 \text{ N/mm}^2</math> (para chapa enformada a frio com <math>t \leq 8 \text{ mm}</math>)<br/> <math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math><br/> <math>\epsilon_{p0,2} = 0,002 + f_y/E = 0,00315</math><br/> <math>\epsilon_u = 1 - f_y/f_u = 0,57</math></p> | <p>Eq. B.2</p> <p>Anexo B</p> <p>Eq. B.14</p> <p>Tabela 2.2<br/>Secção 2.3.1</p> <p>Eq. B.10</p> <p>Eq. C.6</p> |
|--|---|

**Aumento da tensão de cedência nos cantos e faces planas**

Previsão do aumento da tensão de cedência para as zonas dos cantos  $f_{yc}$ :

$$f_{yc} = 0,85K (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{e} \quad f_y \leq f_{yc} \leq f_u$$

Eq. B.4

Previsão do aumento da tensão de cedência para as faces planas  $f_{yf}$ :

$$f_{yf} = 0,85K (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{and} \quad f_y \leq f_{yf} \leq f_u$$

Eq. B.5

**Extensões induzidas nos cantos e faces planas enformadas a frio**

Extensão induzida nas regiões dos cantos  $\varepsilon_c$ :

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_1 + t)}$$

Eq. B.7

$$\varepsilon_c = \frac{3,75}{2 \times (2 \times 4,40 + 3,75)} = 0,149$$

Extensão induzida nas faces planas  $\varepsilon_f$ :

$$\varepsilon_f = \left[ \frac{t}{900} \right] + \left[ \frac{\pi t}{2(b + h - 2t)} \right]$$

Eq. B.8

$$\varepsilon_f = \left[ \frac{3,75}{900} \right] + \left[ \frac{\pi \times 3,75}{2 \times (79,6 + 79,9 - 2 \times 3,75)} \right] = 0,043$$

**Modelo do comportamento do material: parâmetros**

$$n_p = \frac{\ln(f_y/f_u)}{\ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)}$$

Eq. B.12

$$n_p = \frac{\ln(230/540)}{\ln(0,00315/0,57)} = 0,164$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}}$$

Eq. B.11

$$K = \frac{230}{(0,00315)^{0,164}} = 591,6 \text{ N/mm}^2$$

**Tensão de cedência das regiões dos cantos e das faces da secção**

Aumento da tensão de cedência prevista para a região dos cantos  $f_{yc}$ :

Eq. B.4

$$\begin{aligned} f_{yc} &= 0,85 \times 591,6 \times (0,149 + 0,00315)^{0,164} \\ &= 369 \text{ N/mm}^2 \text{ e } 230 \leq 369 \leq 540 \end{aligned}$$

Aumento da tensão de cedência prevista para as faces da secção  $f_{yf}$ :

Eq. B.5

$$\begin{aligned} f_{yf} &= 0,85 \times 591,6 \times (0,043 + 0,00315)^{0,164} \\ &= 304 \text{ N/mm}^2 \text{ e } 230 \leq 304 \leq 540 \end{aligned}$$

**Aumento médio da tensão de cedência**

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$$

$$= \frac{369 \times 373 + 304 \times (1099 - 373)}{1099} = 326 \text{ N/mm}^2$$

Eq. B.2

**Classificação da secção transversal**Classificação de secção transversal com base na tensão de cedência mínima especificada  $f_y$ :

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{230} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,986$$

Tabela 5.2

$$\frac{c}{t} = \frac{(79,9 - 3 \times 3,75)}{3,75} = 18,3 < 32,5 = 33\varepsilon$$

Portanto, a secção transversal é de Classe 1.

Classificação de secção transversal com base na tensão de cedência média  $f_y$ :

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{326} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,829$$

Tabela 5.2

$$\frac{c}{t} = \frac{(79,9 - 3 \times 3,75)}{3,75} = 18,3 < 27,4 = 33\varepsilon$$

Portanto, a secção transversal é de Classe 1.

**Resistência da secção transversal à flexão**

Para secções de Classe 1 e 2:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$$

Eq. 5.29

Resistência com base na tensão de cedência mínima especificada  $f_y$ :

$$M_{c,Rd} = \frac{30860 \times 230}{1,1} = 6,45 \text{ kNm}$$

Resistência com base na tensão de cedência média  $f_{ya}$ :

$$M_{c,Rd} = \frac{30860 \times 326}{1,1} = 9,15 \text{ kNm}$$

O aumento da resistência por encruamento durante a enformação da secção resulta num aumento de 42% na resistência à flexão.

