

Apresentação de apoio para Arquitetura e Engenharia Civil

Capítulo 07

Parte A:

Aplicações estruturais de aço inoxidável barra corrugada

Veja também: stainlesssteelrebar.org

Uma escolha errada de materiais
pode resultar em grandes problemas





Um estudo de caso: Corrosão do nó rodoviário de Turcot em Montreal^{1,2}

- Uma ligação importante entre as rodovias Decarie (Norte-Sul) e Ville Marie (Leste-Oeste), construídas em 1966.
- Mais de 300.000 veículos por dia
- Feito de concreto armado, hoje corroído pelos sais de degelo

Terá que ser substituído

- Apesar da constante supervisão e reparos, foi necessário substituí-lo,
 - Custo 2.000 M€.
 - Além disso, o 165 M€ teve que ser gasto para garantir a segurança até sua substituição em 2018
 - A vida útil da estrutura foi de apenas 50 anos!

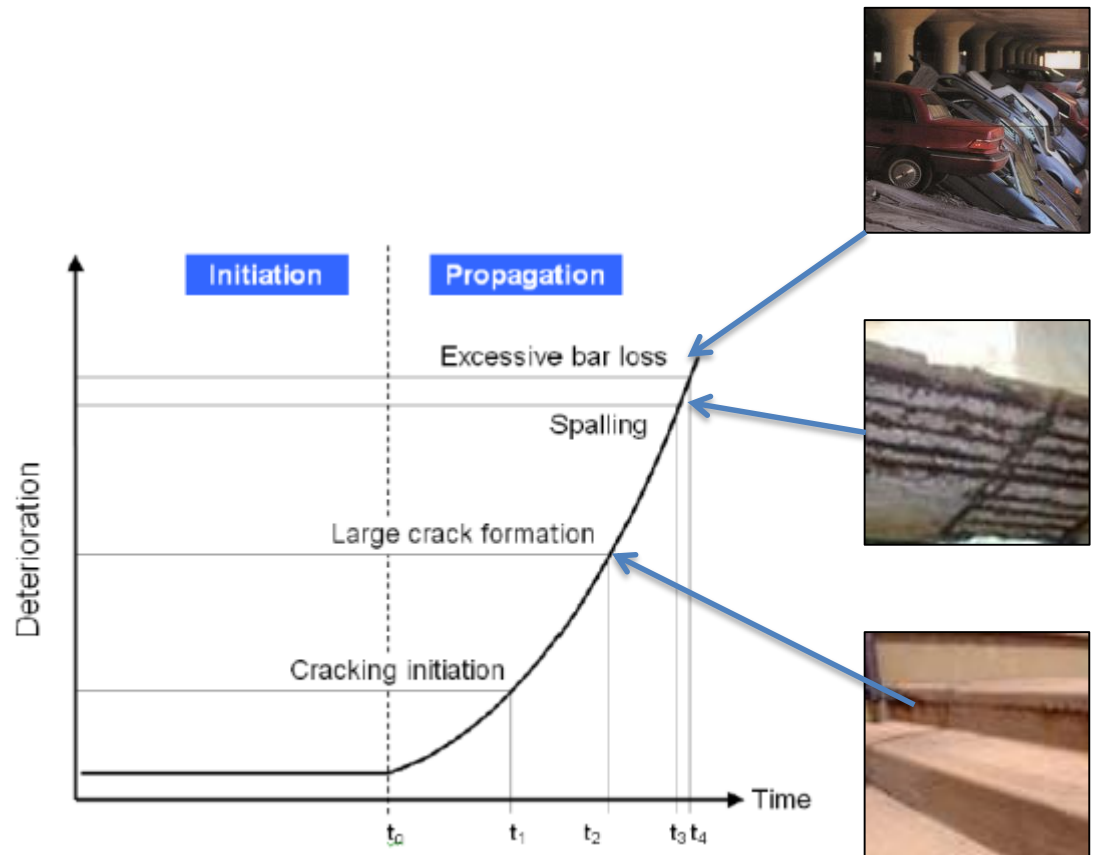


Como o concreto armado pode
ser danificado pela corrosão

Difusão de íons corrosivos (geralmente cloretos) no concreto :

Passos³:

1. Uma vez que os íons atingem o vergalhão de aço carbono (t_0), a corrosão começa
2. Os produtos da corrosão, que ocupam um volume maior que o aço, exercem uma pressão externa
3. As fissuras no concreto (t_1), abrem acesso fácil aos cloretos
4. Reboco do concreto racha (lasca) (t_3), expondo o vergalhão
5. Se desacompanhado, a corrosão continua até que o vergalhão cede às tensões aplicadas e a estrutura colapsa (t_4)



Rachaduras no concreto aceleram a corrosão

O concreto geralmente
exibe fissuras, e por isso
os íons chegam
rapidamente ao aço.

Aqui estão algumas
causas da formação de
fissuras (ref. 4).

Observe que as fissuras
não ocorrem
imediatamente e
também ocorrem em
áreas ocultas, onde não
podem ser reparadas.

Tipo de rachadura	Forma da rachadura	Causa primária	Hora da Aparição
Assentamento de plástico	Acima e alinhado com reforço de aço	Subsidência em volta do vergalhão; excesso de água na mistura	10 minutos a três horas
Encolhimento de plástico	Diagonal ou aleatório	Evaporação inicial excessiva	30 minutos a seis horas
Expansão térmica e contração	Transversal (exemplo: através do pavimento)	Excesso de geração de calor ou gradientes de temperatura	Um dia a duas ou três semanas
Contração por secagem	Transversal ou padrão	Água em excesso na mistura; má colocação articular; articulações espaçadas	Semanas a meses
Congelamento e descongelamento	Paralelo à superfície do concreto	Ingestão inadequada de ar; agregado grosso não durável	Depois de um ou mais invernos
Corrosão de reforço	Acima do reforço	Cobertura de concreto inadequada; entrada de umidade ou cloreto	Mais de dois anos
Reação alcalino-agregada	Fissuras padrão; rachaduras paralelas às juntas ou arestas	Agregado reativo mais umidade	Normalmente, durante cinco anos, mas pode ser mais cedo com agregado altamente reativo
Ataque de sulfato	Fissuras padrão	Sulfatos externos ou internos que promovem a formação de etringita	Um a cinco anos

A escolha adequada dos materiais é
um bom investimento a longo prazo

O cais de Progreso(1/3)^{5,6}



Em Progreso, no México, um píer foi construído em 1970.

O ambiente marinho fez o vergalhão de aço-carbono corroer - a estrutura falhou.

O cais de Progreso(2/3)



O píer vizinho foi erguido em 1937-1941 usando reforço de aço inoxidável.

O cais de Progreso (3/3)



Desde então, tem sido livre de manutenção e permaneceu em bom estado.

As principais estruturas de
engenharia civil devem durar mais
de 100 anos

Ponte Haynes Inlet Slough, Oregon, EUA 2004^{7,8}

Uma ponte rara com arcos com 400 toneladas de barra corrugada de aço inoxidável em seu tabuleiro.

Esta ponte de 230 metros de comprimento sobre o Haynes Inlet Slough foi projetada para uma vida útil de 120 anos sem manutenção.

Embora o aço inoxidável custe muito mais do que a média do aço carbono, o custo do ciclo de vida da ponte será bastante reduzido.





**Ponte Hong Kong- Zhuhai- Macau ⁹
(construção começou em 2009, para ser concluída entre
2017-2018)**

O prestigiado projeto da ponte Hong Kong-Zhuhai-Macau é um dos maiores do mundo. O tempo de vida útil requerido é de 120 anos sem manutenção. Portanto, vergalhão de aço inoxidável foi especificado nas áreas críticas da estrutura, principalmente em zonas de respingo. Eventualmente 15000MT de inoxidável será usado.



Ponte Broadmeadow, Dublin, Irlanda (2003)¹⁰

Uma nova construção construída sobre o estuário usando 105 toneladas de vergalhão de aço inoxidável nas colunas e parapeitos.



Vista aérea

Rachaduras no convés e parede necessitam reparos



Reparação de barragens Bayonne, França

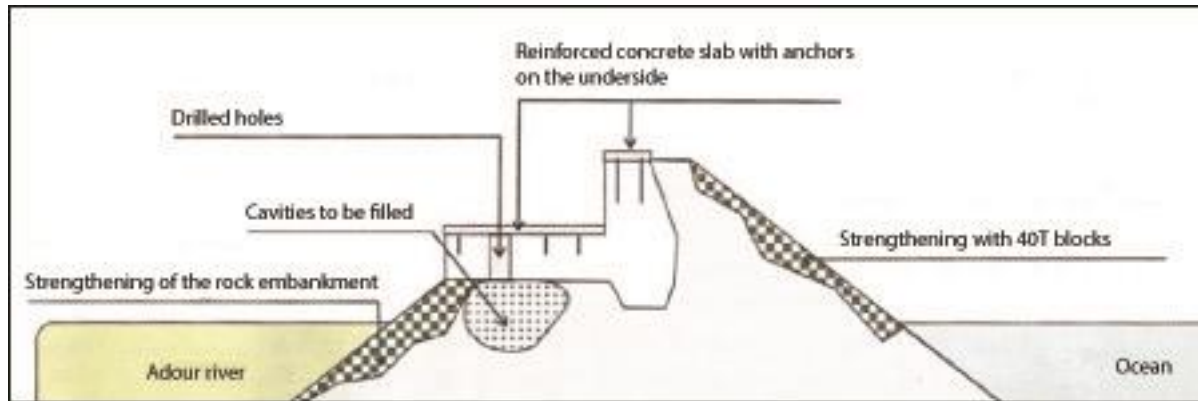
Barragem construída na década de 1960 para proteger a entrada do porto

O lado oceânico é mais alto e protegido por blocos de 40t que devem ser substituídos à medida que as tempestades os desgastam

No lado do rio, uma plataforma de 7m de largura permite que os guindastes pesados levantem os blocos



Seção através do dique quebra mar



Reparo do quebra mar Bayonne, França

A plataforma e o dique foram reforçadas com aço inoxidável duplex lean (EN 1.4362)¹¹

Reparação do quebra mar

Início de 2014, ventania sobre o dique





Ponte Stonecutters, Hong Kong^{12,13}

A segunda maior ponte estaiada do mundo, com uma extensão principal de 1.018m

As torres são de 298m de altura com 1.600 toneladas de aço inoxidável estrutural na zona de ancoragem do cabo e 2800 toneladas de vergalhões inoxidáveis na parte inferior do concreto armado das torres.



Ponte Belt Parkway, Brooklyn, EUA (2004)¹⁴

Para garantir a durabilidade e a resistência a longo prazo (100 anos) ao ataque corrosivo do ambiente marinho e do sal da estrada, a ponte e os parapeitos foram reforçados com vergalhão de aço inoxidável tipo AISI/ASTM 2205 - UNS S31803/S32205 - DIN/EN 1,4462 - F51..

Quando vergalhões de aço inoxidável devem ser considerados ¹⁵⁻²⁰:

- Em ambientes corrosivos :
- Água do mar e ainda mais em climas quentes
 - Pontes
 - Cais
 - Docas
 - Âncoras para postes de iluminação, trilhos,....
 - Quebra mar
 -
- Sais de degelo
 - Pontes
 - Passagens de trânsito e ligações
 - Estacionamentos
- Tanques de tratamento de águas residuais
- Usinas de dessalinização
- Em estruturas com uma vida muito longa
 - Reparos de estruturas históricas
 - Armazenamento de lixo nuclear
- Em ambientes desconhecidos em que
 - inspeção é impossível,
 - Reparos são quase impossíveis ou muito caros

Comparação de vergalhões inoxidáveis com soluções alternativas¹⁵⁻²⁰

	Vantagens	Desvantagens
Revestimento de epóxi	Custos iniciais mais baixos	▪ não pode ser dobrado sem romper ▪ Requer manuseio cuidadoso para evitar danificá-lo durante a instalação
Galvanização	Custos iniciais mais baixos	▪ não pode ser dobrado sem romper ▪ Perde sua efetividade quando o revestimento de zinco for corroído
Polímeros reforçados com fibras	Custos iniciais mais baixos	▪ não pode ser dobrado sem romper ▪ Sem resistência ao calor e baixa resistência ao impacto em invernos rigorosos ▪ Rigidez menor que a do aço ▪ Não pode ser reciclado
Aço inoxidável	Custo baixo do ciclo de vida: • Design semelhante ao aço comum • Reforços mistos de aço-carbono / aço inoxidável funcionam bem • Fácil instalação, insensível ao mau acabamento • Sem manutenção • Sem limite de vida • Permite uma cobertura de concreto mais fina • Melhor resistência ao fogo • 100% reciclado em sua totalidade	▪ Custo inicial mais alto, mas não mais do que alguns % quando ✓ Inoxidável é selecionado para as áreas críticas ✓ As classes Lean duplex são selecionadas

Comparação de vergalhões inoxidáveis com soluções alternativas¹⁵⁻²⁰

	Vantagens	Desvantagens
Proteção catódica	Custos iniciais mais baixos? Usado frequentemente para reparos	▪ Requer um projeto cuidadoso para proteção geral ▪ Requer uma instalação cuidadosa para manter os contatos elétricos adequados ▪ Requer uma fonte permanente de corrente (que deve ser monitorada e mantida) ou ânodos de sacrifício que requerem monitoramento e substituição
Membranas / Selantes	Custos iniciais mais baixos?	▪ Requer cuidadosa instalação para evitar bolhas ▪ Não pode ser instalado em qualquer clima ▪ Desempenho ao longo do tempo discutível ▪ Limitado a superfícies horizontais

Referências

1. <http://www.lapresse.ca/actualites/montreal/201111/25/01-4471833-echangeur-turcot-254-millions-pour-lentreten-avant-la-demolition.php>
2. <http://www.ledevoir.com/politique/quebec/336978/echangeur-turcot-quebec-confirme-le-mauvais-etat-des-structures>
3. [https://www.worldstainless.org/Files/issf/Education references/Ref07 The use of predictive models in specifying selective use of stainless steel reinforcement.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/Education%20references/Ref07%20The%20use%20of%20predictive%20models%20in%20specifying%20selective%20use%20of%20stainless%20steel%20reinforcement.pdf)
4. <https://www.holcim.com.au/products-and-services/tools-faqs-and-resources/do-it-yourself-diy/cracks-in-concrete> visual inspection of concrete
5. <https://www.nickelinstitute.org/policy/nickel-life-cycle-management/life-cycle-assessments/> (Progreso Pier)
6. [https://www.worldstainless.org/Files/issf/Education references/Ref08 Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/Education%20references/Ref08%20Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf)
7. <https://www.roadsbridges.com/willing-bend-0> (Oregon)
8. <http://structurae.net/structures/data/index.cfm?id=s0011506> (Oregon)
9. <http://www.aeonline.ae/major-hong-kong-stainless-steel-rebar-contract-signed-by-arminox-middle-east-42317/news.html> (HK Macau)
10. <http://www.engineersireland.ie/EngineersIreland/media/SiteMedia/groups/Divisions/civil/Broadmeadow-Estuary-Bridge-Integration-of-Design-and-Construction.pdf?ext=.pdf> (Broadmeadow)
11. Courtesy Ugitech SA
12. [http://www.arup.com/Projects/Stonecutters Bridge.aspx](http://www.arup.com/Projects/Stonecutters_Bridge.aspx) (stonecutters'bridge)
13. [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Stonecutters Bridge Towers.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Stonecutters_Bridge_Towers.pdf) (stonecutters'bridge)
14. [http://www.cif.org/noms/2008/24 - Ocean Parkway Belt Bridge.pdf](http://www.cif.org/noms/2008/24_Ocean_Parkway_Belt_Bridge.pdf) (belt parkway bridge)
15. Béton Armé d'inox: Le Choix de la durée (in French) <https://www.infociments.fr/ponts-et-passerelles/les-armatures-inox-la-solution-pour-des-ouvrages-durables>
16. Armaduras de Acero Inoxidable (in Spanish) <http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/59armadurasaceroinoxidable.pdf>
17. www.ukcares.com/downloads/guides/PART7.pdf
18. [https://www.worldstainless.org/Files/issf/Education references/Ref19 Case study of progreso pier.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/Education%20references/Ref19%20Case%20study%20of%20progreso%20pier.pdf)
19. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Publikasjoner/Prrapp%20405.pdf> (general)
20. [http://americanarminox.com/Purdue University Report - Stainless Steel Life Cycle Costing.pdf](http://americanarminox.com/Purdue%20University%20Report%20-%20Stainless%20Steel%20Life%20Cycle%20Costing.pdf) (advantages of using ss rebar)
21. <http://www.stainlesssteelrebar.org>

Referências sobre União Galvânica

1. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore, M. P. Pedferri and P. Pedferri, "Effects of Galvanic Coupling between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcement in Concrete", International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998, Orlando, Florida.
2. A. Knudsen, EM. Jensen, O. Klinghoffer and T. Skovsgaard, "Cost-Effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent use of Stainless Steel Reinforcement", International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998, Orlando, Florida.
3. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore and M. P. Pedferri, "Effect of Chemical Composition on Corrosion Behaviour of Stainless Steel in Chloride Contamination and Carbonated Concrete", Properties and Performances, Proceedings of 3rd European Congress Stainless Steel '99, 1999, Vol .3, Chia Laguna, AIM
4. O. Klinghoffer, T. Frolund, B. Kofoed, A. Knudsen, EM. Jensen and T. Skovsgaard, "Practical and Economic Aspects of Application of Austenitic Stainless Steel, AISI 316, as Reinforcement in Concrete", Corrosion of Reinforcement in Concrete: Corrosion Mechanisms and Corrosion Protection, 2000, Mietz, J., Polder, R. and Elsener, B., Eds, London
5. Knudsen and T. Skovsgaard, "Stainless Steel Reinforcement", Concrete Engineering, 2001, Vol. 5 (3), p. 59.
6. L. Bertolini and P. Pedferri, "Laboratory and Field Experience on the Use of Stainless Steel to Improve Durability of Reinforced Concrete", Corrosion Review, 2002, Vol. 20, p. 129
7. [S. Qian](#), [D. Qu](#) & [G. Coates](#) Galvanic Coupling Between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcements [Canadian Metallurgical Quarterly](#) Volume 45, 2006 - [Issue 4](#) Pages 475-483 Published online: 18 Jul 2013
8. J.T. Pérez-Quiroz, J. Teran, M.J. Herrera, M. Martinez, J. Genesca : "Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation" J. of Constructional Steel research (2008) doi:10.1016/j.jcsr.2008.07.024
9. Juliana Lopes Cardoso / Adriana de Araujo / Mayara Stecanella Pacheco / Jose Luis Serra Ribeiro / Zehbour Panossian "stainless-steel-rebar-for-marine-environment-a-study-of-galvanic-corrosion-with-carbon-steel-rebar-used-in-the-same-concrete-structure" (2018) <https://store.nace.org/stainless-steel-rebar-for-marine-environment-a-study-of-galvanic-corrosion-with-carbon-steel-rebar-used-in-the-same-concrete-structure> Product Number: 51318-11312-SG
10. <http://stainlesssteelrebar.org/>

Obrigado

Apresentação de apoio para docentes de Arquitetura / Engenharia Civil

Capítulo 07

Parte B:

**Aplicações estruturais de Placas,
chapas, barras de aço inoxidável,....**

Veja também: <http://stainlesssteelrebar.org/>

Aço Inoxidável Estrutural

Projetando com aço inoxidável

Barbara Rossi, Maarten Fortan
Departamento de Engenharia Civil,
KU Leuven, Bélgica

Baseado em uma versão anterior preparada por Nancy
Baddoo - Steel Construction Institute, Ascot, Reino Unido

Esboço

- Exemplos de aplicações estruturais
- Características mecânicas do material
- Projeto de acordo com Eurocode 3
- Métodos alternativos
- Deflexões
- Informação adicional
- Recursos para engenheiros

Seção 1

Exemplos de aplicações estruturais



Estação Sint Pieters, Ghent (BE)

Arquitetura : Wefirna

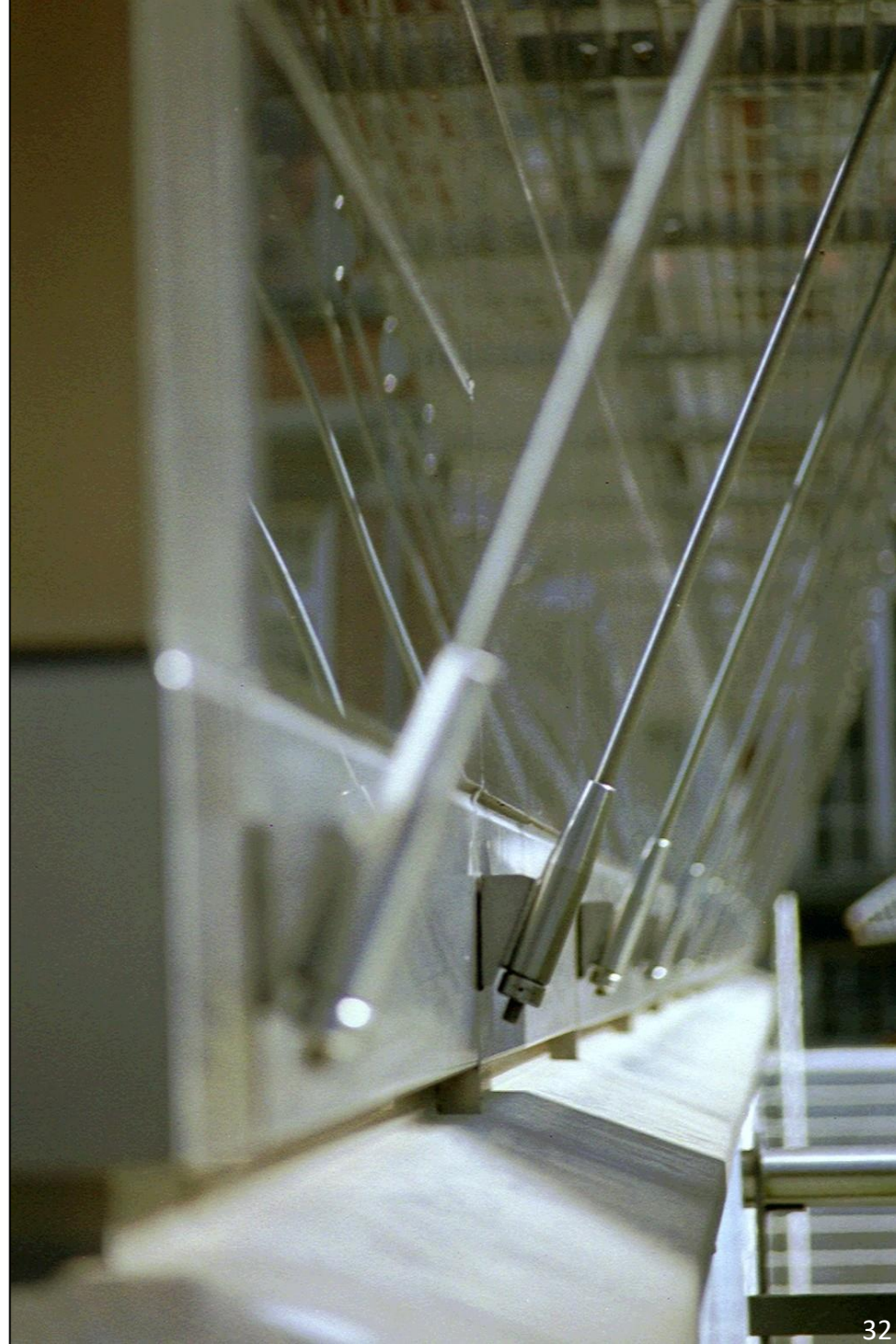
Engenharia: THV Van Laere-Braekel Aero



Escola Militar
em Bruxelas

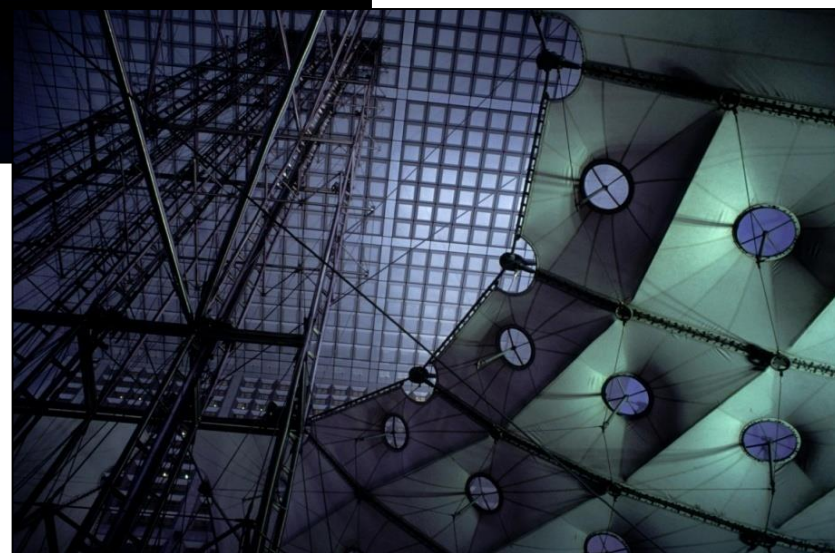
Arquitetura:
AR.TE

Engenharia:
Tractebel
Development





La Grande Arche, Paris
Arquitetura : Johan Otto von
Spreckelsen
Engenharia: Paul Andreu





Villa Inox (FIN)

La Lentille de Saint-Lazare, Paris, (França)

Arquitetura: Arte
Charpentiers &
Associés

Engenharia: Mitsu
Edwards



Estação em Porto (Portugal)



Torno Internazionale S.P.A. Sede Milão, (IT), tipo de aço
inoxidável : EN 1.4404 (AISI 316L)

Arquitetura : Dante O. BENINI & Arquitetos parceiros



Photography: Toni Nicolino / Nicola Giacomini

Estrutura de aço
inoxidável na
usina nuclear



Fotografia: Stainless Structurals LLC

Suportes de
fachadas em aço
inoxidável, Tampa,
(EUA)



Fotografia: TriPyramid Structures, Inc.

Vigas de aço inoxidável em forma de I, Trabalhos de tratamento de água da Thames Gateway, (UK)



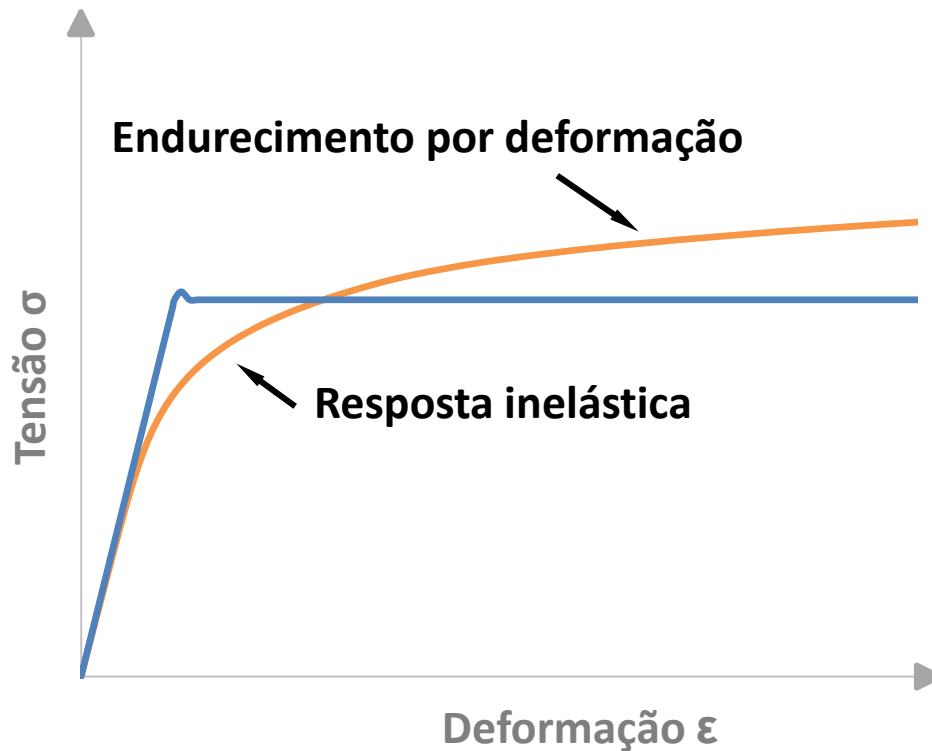
Fotografia: Interserve

Seção 2

Características mecânicas do material

Características tensão-deformação: Aço carbono vs aço inoxidável

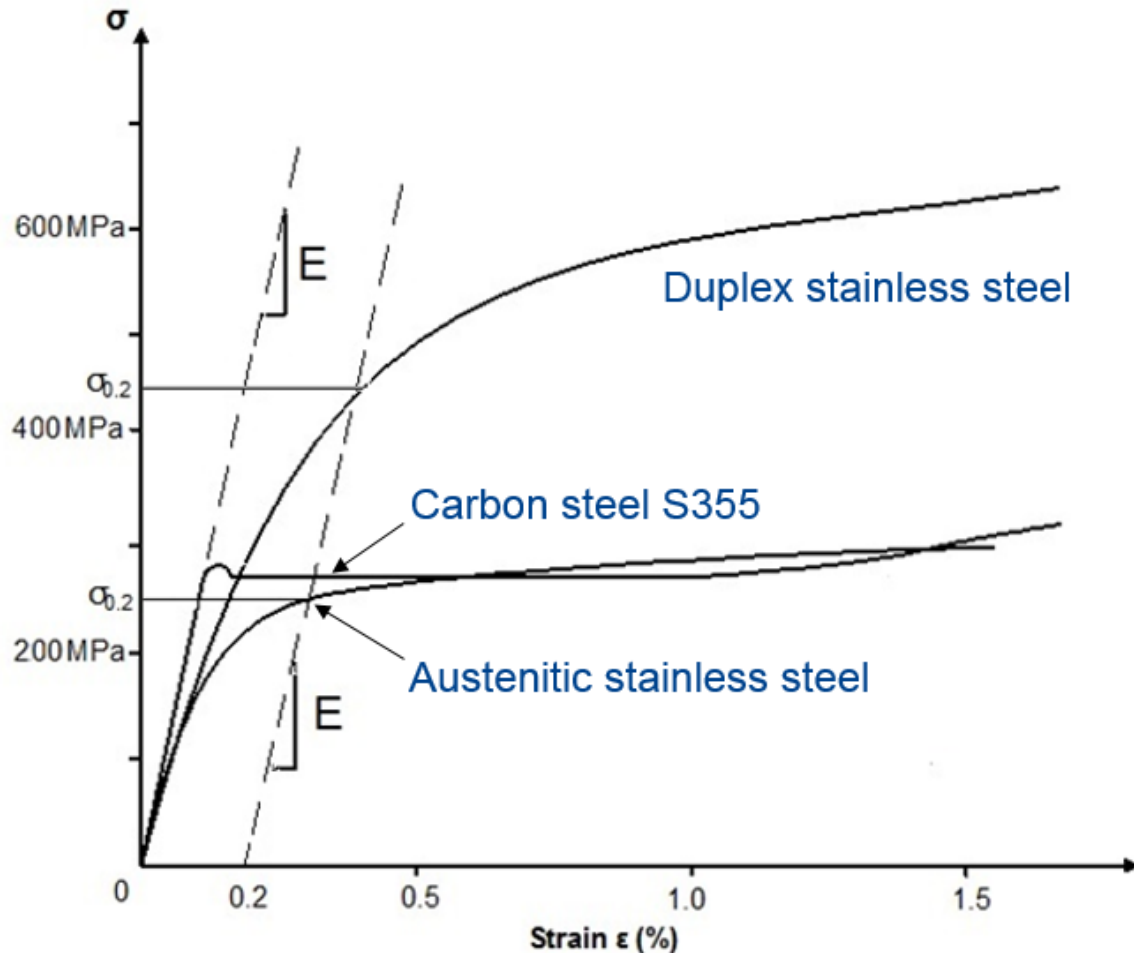
Aço inoxidável exibe comportamento σ - ϵ fundamentalmente diferente do aço carbono.



O aço carbono apresenta um limite elástico bem definido seguido de um patamar de deformação plástica.

O aço inoxidável exibe uma deformação plástica gradual, com elevado endurecimento por deformação.

Características tensão–deformação a baixo nível de deformação



A resposta tensão-deformação depende da família.