Nota: O Exemplo 15 ilustra o aumento da resistência à flexão devido à influência benéfica do encruamento durante o tempo de serviço utilizando o Método de Resistência Contínua, conforme descrito no Anexo D.



|   |               |  |                |            |
|---|---------------|--|----------------|------------|
| <b>Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels (PUREST)</b> | Página 1 de 2 |  |                |            |
|   | Título        | Exemplo de dimensionamento 15 – Utilização do método da resistência contínua (CSM) no dimensionamento à flexão |                |            |
|   | Cliente       | Research Fund for Coal and Steel   | Feito por SA   | Data 05/17 |
|   |               |  | Revisto por FW | Data 05/17 |
|   |               | Revisto por LG   | Data 05/17     |            |
| <b>FOLHA DE CÁLCULO</b>   |               |  |                |            |

|   |  |
|---|--|
| <p><b>EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO 15 – UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA RESISTÊNCIA CONTÍNUA (CSM) NO DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO</b></p> <p>Determinação do valor de cálculo da resistência à flexão no plano de uma viga com secção transversal enformada a frio SHS 80×80×4 em aço inox austenítico de classe 1.4301, de acordo com o método da resistência contínua (CSM) apresentado no Anexo D.</p> <p><b>Propriedades da secção transversal</b></p> <p>As propriedades são as dadas no Exemplo de dimensionamento 14.</p> <p><b>Propriedades dos materiais</b></p> <p><math>f_y = 326 \text{ N/mm}^2</math> * e <math>f_u = 540 \text{ N/mm}^2</math></p> <p><math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math> e <math>\nu = 0,3</math></p> <p><math>\epsilon_y = f_y/E = 0,0016</math></p> <p><math>\epsilon_u = 1 - f_y/f_u = 0,40</math></p> <p>* De maneira a ilustrar a o aumento da resistência à flexão utilizando o método da resistência contínua, adicionalmente à resistência obtida por consideração do aumento da tensão de cedência média devido ao tratamento a frio, a tensão de cedência é tida como a tensão obtida no exemplo de dimensionamento 14. A tensão de cedência também pode ser considerada como o valor mínimo especificado.</p> <p><b>Esbelteza da secção transversal</b></p> $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}}$ $f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} = \frac{4 \times \pi^2 \times 200000 \times 3,75^2}{12 \times (1 - 0,3^2) \times (79,7 - 2(3,75 + 4,40))^2} = 2530 \text{ N/mm}^2$ $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{326}{2530}} = 0,36 (< 0,68)$ <p><b>Capacidade de deformação transversal</b></p> $\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \epsilon_u}{\epsilon_y}\right) \text{ para } \bar{\lambda}_p \leq 0,68$ | <p>Tabela 2.2</p> <p>Secção 2.3.1</p> <p>Eq. C.6</p> <p>D.3.2</p> <p>Eq. D.4 e Tabela 5.3</p> <p>Eq. D.2</p> |
|---|--|

Da tabela D.1,  $C_1 = 0.1$  para aço inoxidável austenítico.

$$\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{0,36^{3,6}} = 9,9 \leq \min\left(15, \frac{0,1 \times 0,40}{0,0016} = 25\right)$$

$$\therefore \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = 9,9$$

### Declive de endurecimento por deformação

Da tabela D.1,  $C_2 = 0,16$  para aço inoxidável austenítico.

$$E_{\text{sh}} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} = \frac{540 - 326}{0,16 \times 0,40 - 0,0016} = 3429 \text{ N/mm}^2$$

### Resistência da secção transversal à flexão no plano

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{W_{\text{pl}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \left[ 1 + \frac{E_{\text{sh}} W_{\text{el}}}{E W_{\text{pl}}} \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}}} \right) / \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \right)^\alpha \right]$$

$\alpha = 2,0$  para RHS

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{30860 \times 326}{1,1} \times \left[ 1 + \frac{3429}{200000} \times \frac{25967}{30860} \times (9,9 - 1) - \left( 1 - \frac{25967}{30860} \right) / (9,9)^{2,0} \right]$$

$$M_{\text{c,Rd}} = 10,31 \text{ kNm}$$

A resistência à flexão determinada de acordo com a Secção 5 é de 6,45 kNm. Considerando o endurecimento por deformação de forma a que ocorra um aumento da tensão de cedência (Exemplo 14) resultou num aumento da resistência de 9,15 kNm. Considerando adicionalmente o endurecimento por deformação em serviço utilizando o CSM para o dimensionamento da secção transversal, é conseguida uma resistência à flexão de 10,31 kNm. Isso corresponde a um aumento geral de resistência de 60%.

Tabela D.1

Tabela D.1

Eq. D.1

Eq. D.9

Tabela D.2



# manual de DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS EM AÇO INOXIDÁVEL

## Versão portuguesa da 4ª edição

Este documento corresponde à tradução para português da 4ª edição do Design Manual for Structural Stainless Steel e é resultado do projeto RFCS Purest. Este Manual apresenta as regras de dimensionamento para os aços inoxidáveis austeníticos, duplex e ferríticos tipicamente utilizados em aplicações estruturais. As regras de dimensionamento estão formuladas em termos de estado limite último e em geral estão de acordo com as partes relevantes do Eurocódigos 3 - Projeto de estruturas de aço. A informação inclui: as propriedades do aço inoxidável, a durabilidade e seleção dos materiais, as bases para dimensionamento, a resistência de secções transversais, o cálculo de elementos e ligações, a resistência ao fogo, a fadiga, o dimensionamento por ensaios e aspetos de fabricação. São também apresentados 15 exemplos de dimensionamento que ilustram as respetivas regras de cálculo.

Em simultâneo, está disponível na AppStore e em GooglePlay uma aplicação: EC3 Stainless Steel Calculator, para iOS e Android, respetivamente, que permite de forma expedita o dimensionamento de elementos estruturais em aço inoxidável.



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