Resistência de cálculo do aço inoxidável

Valores mínimos de tensão correspondente a uma deformação remanente de 0.2% especificados na EN10088-4 e -5

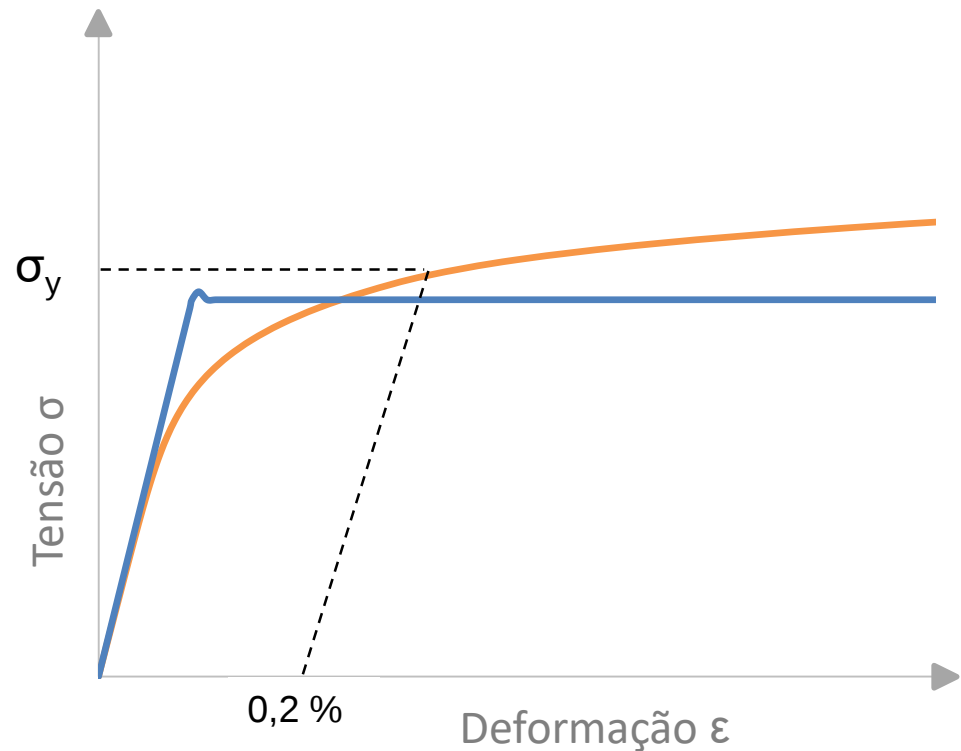
Austeníticos: $f_y = 220-350$ MPa

Duplex: $f_y = 400-480$ Mpa

Ferríticos: $f_y = 210-280$ MPa

Módulo de Young:

$E=200,000$ a $220,000$ MPa



Resistência de cálculo do aço inoxidável

Tipo	Família	Límite elástico (N/mm ²) (tensão a deformação remanente de 0.2%)	Limite de Resistência (N/mm ²)	Módulo de Young (N/mm ²)	Deformação na fratura (%)
1.4301 (304)	Austenítico	210	520	200000	45
1.4401 (316)	Austenítico	220	520	200000	40
1.4062	Duplex	450	650	200000	
1.4462	Duplex	460	640	200000	
1.4003	Ferrítico	250	450	220000	

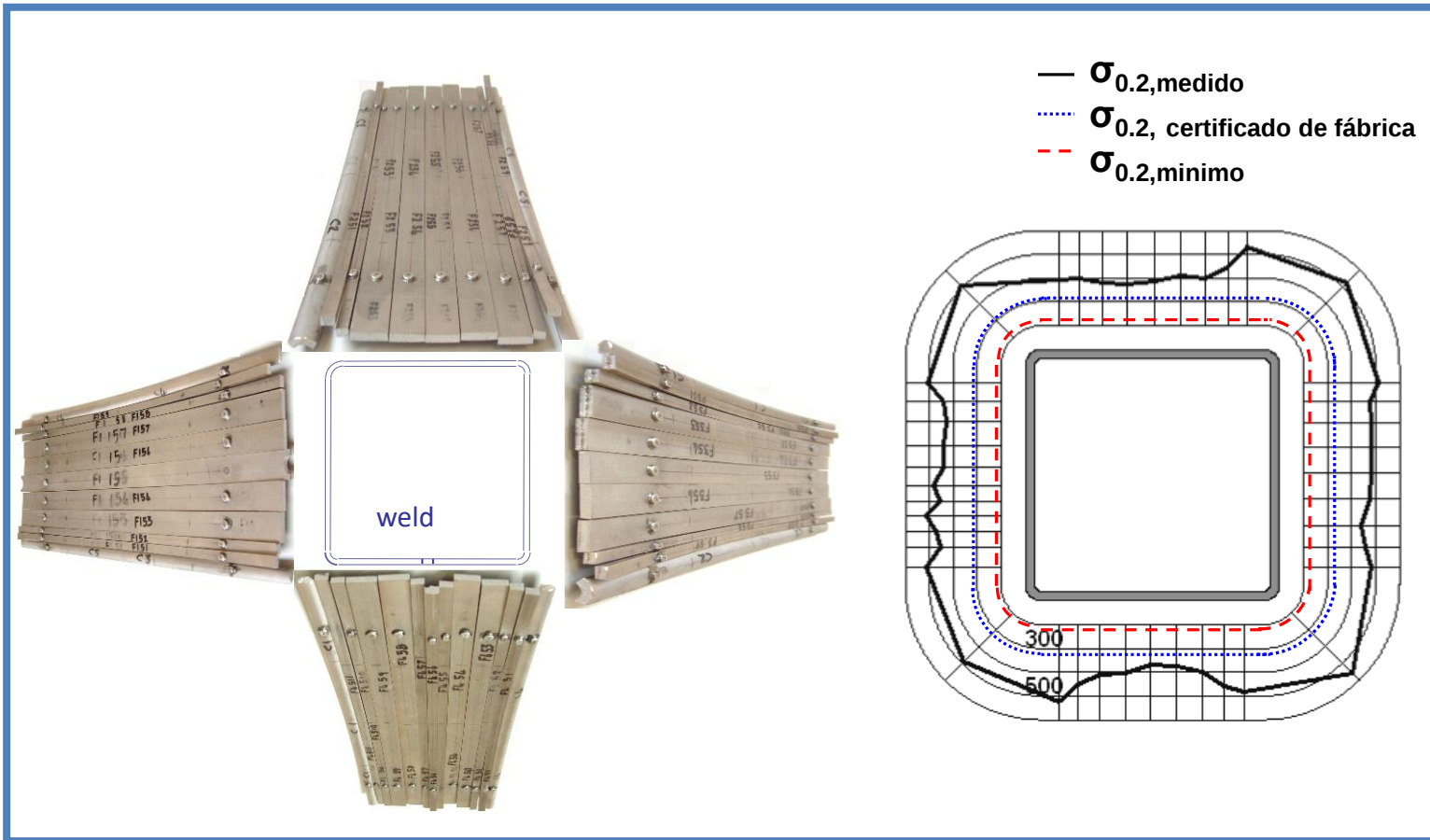
Endurecimento por deformação (trabalhado ou laminado a frio)

- Maior resistência por deformação plástica
- Causada por conformação a frio, seja durante operações de produção de aço na fábrica ou durante processos de fabricação

Durante a fabricação de uma secção tubular retangular, a tensão correspondente a uma deformação remanente de 0,2% aumenta em cerca de 50% nos cantos conformados a frio!

Endurecimento por deformação (trabalhado ou laminado a frio)

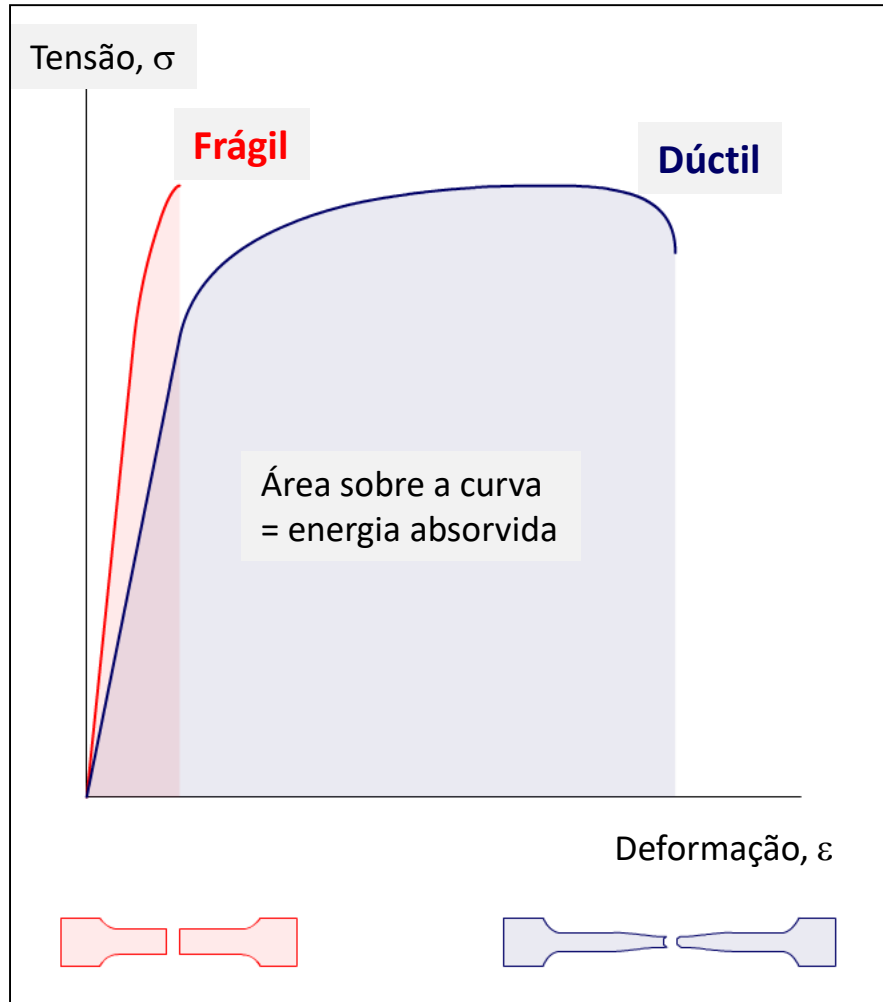
- Aumento da resistência durante a conformação



Endurecimento por deformação - nem sempre é benéfico

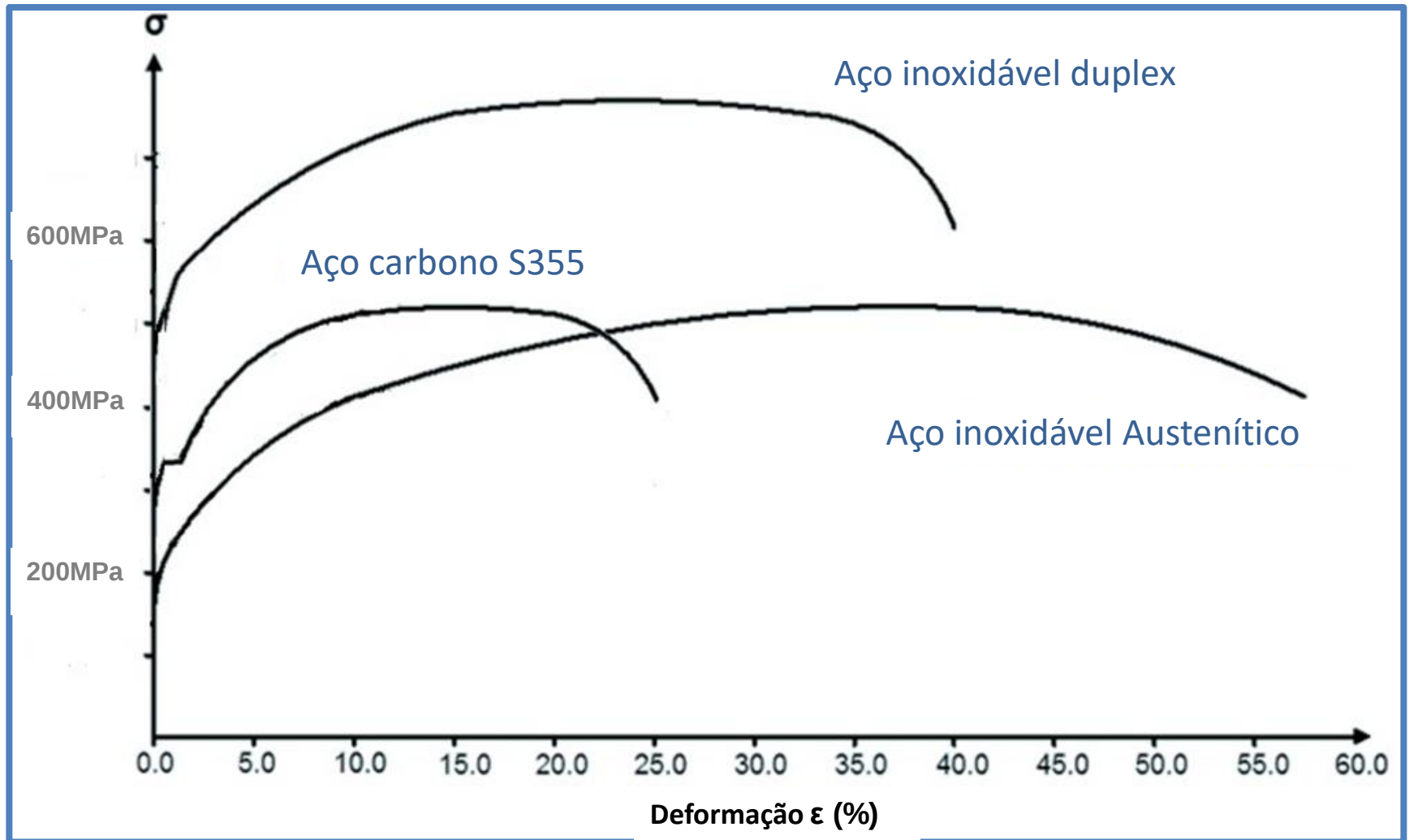
- Equipamento de fabricação mais pesado e potente
- Forças maiores são necessárias
- Ductilidade reduzida (no entanto, a ductilidade inicial é alta, especialmente para austeníticos)
- Tensões residuais indesejáveis podem ser produzidas

Ductilidade e tenacidade



- **Ductilidade** - capacidade de ser deformado sem quebrar
- **Tenacidade** - capacidade de absorver energia e deformar plasticamente sem fraturar

Características tensão-deformação a altas deformações



Estruturas resistentes a impactos / explosões



Poste de
segurança



Uma parede trapezoidal resistente a explosões
sendo fabricada para a parte superior de uma
plataforma marítima

Caraterísticas tensão-deformação

Não-linearidaderesulta em

- Limites diferentes de largura / espessura para efeitos de flambagem localizada
- Comportamento diferente de elementos frente a instabilidades globais em compressão e flexão
- Maiores desvios

Impacto no desempenho frente à flambagem por flexão

- **Baixa esbeltez**

colunas atingem / excedem a carga plástica

⇒ **benefícios** do endurecimento por deformação - O aço inoxidável se comporta tão bem quanto o aço carbono

- **Alta esbeltez**

baixa resistência axial, baixo nível de tensão na região linear do material

⇒ o aço inoxidável se comporta de maneira semelhante ao aço carbono, admitindo geometrias e tensões residuais semelhantes

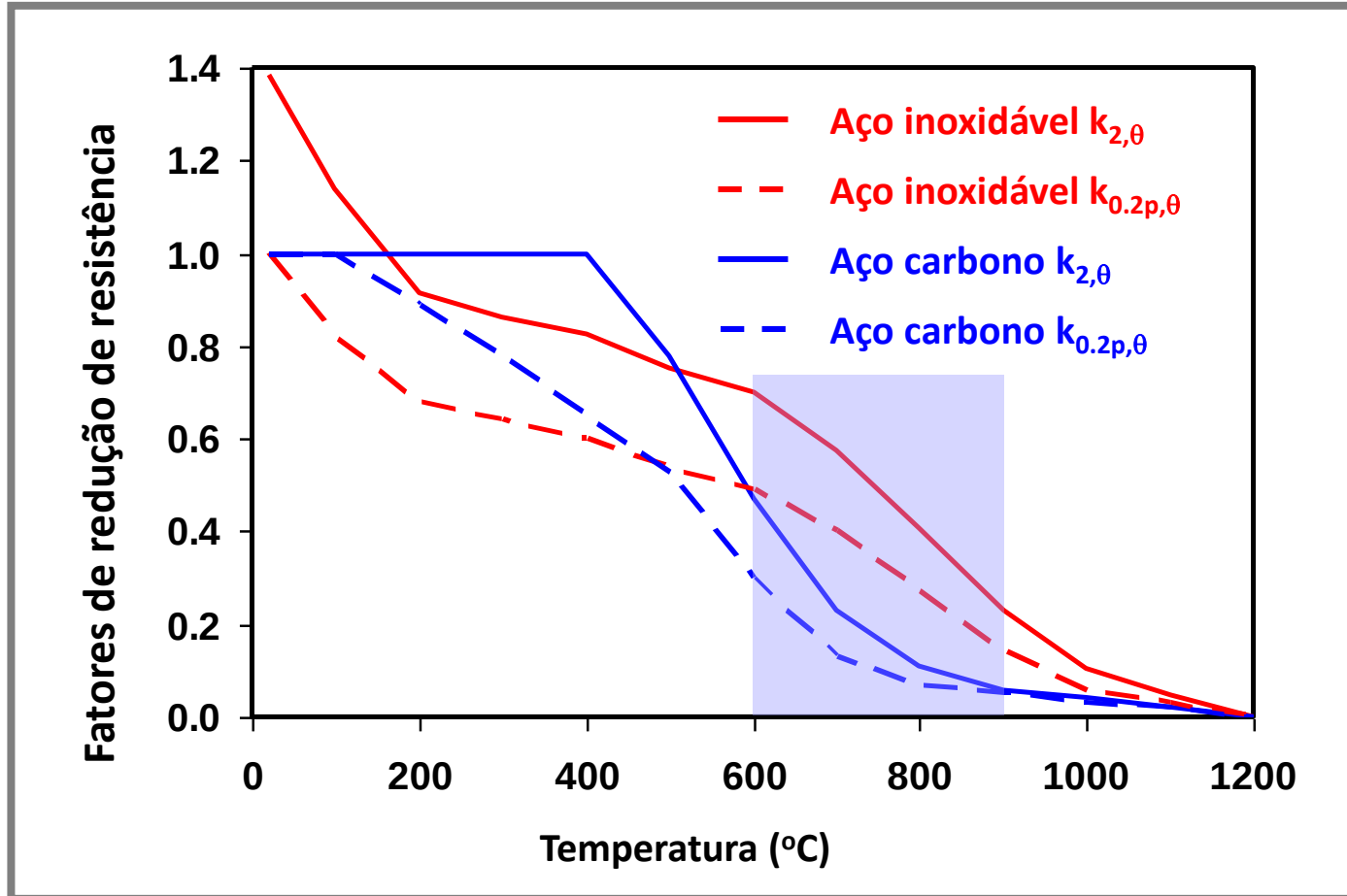
Impacto no desempenho frente à flambagem por flexão

- **Esbeltez intermediária**

a tensão média no pilar situa-se entre o limite de proporcionalidade e a tensão correspondente a uma deformação remanente de 0,2%,

os pilares de aço inoxidável são menos resistentes que os de aço carbono

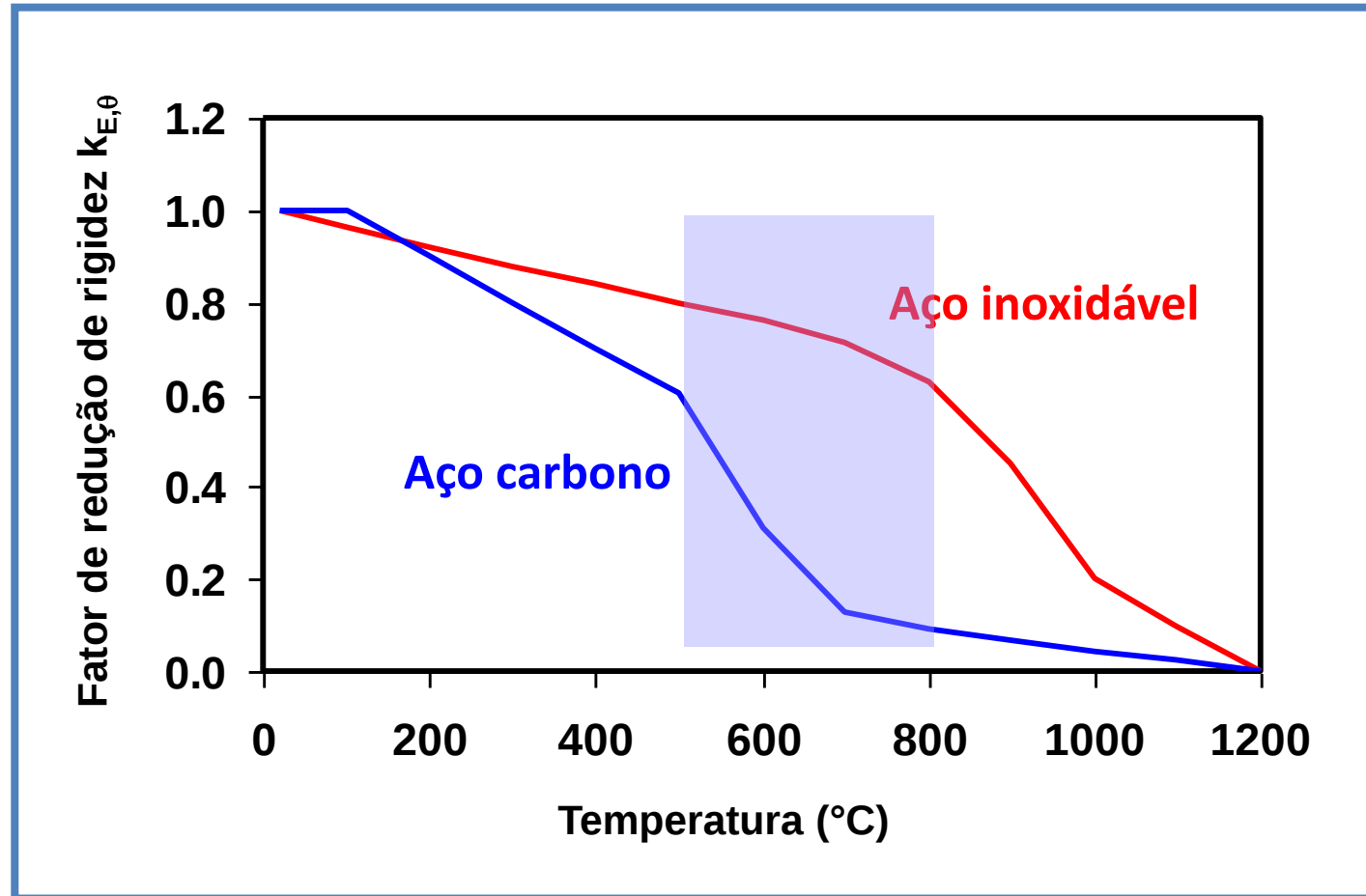
Material a temperaturas elevadas



$k_{0.2p,q}$ = fator de redução de resistência a tensão de deformação plástica 0,2%

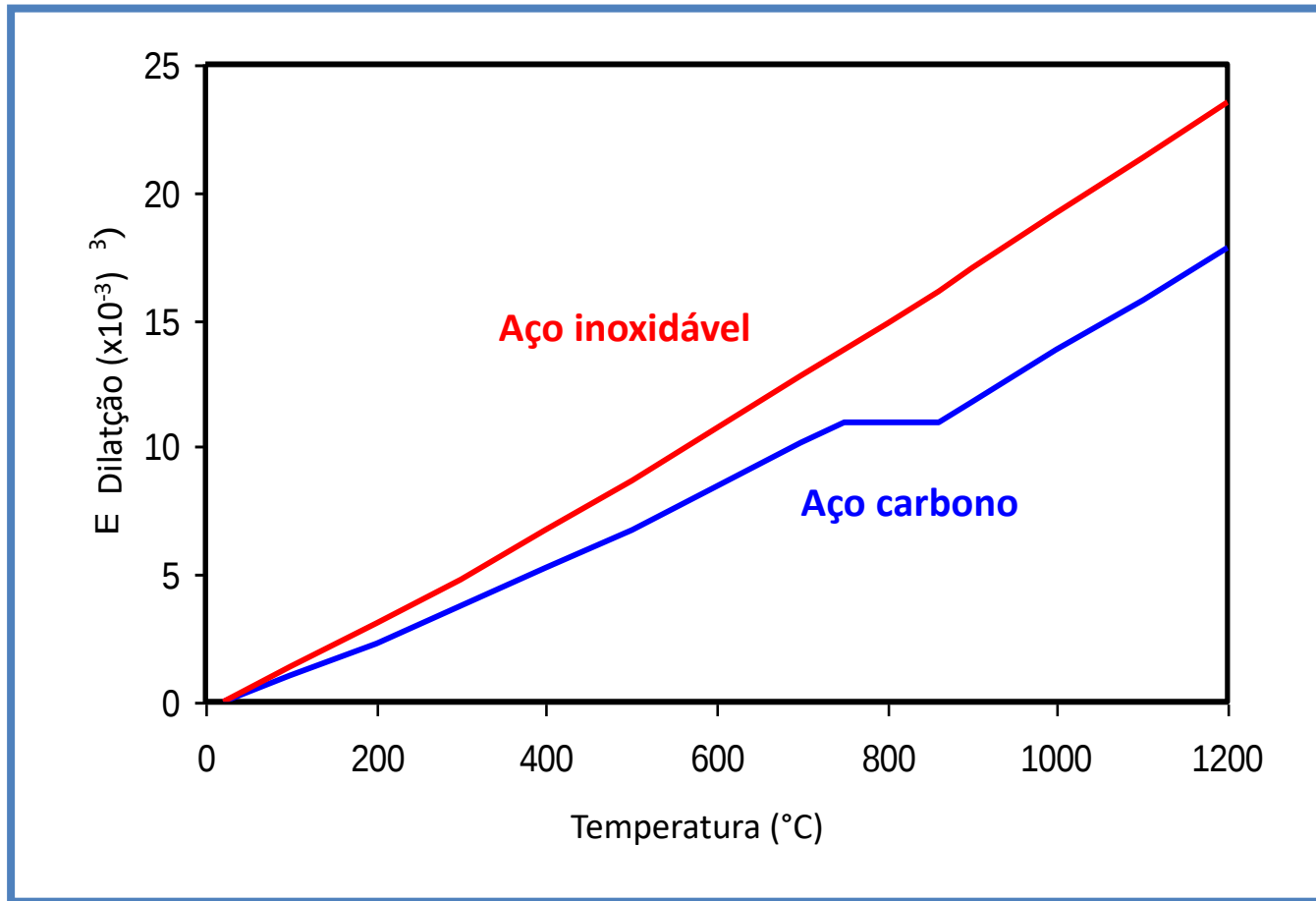
$k_{2,q}$ = fator de redução de resistência a tensão de deformação total 2%

Material a temperatura elevada



Fator de redução de rigidez

Material a temperaturas elevadas



Expansão Térmica

Seção 3

Projeto de acordo com Eurocode 3

Normas de cálculo internacionais

Quais são as normas de cálculo disponíveis para aço inoxidável estrutural?



Hamilton Island Yacht Club, Austrália

EN 1990

Structural safety, serviceability and durability

EN 1991

Actions on structures

EN 1992

EN 1993

EN 1994

EN 1995

EN 1996

EN 1999

Design and detailing

EN 1997

Geotechnical design

EN 1998

Seismic design

Links between the Eurocodes

Os Eurocódigos são um conjunto integrado de normas de cálculo estrutural cobrindo todos os materiais de construção comuns

Eurocode 3: Parte 1 (EN 1993-1)

EN 1993-1-1 General rules and rules for buildings.

EN 1993-1-2 Structural fire design.

EN 1993-1-3 Cold-formed members and sheeting .

EN 1993-1-4 Stainless steels.

EN 1993-1-5 Plated structural elements.

EN 1993-1-6 Strength and stability of shell structures.

EN 1993-1-7 Strength & stability of planar plated structures
transversely loaded.

EN 1993-1-8 Design of joints.

EN 1993-1-9 Fatigue strength of steel structures.

EN 1993-1-10 Selection of steel for fracture toughness and through-
thickness properties.

EN 1993-1-11 Design of structures with tension components

EN 1993-1-12 Supplementary rules for high strength steels

Eurocode 3: Projeto de estruturas de aço, Parte 1.4 Regras complementares para aços inoxidáveis

BRITISH STANDARD

BS EN
1993-1-4:2006

Eurocode 3 — Design of steel structures —

**Part 1-4: General rules —
Supplementary rules for stainless steels**

Projeto de estruturas de aço.
Regras suplementares para os aços
inoxidáveis (2006)

- Modifica e complementa as diretrizes para o aço carbono dadas em outras partes do Eurocódigo 3, quando necessário
- Aplica-se a edifícios, pontes, tanques etc

The European Standard EN 1993-1-4:2006 has the status of a
British Standard

ICS 91.040.01; 91.080.10

BSi
British Standards

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

Eurocode 3: Projeto de estruturas de aço, Parte 1.4 Regras complementares para aços inoxidáveis

- Siga a mesma abordagem básica do aço carbono
- Use as mesmas regras do aço carbono para elementos tracionados e vigas apoiadas
- Existem diferenças nos limites de classificação seccional, na flambagem local e nas curvas de flexão devido à:
 - curva tensão-deformação não linear
 - características de endurecimento por deformação
 - diferentes níveis de tensões residuais

Eurocode 3: Projeto de estruturas de aço,

Parte 1.4 Regras complementares para aços inoxidáveis

Tipos de elementos

- Laminados a quente e soldados
- Conformados a frio
- Barras

Número de tipos

Família	EC3-1-4	Revisão futura
Ferrítico	3	3
Austenítico	16	16
Duplex	2	6

Escopo

- Elementos e conexões
- Fogo (*em referência a EN 1993-1-2*)
- Fadiga (*em referência a EN 1993-1-9*)

Outras normas e manuais de projetos

- **Japão** – duas normas: um para perfis conformados a frio e outro para elementos soldados de aço inoxidável
- **África do Sul, Austrália, Nova Zelândia**- normas para elementos conformados a frio de aços inoxidáveis
- **China** – norma em desenvolvimento
- **EUA** – especificação ASCE para elementos conformados a frio e Guia de Projeto AISC para aço inoxidável estrutural laminado a quente e soldado

Eurocode 3: Projeto de estruturas de aço, Parte 1.4 Regras suplementares para aços inoxidáveis

Quais são as regras de projeto para o aço inoxidável dadas na EN 1993-1-4 e as principais diferenças com equivalentes de aço carbono?



Colunas resistentes a explosões na entrada do
Seven World Trade Center, Nova York

Classificação de seções & expressões de flambagem locais na EN 1993-1-4

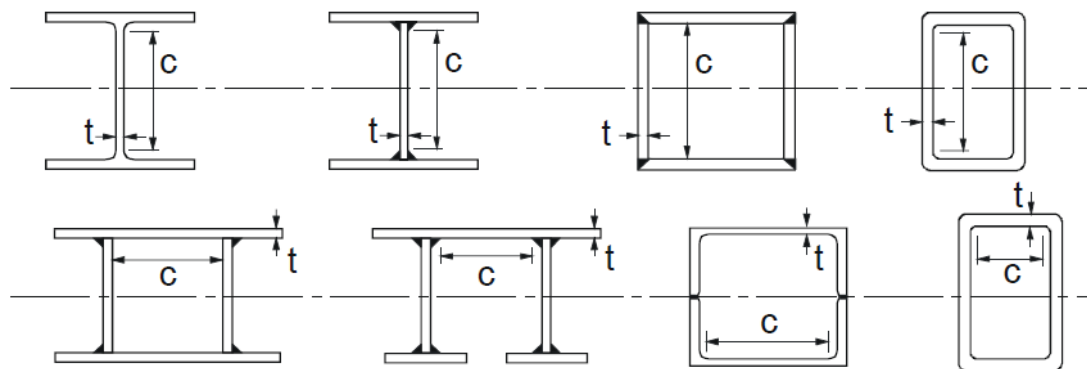
- Relação largura-espessura mais limitada do que no aço carbono
- Expressões levemente diferentes para calculo da largura eficaz em seções esbeltas

No entanto...

A próxima versão da EN 1993-1-4 conterá limites menos conservadores e expressões de largura eficaz.

Classificação de seções & expressões de flambagem locais na EN 1993-1-4

■ Peças de compressão interna

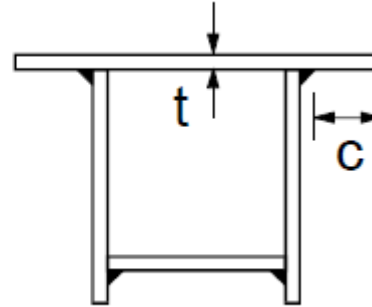
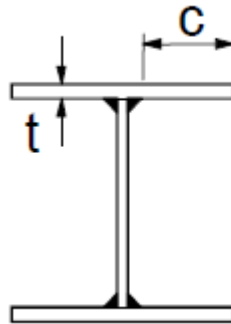


$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

	EC3-1-1: Aço carbono		EC3-1-4: Aço inoxidável		EC3-1-4: Revisado	
Classe	Flexão	Compressão	Flexão	Compressão	Flexão	Compressão
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$c/t \leq 56\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	$c/t \leq 76\varepsilon$	$c/t \leq 35\varepsilon$
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$

Classificação de seções & expressões de flambagem locais na EN 1993-1-4

■ Peças de compressão externa



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

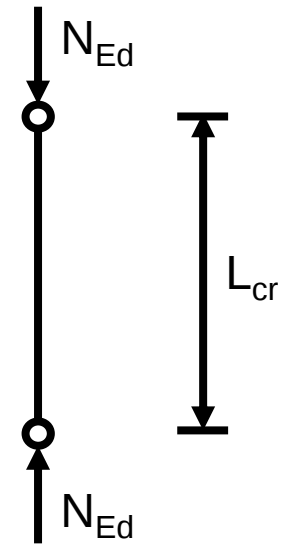
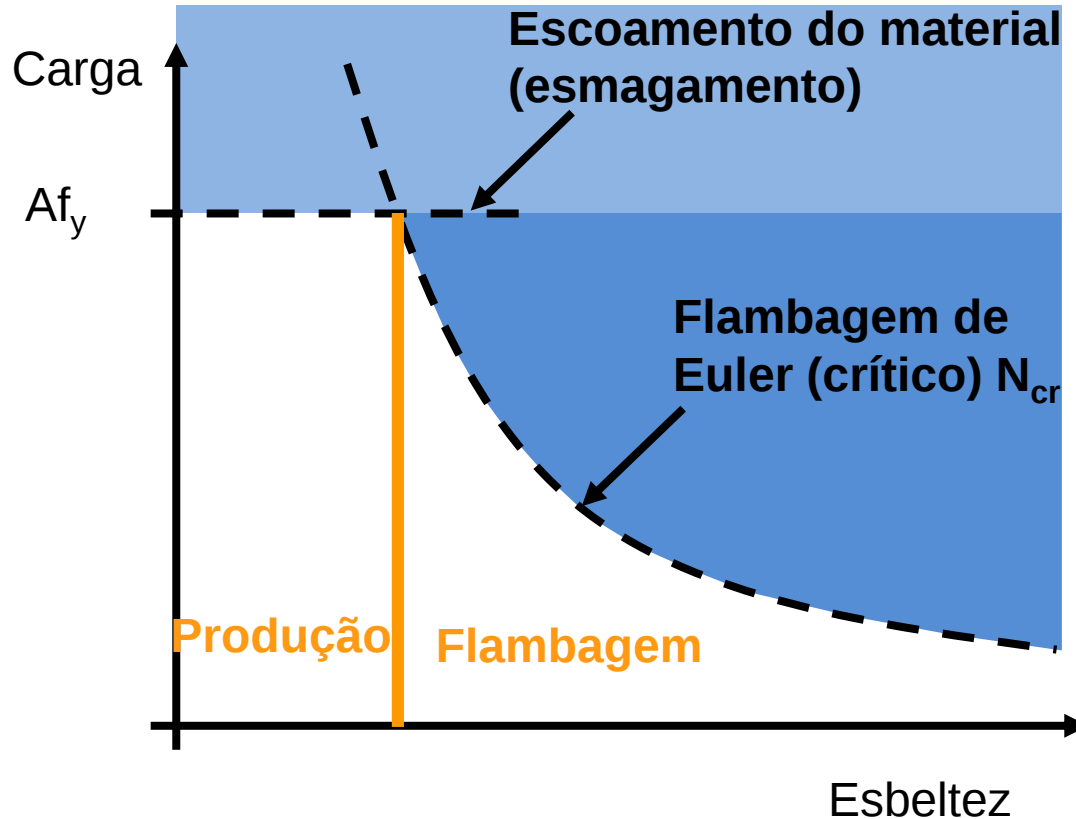
	EC3-1-1: Aço carbono	EC3-1-4: Aço inoxidável		EC3-1-4: Revisado
Classe	Compressão	Compressão Soldada	Compressão Conformado a frio	Compressão
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 14\varepsilon$

Projetos de colunas e vigas

- Em geral, use a mesma abordagem que para o aço carbono
- Mas considere diferentes curvas de flambagem para flambagem de flexão de coluna e flambagem lateral de vigas não apoiadas (flambagem lateral).
- Certifique-se de usar o valor adequado de f_y para o tipo considerado (os valores mínimos especificados são fornecidos na EN 10088-4 e -5)

Comportamento do pilar "Perfeito"

Dois limites: plastificação e flambagem:



Flambagem de coluna

Resistência à flambagem por compressão $N_{b,Rd}$:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Para Classes 1, 2 and 3

Coeficiente de redução

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$

Para Classe 4 (simétrica)

Flambagem de coluna

Esbeltez não dimensional:

$\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para seções transversais das Classe 1, 2 and 3}$$

$$= \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \bar{\lambda} \quad \text{para seções transversais da classe 4}$$

N_{cr} é a carga de flexão crítica elástica para o modo de flambagem relevante com base nas propriedades brutas da seção transversal

Flambagem de coluna

Fator de redução: χ

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

$$\phi = 0,5 (1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2)$$

Fator de imperfeição

Esbeltez Limite

Flambagem de coluna

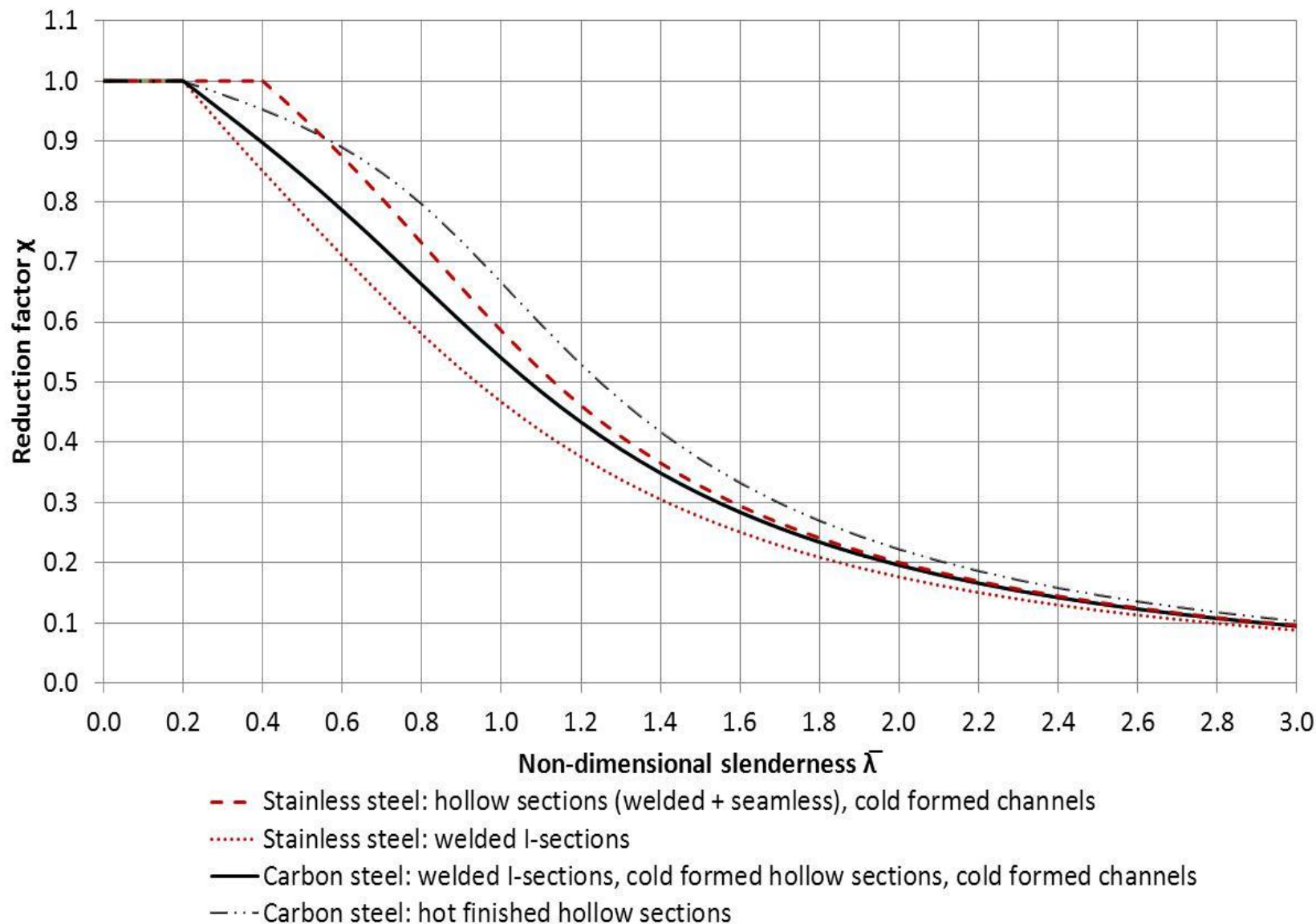
- A escolha da curva de flambagem depende da seção transversal, processo de fabricação e eixo considerado

Table 5.3: Values of α and $\bar{\lambda}_0$ for flexural, torsional and torsional-flexural buckling

Buckling mode	Type of member	α	$\bar{\lambda}_0$
Flexural	Cold formed open sections	0,49	0,40
	Hollow sections (welded and seamless)	0,49	0,40
	Welded open sections (major axis)	0,49	0,20
	Welded open sections (minor axis)	0,76	0,20
Torsional and torsional-flexural	All members	0,34	0,20

Extraído da EN 1993-1-4

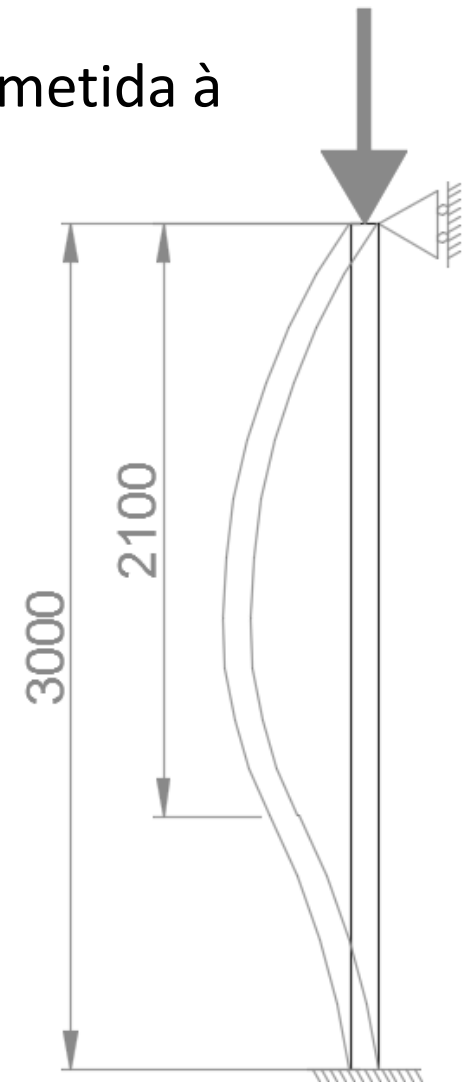
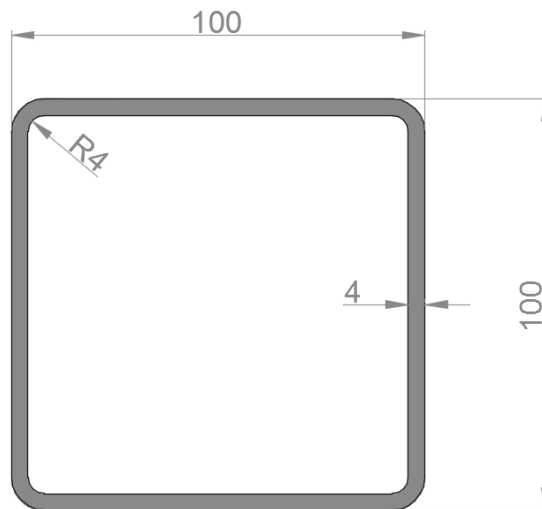
Eurocode 3 Curvas de flambagem por flexão



Eurocode 3 Exemplo de flambagem por flexão

- Seção oca retangular conformada a frio submetida à compressão concêntrica

	Aço carbono	Aço inox austenítico
Material	S235	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	235	230
E [N/mm ²]	210000	200000



Eurocode 3 Exemplo de flambagem por flexão

EC 3-1-1: S235

■ Classificação

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

- Todas as peças internas

$$c/t = 21 < 33 = 33\varepsilon$$

Classe 1

Seção transversal = classe 1

EC 3-1-4: Austenítico

■ Classificação

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0,99$$

- Todas as peças internas

$$c/t = 21 < 25,35 = 25,7\varepsilon$$

Classe 1

Seção transversal = classe 1

Eurocode 3 Exemplo de flambagem por flexão

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Duplex
$A \text{ [mm}^2\text{]}$	1495	1495
$f_y \text{ [N/mm}^2\text{]}$	235	230
$\gamma_{M0} [-]$	1	1,1
$N_{c,Rd} \text{ [kN]}$	351	313
$L_{cr} \text{ [mm]}$	2100	2100
$\lambda_1 [-]$	93,9	92,6
$\bar{\lambda} [-]$	0,575	0,583
$\alpha [-]$	0,49	0,49
$\bar{\lambda}_0 [-]$	0,2	0,4
$\phi [-]$	0,76	0,71
$\chi [-]$	0,80	0,89
$\gamma_{M1} [-]$	1	1,1
$N_{b,Rd} \text{ [kN]}$	281	277

Eurocode 3 Exemplo de flambagem por flexão

■ Comparação

	EC 3-1-1: S235	EC 3-1-4: Austenítico
f_y [N/mm ²]	235	230
γ_{M0} [-]	1,0	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1
Seção transversal $N_{c,Rd}$ [kN]	351	313
Estabilidade $N_{b,Rd}$ [kN]	281	277

— Neste exemplo, aço carbono e aço inoxidável apresentam resistência semelhante à flambagem por flexão

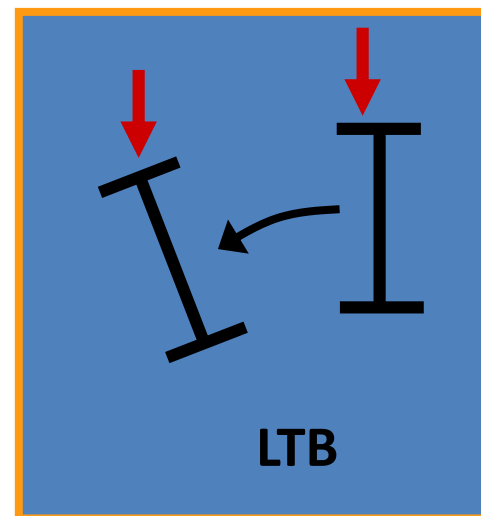
⇒ benefícios do endurecimento por tensão não aparentes

EC3 1-4 não leva em consideração o endurecimento por deformação

Flambagem lateral com torção

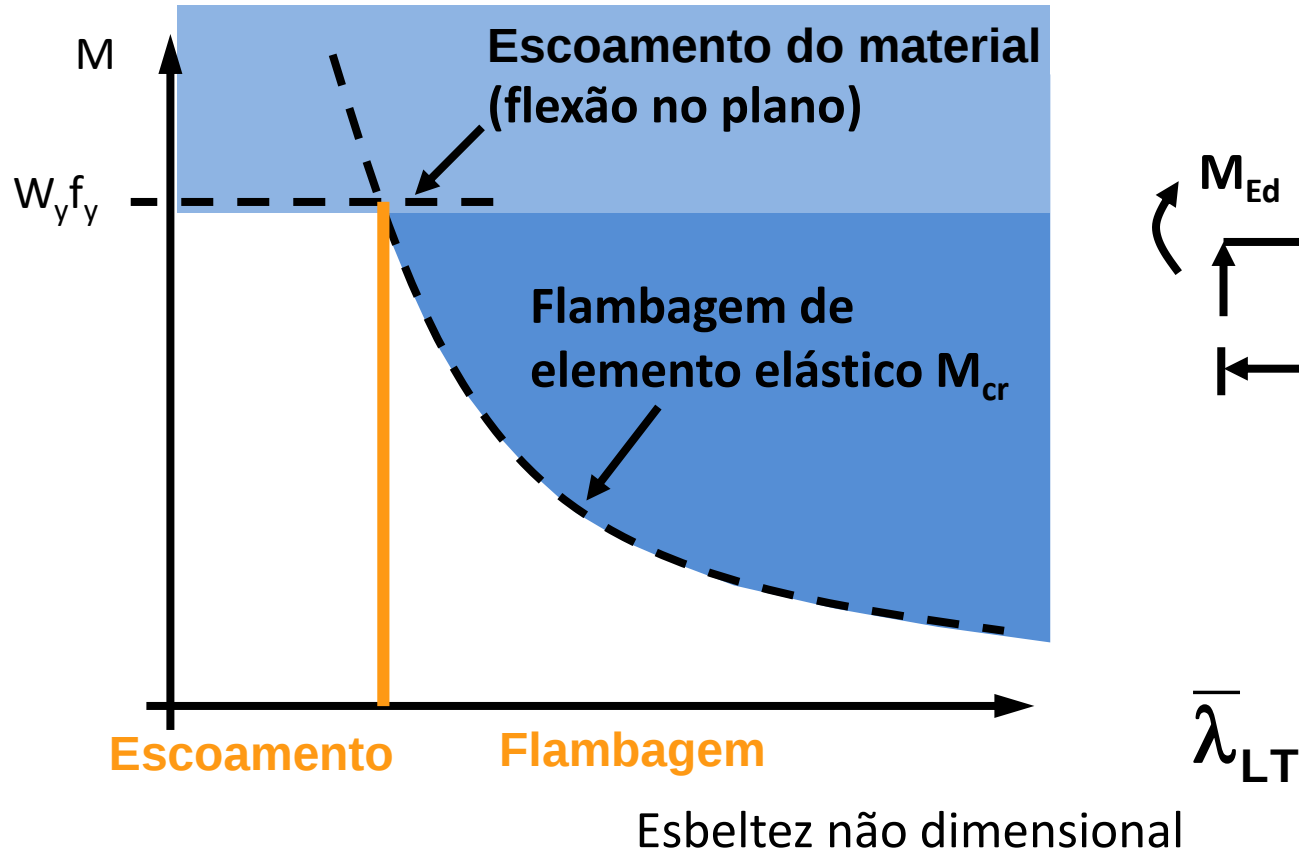
- Pode ser negligenciado no caso de: :

- Flexão menor do eixo
- CHS, SHS, barra circular ou quadrada
- Vigas completamente apoiadas lateralmente
- $\bar{\lambda}_{LT} < 0.4$



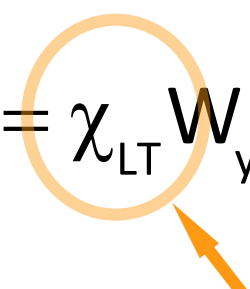
Flambagem lateral com torção

- O método de cálculo para flambagem lateral com torção é análoga ao tratamento de flambagem da coluna.



Flambagem lateral com torção

- A resistência à flambagem de projeto $M_{b,Rd}$ de uma viga sem restrição lateral (ou segmento de viga) deve ser determinada a partir de:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$


Coeficiente de redução por FLT

Flambagem lateral com torção

- Curvas de flambagem lateral com torção são apresentas na sequência:

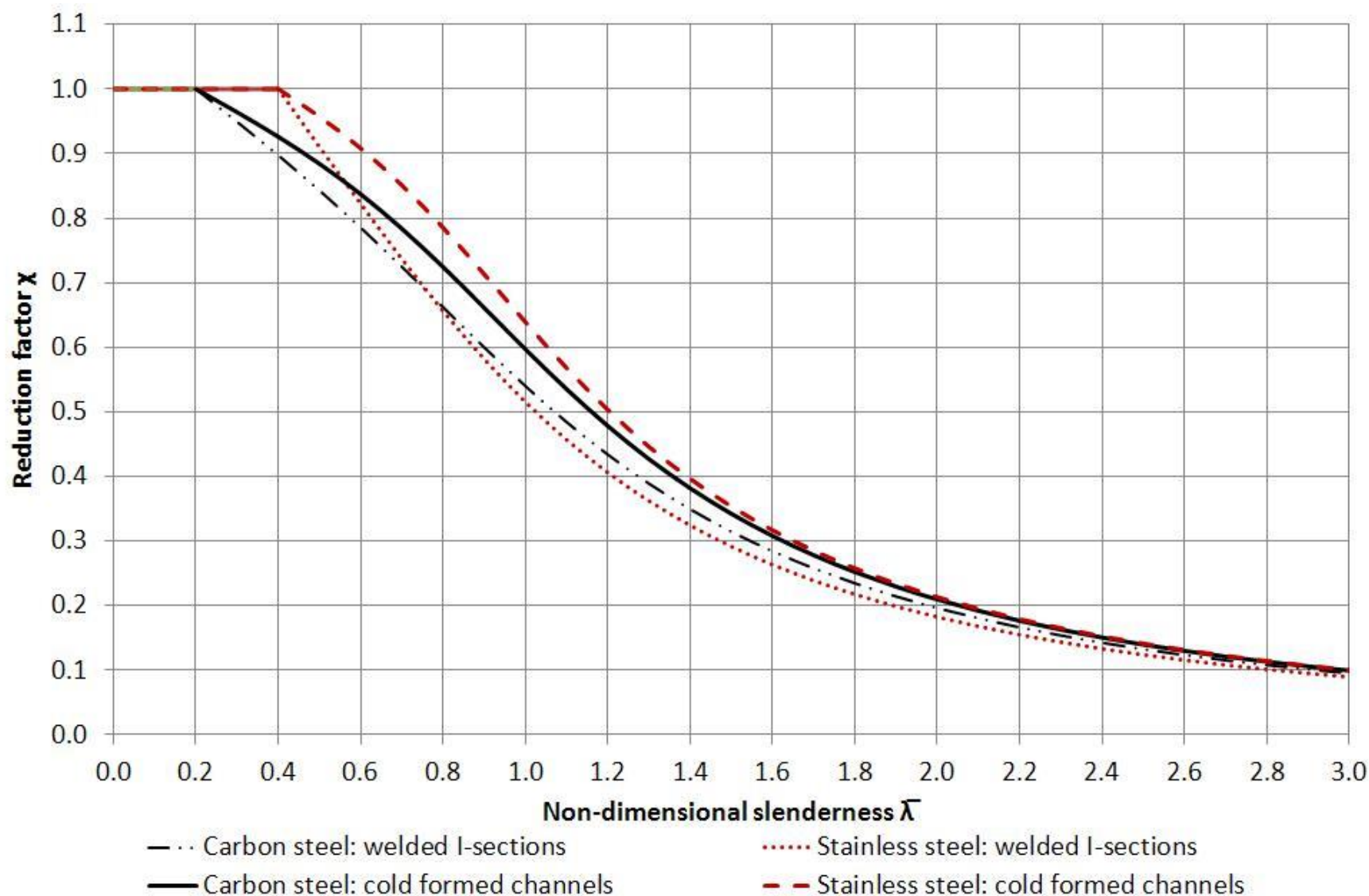
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{but } \chi_{LT} \leq 1.0$$

$$\Phi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0.4) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

Fator de imperfeição

Esbeltez limite

Eurocode 3 curvas de flambagem lateral com torção



Esbeltez não dimensional

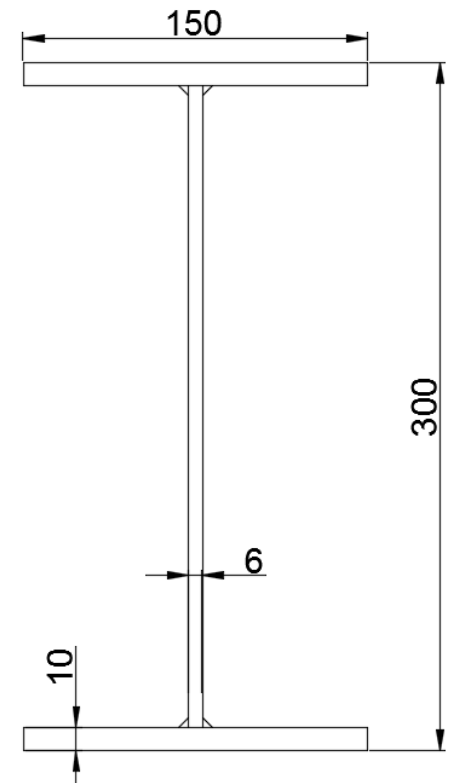
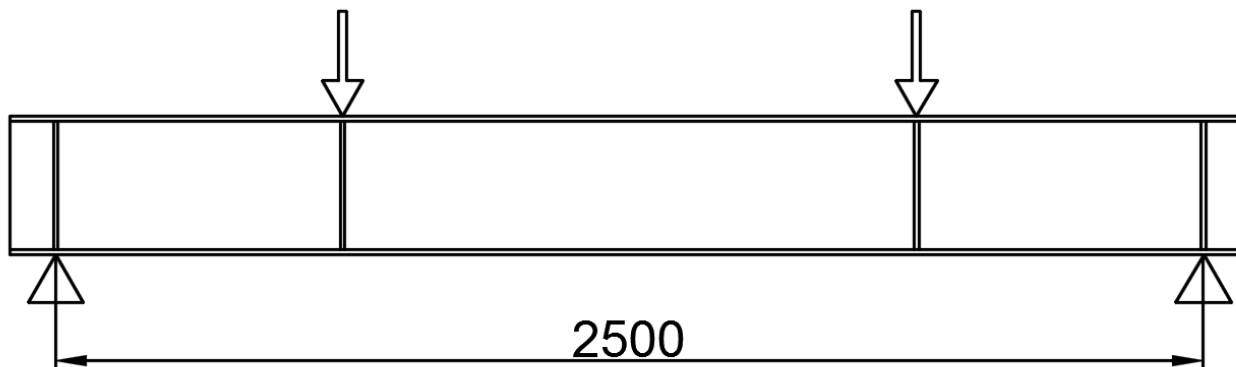
- Esbeltez de flambagem lateral com torção:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

- Curvas de flambagem quanto à compressão (exceto curva a_0)
- W_y depende da classificação seccional
- M_{cr} é o momento FLT crítico elástico

Eurocode 3 exemplo de flambagem lateral com torção

- Viga em forma de I submetida à flexão



	Aço carbono	Aço inoxidável duplex
Material	S355	EN 1.4162
f_y [N/mm ²]	355	450
E [N/mm ²]	210000	200000

Eurocode 3 exemplo de flambagem lateral com torção

EC 3-1-1: S355

■ Classificação

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,81$$

— Flange

$$c/t = 6,78 < 7,3 = 9\varepsilon$$

Classe 1

— Alma

$$c/t = 45,3 < 58,3 = 72\varepsilon$$

Classe 1

Seção transversal = classe 1

EC 3-1-4: Duplex

■ Classificação

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0,71$$

— Flange

$$c/t = 6,78 < 7,76 = 11\varepsilon$$

Classe 3

— Alma

$$c/t = 45,3 < 58,3 = 72\varepsilon$$

Classe 3

Seção transversal = classe 3

Eurocode 3 exemplo de flambagem lateral com torção

EC 3-1-1: S355

- Momento final

- Classe 1

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 196 \text{ kNm}$$

EC 3-1-4: Duplex

- Momento final

- Classe 3

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 202 \text{ kNm}$$

Revisão EC 3-1-4:

- Limites de classificação: mais próximo do aço carbono

- Seção transversal = classe 2

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 226 \text{ kNm}$$

Eurocode 3 exemplo de flambagem lateral com torção

Momento flector crítico elástico de flambagem lateral :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left[\left(\frac{k_z}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2 \right]} - C_2 z_g \right\}$$

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: duplex
C_1 [-]	1,04	1,04
C_2 [-]	0,42	0,42
k_z [-]	1	1
k_ω [-]	1	1
z_g [mm]	160	160
I_z [mm ⁴]	$5,6 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$
I_T [mm ⁴]	$1,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
I_ω [mm ⁶]	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
E [MPa]	210000	200000
G [MPa]	81000	77000
M_{cr} [kNm]	215	205

Eurocode 3 exemplo de flambagem lateral com torção

Resistência frente a flambagem lateral com torção

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Duplex	EC 3-1-4: Revisão Futura
W_y [mm ³]	$5,5 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^5$
f_y [N/mm ²]	355	450	450
M_{cr} [kNm]	215	205	205
$\bar{\lambda}_{LT}$ [-]	0,96	1,04	1,10
α_{LT} [-]	0,49	0,76	0,76
$\bar{\lambda}_{LT,0}$ [-]	0,2	0,4	0,4
ϕ_{LT} [-]	1,14	1,29	1,37
χ_{LT} [-]	0,57	0,49	0,46
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
$M_{b,Rd}$ [kNm]	111	99	103

Eurocode 3 exemplo de flambagem lateral com torção

■ Comparação

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Duplex	EC 3-1-4: Revisão Futura
f_y [N/mm ²]	355	450	450
γ_{M0} [-]	1,0	1,1	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
Seção transversal $M_{c,Rd}$	196	202	226
Estabilidade $M_{b,Rd}$	111	99	103

- Neste exemplo, aço carbono e aço inoxidável apresentam resistência semelhante ao FLT
- No entanto: Os testes atuais e a literatura mostram que os resultados do EC3-1-4 devem ser adaptados para estarem mais próximos da realidade.
- **⇒ Muito conservador**
(Isso será mostrado no exemplo sobre métodos de elementos finitos)

Seção 4

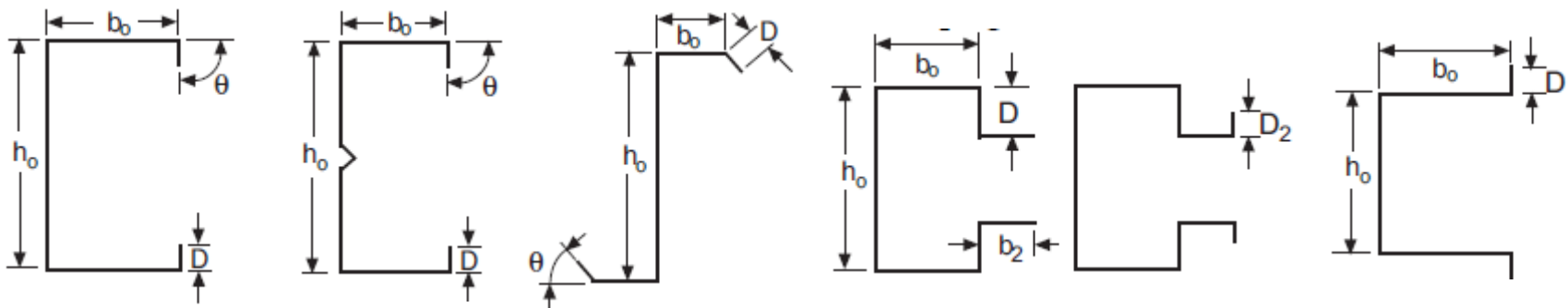
Métodos Alternativos

Métodos Alternativos

- Direct Strength Method (DSM)
 - Incluído na norma Americana
 - Para perfis de paredes finas
- Continuous Strength Method(CSM)
 - Inclui os efeitos benéficos do endurecimento por deformação
- Modelo de elementos finitos
 - Método mais tedioso
 - Pode incluir todas as especificidades do modelo

Direct Strength Method

- AISI Apêndice 1
- Método muito simples e direto
- Usado para seções de paredes finas

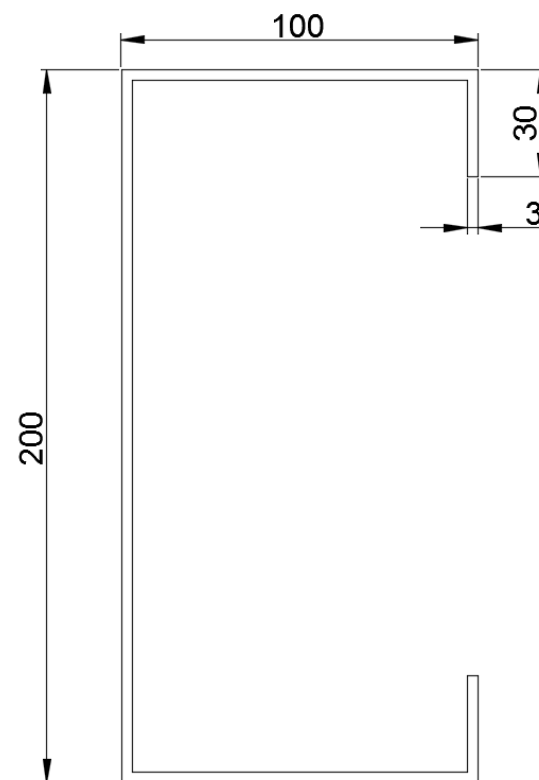


- Mas requer uma "análise da flambagem elástica "
 - Método teórico fornecido na literatura
 - Método de bandas finitas (por exemplo, CUFSM)
- Mais informações: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

Direct Strength Method – exemplo

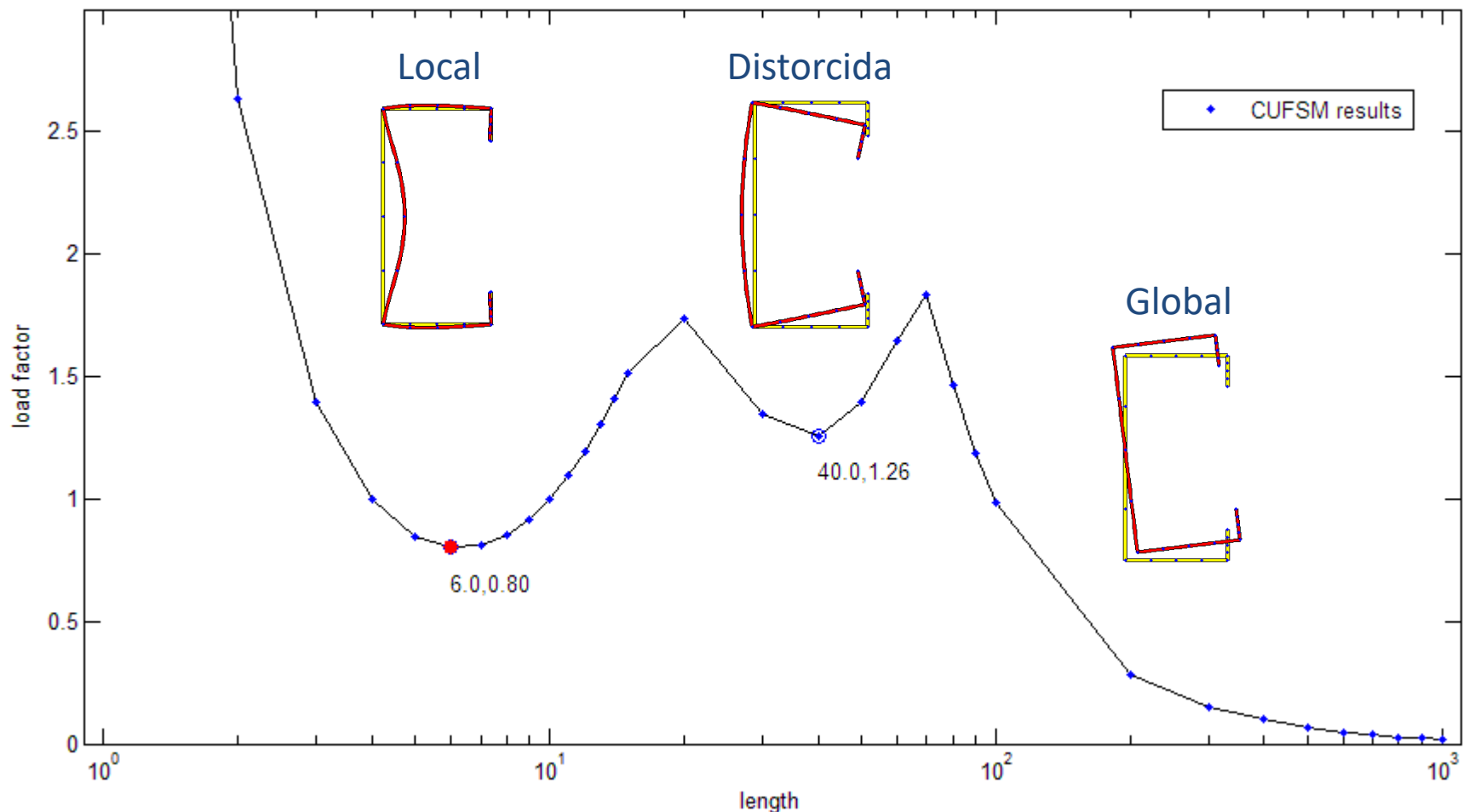
- Canal C labiado submetido à compressão
 - Pilar simplesmente apoiado
 - Altura do pilar: 5m

	Aço inoxidável ferrítico
Material	EN 1.4003
f_y [N/mm ²]	280
f_u [N/mm ²]	450
E [N/mm ²]	220000



Direct Strength Method – exemplo

- Primeiro passo: análise elástica da flambagem



Direct Strength Method – exemplo

- Resultado da análise = “carga de flexão elástica crítica”
 - No exemplo, os fatores de carga obtidos na análise do modo de flambagem são:
 - Para flambagem local: 0,80
 - Para flambagem distorcida: 1,26
 - Para flambagem global: 0,28

- Segundo passo: Cálculo das forças nominais para
 - Flambagem local $\Rightarrow$ uma equação
 - Flambagem por distorção $\Rightarrow$ uma equação
 - Flambagem global $\Rightarrow$ uma equação

Direct Strength Method – exemplo

- Resistência nominal de flambagem por flexão P_{ne}

- $\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} = 1,88$

- $P_y = A f_y = 376 \text{ kN}$

- $P_{cre} = 0,28 * 376 = 107 \text{ kN}$

For $\lambda_c \leq 1,5$

$$P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y$$

For $\lambda_c > 1,5$

$$P_{ne} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) P_y$$

- $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

Direct Strength Method – exemplo

- Resistência nominal frente a flambagem local P_{nl}

- $\lambda_l = \sqrt{P_{ne}/P_{crl}} = 0,56$

- $P_{crl} = 0,80 * 376 = 302 \text{ kN}$

For $\lambda_l \leq 0,776$

$$P_{nl} = P_{ne}$$

For $\lambda_l > 0,776$

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}$$

- $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$

Direct Strength Method – exemplo

- Resistência nominal frente a flambagem por distorção P_{nd}

- $\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} = 0,89$

- $P_{crd} = 1,26 * 376 = 473 \text{ kN}$

For $\lambda_d \leq 0,561$

$$P_{nd} = P_y$$

For $\lambda_d > 0,561$

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y$$

- $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$

Direct Strength Method – exemplo

- Terceiro passo: A resistência axial é “apenas” a menor das três forças nominais

- Local: $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$
- Distorcional: $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$
- Global: $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

$$\Rightarrow P_n = 93,81 \text{ kN}$$

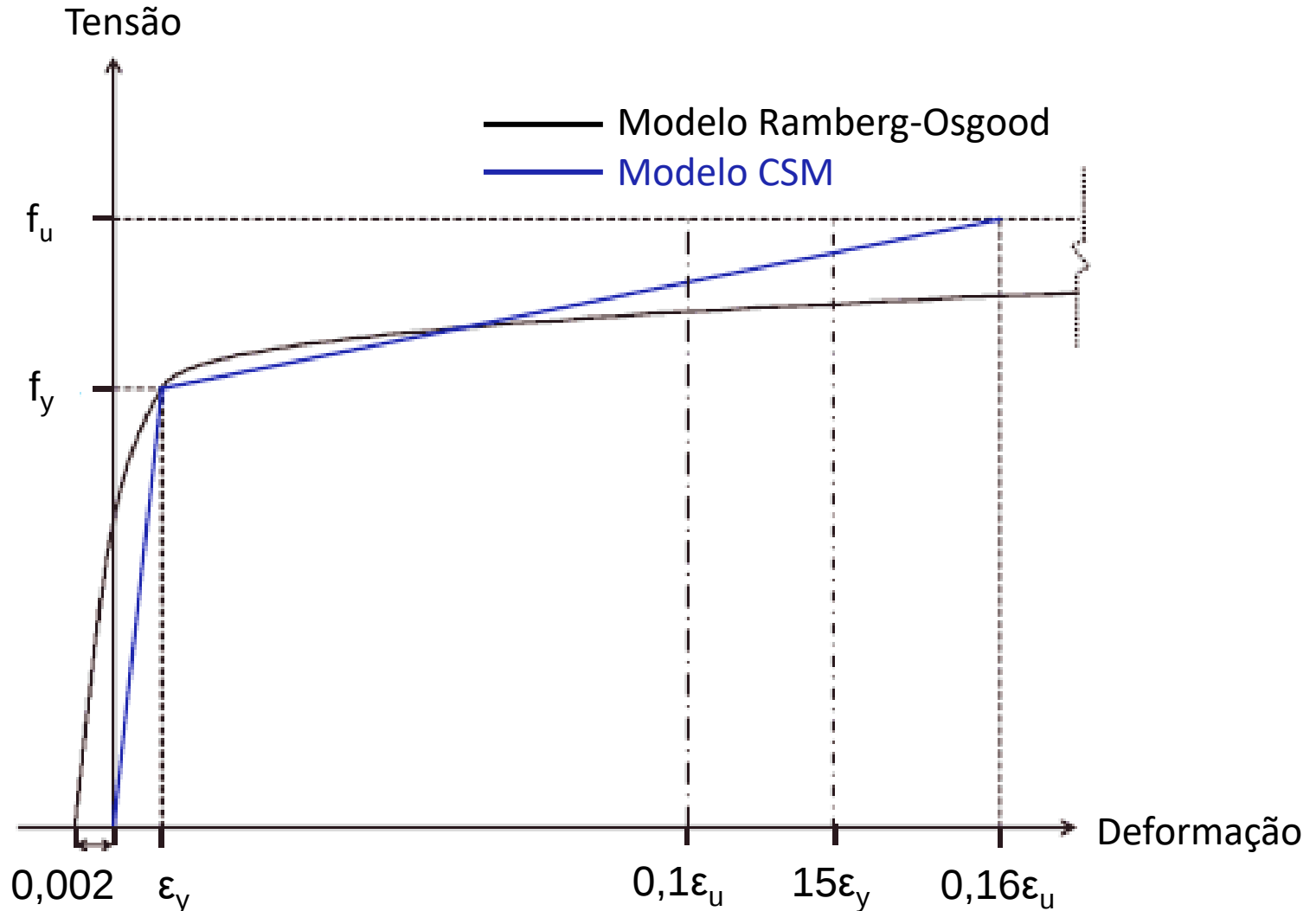
Continuous Strength Method

- Características do material Aço Inoxidável:
 - Modelo material não linear
 - Endurecimento por deformação
 - Os métodos de cálculo convencionais não são capazes de levar em consideração todo o potencial da seção transversal

O Continuous Strength Method
utiliza um modelo material que
inclui endurecimento por
deformação

Continuous Strength Method

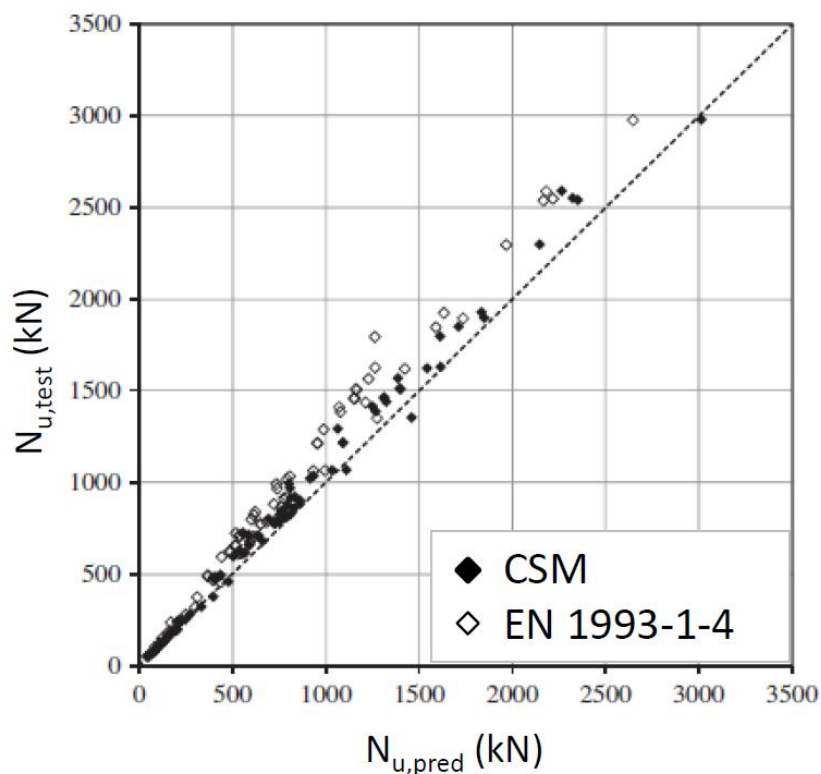
- Modelo material considerado no CSM:



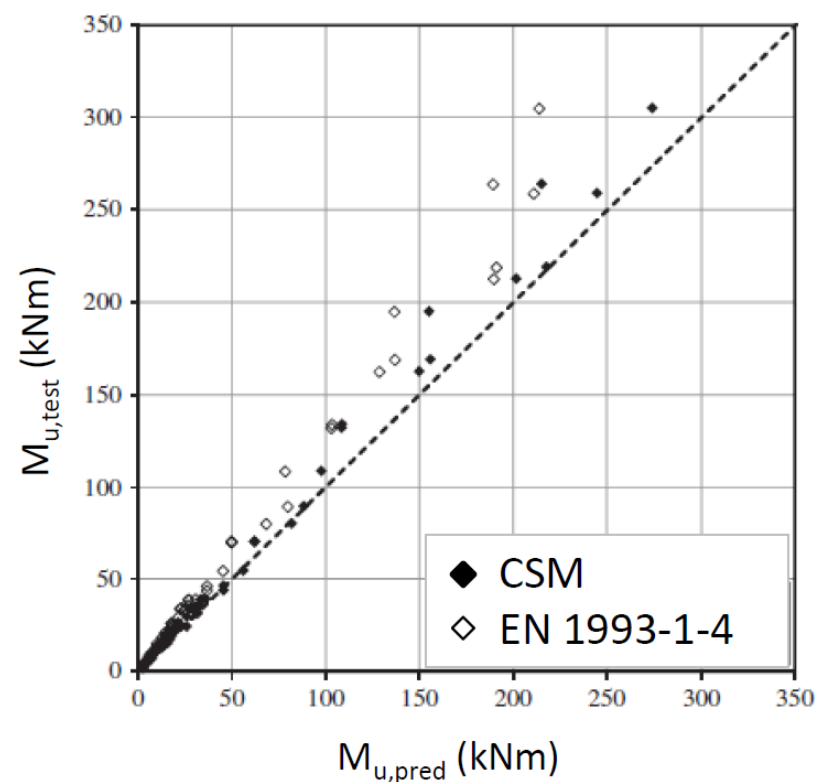
Continuous Strength Method

- Comparação entre as previsões do EC3 e do CSM versus testes:

Em compressão



Em flexão

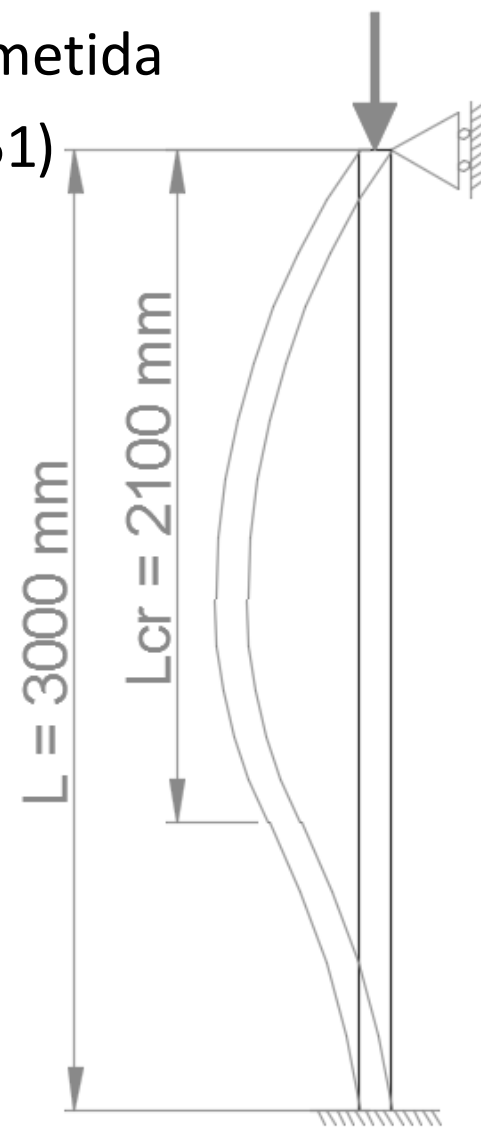
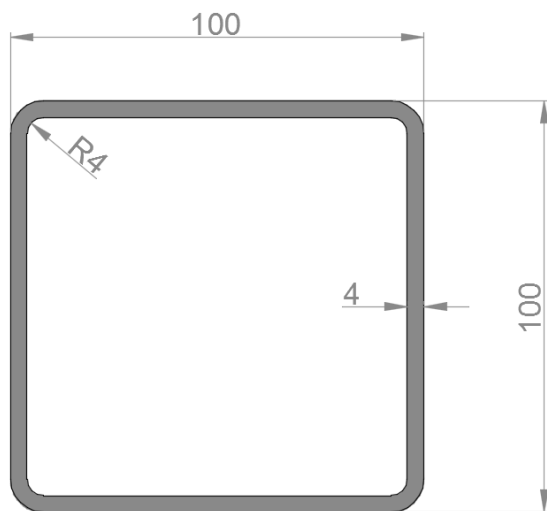


O CSM é capaz de capturar com precisão o comportamento da seção transversal

MFC: Exemplo de flambagem por flexão

- Seção oca retangular conformada a frio submetida a compressão concêntrica (exemplo do slide 51)

Aço inoxidável austenítico	
Material	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	230
E [N/mm ²]	200000



MFC: Exemplo de flambagem por flexão

$$f_y = 230 \text{ N/mm}^2$$

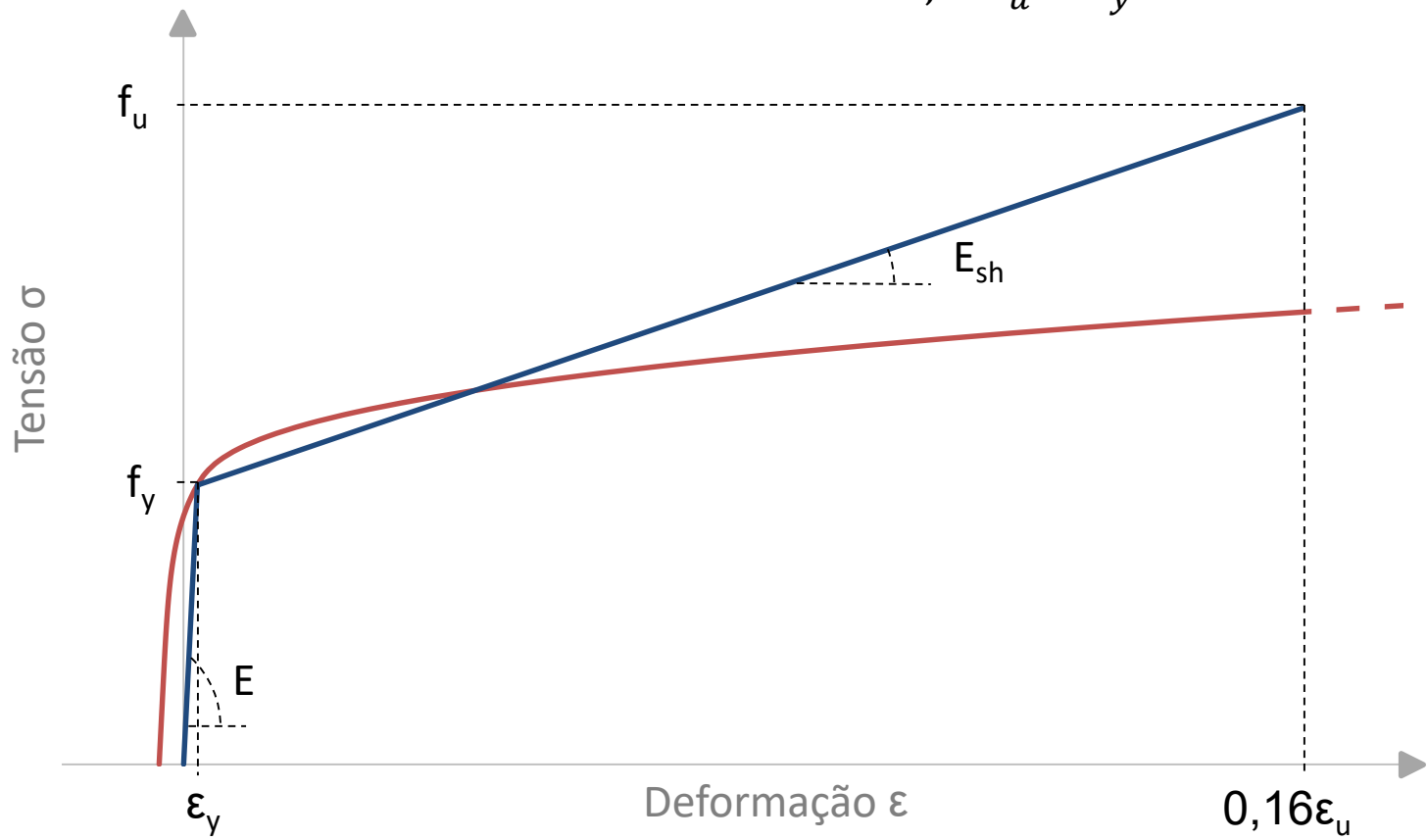
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_y = f_y / E = 0,0012$$

$$f_u = 540 \text{ N/mm}^2$$

$$0,16\varepsilon_u = 0,16(1 - f_y/f_u) = 0,0919$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = 3418 \text{ N/mm}^2$$



MFC: Exemplo de flambagem por flexão

$$f_y = 230 \text{ N/mm}^2$$

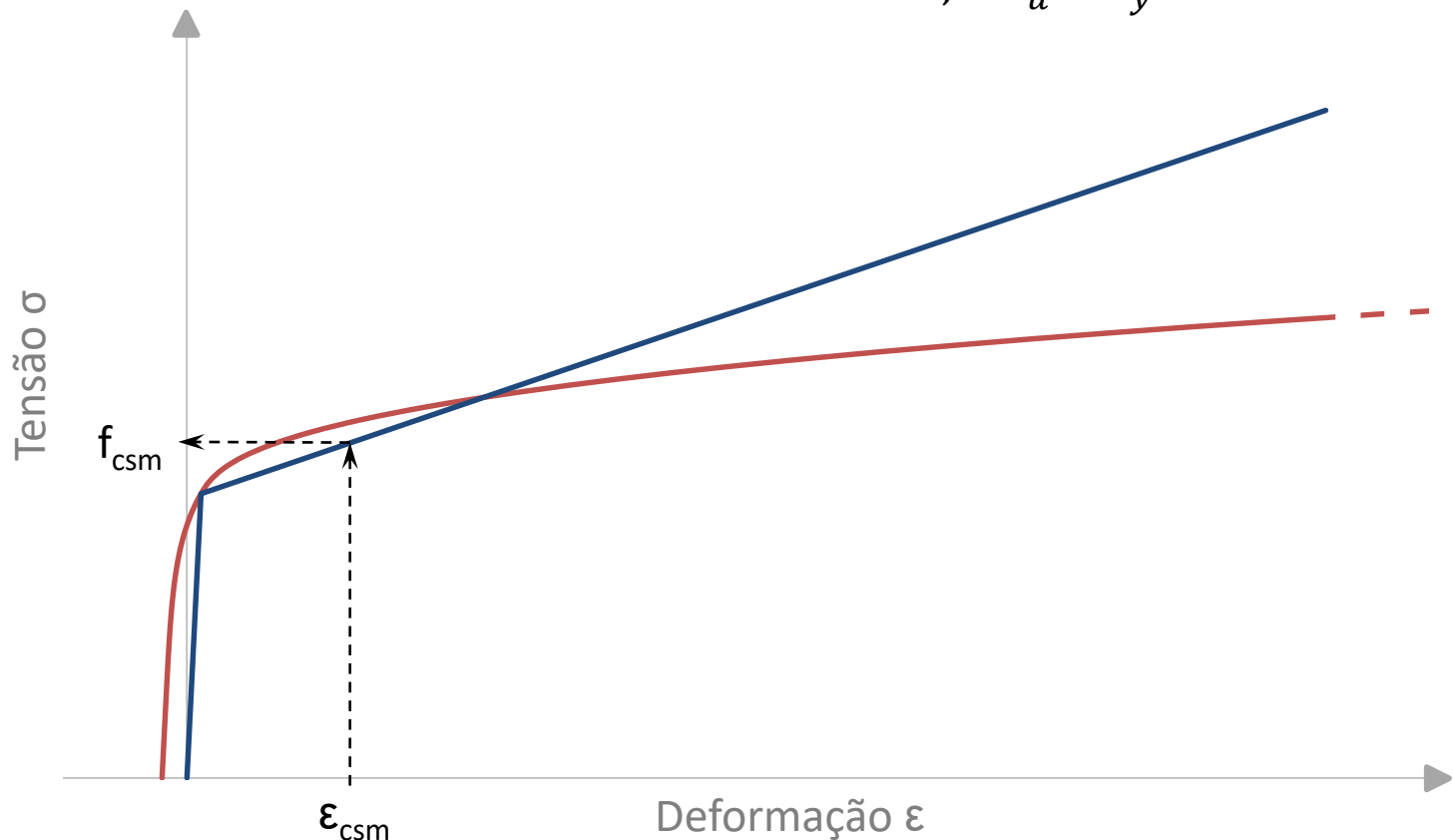
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_y = f_y / E = 0,0012$$

$$f_u = 540 \text{ N/mm}^2$$

$$0,16\varepsilon_u = 0,16(1 - f_y/f_u) = 0,0919$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = 3418 \text{ N/mm}^2$$



MFC: Exemplo de flambagem por flexão

- $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} = 0,60$

— $\sigma_{cr,cs}$ = Tensão crítica de flambagem da seção transversal bruta considerando a interação entre elementos

- $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} = 5,27$

- $f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 247 \text{ N/mm}^2$

- $N_{c,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} = 335 \text{ kN}$

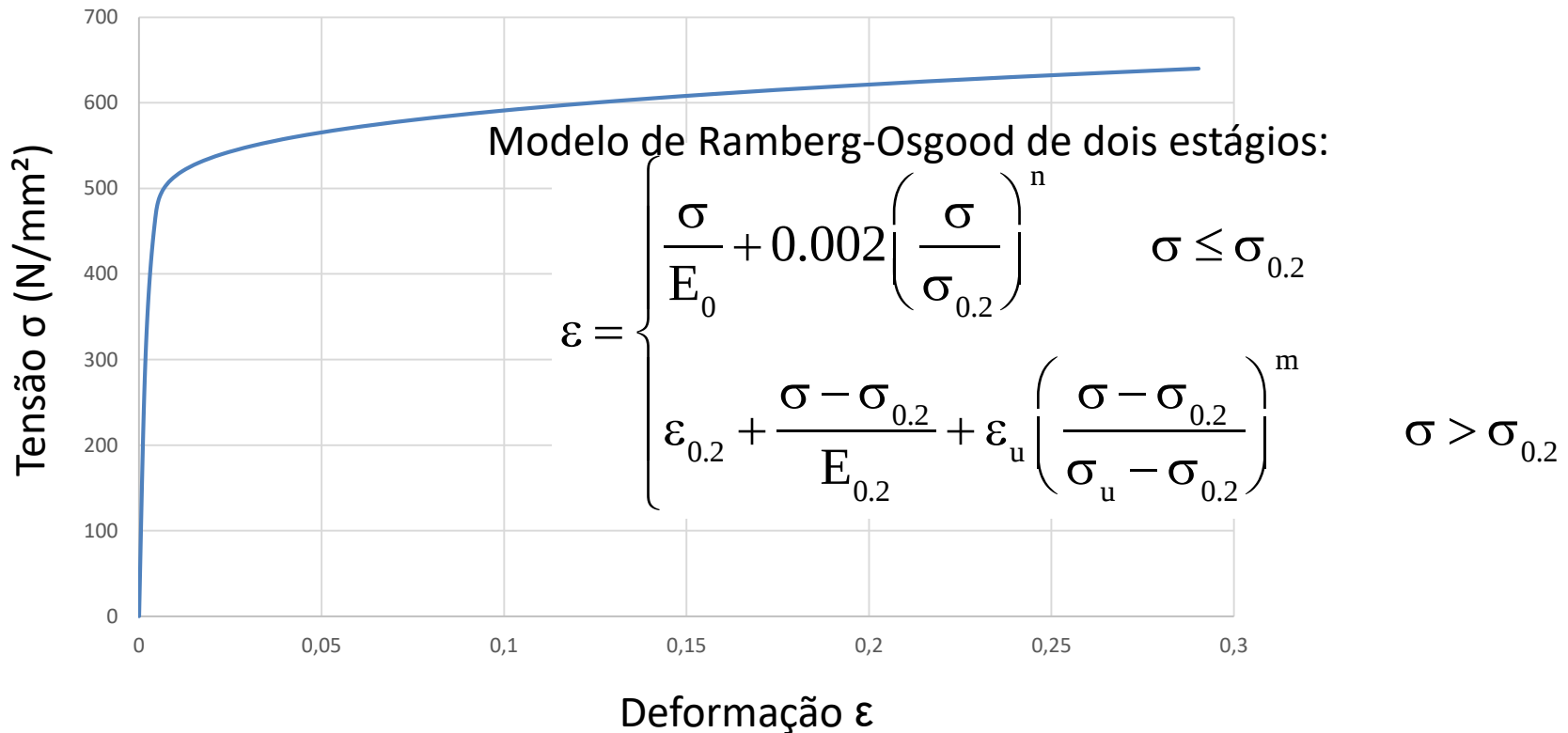
MFC: Exemplo de flambagem por flexão

- $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_{csm}}{N_{cr}}} = 0,60$
- $N_{b,Rd} = \chi \frac{Af_{csm}}{\gamma_{M1}} = 294 \text{ kN}$

	EC 3-1-1: S235	MFC: Austenítico	EC 3-1-4: Austenítico
$f_y \text{ [N/mm}^2\text{]}$	235	230	230
$\gamma_{M0} \text{ [-]}$	1,0	1,1	1,1
$\gamma_{M1} \text{ [-]}$	1,0	1,1	1,1
Seção transversal $N_{c,Rd} \text{ [kN]}$	351	335	313
Estabilidade $N_{b,Rd} \text{ [kN]}$	281	294	277

Modelo de elementos finitos

- A curva de tensão-deformação do material pode ser modelada com precisão (por exemplo, usando o modelo de Ramberg-Osgood ou a partir da curva experimental "real" obtida a partir de testes)



Modelo de elementos finitos

- Os parâmetros não-lineares são dados pelas seguintes expressões (de acordo com a revisão de Rasmussen):

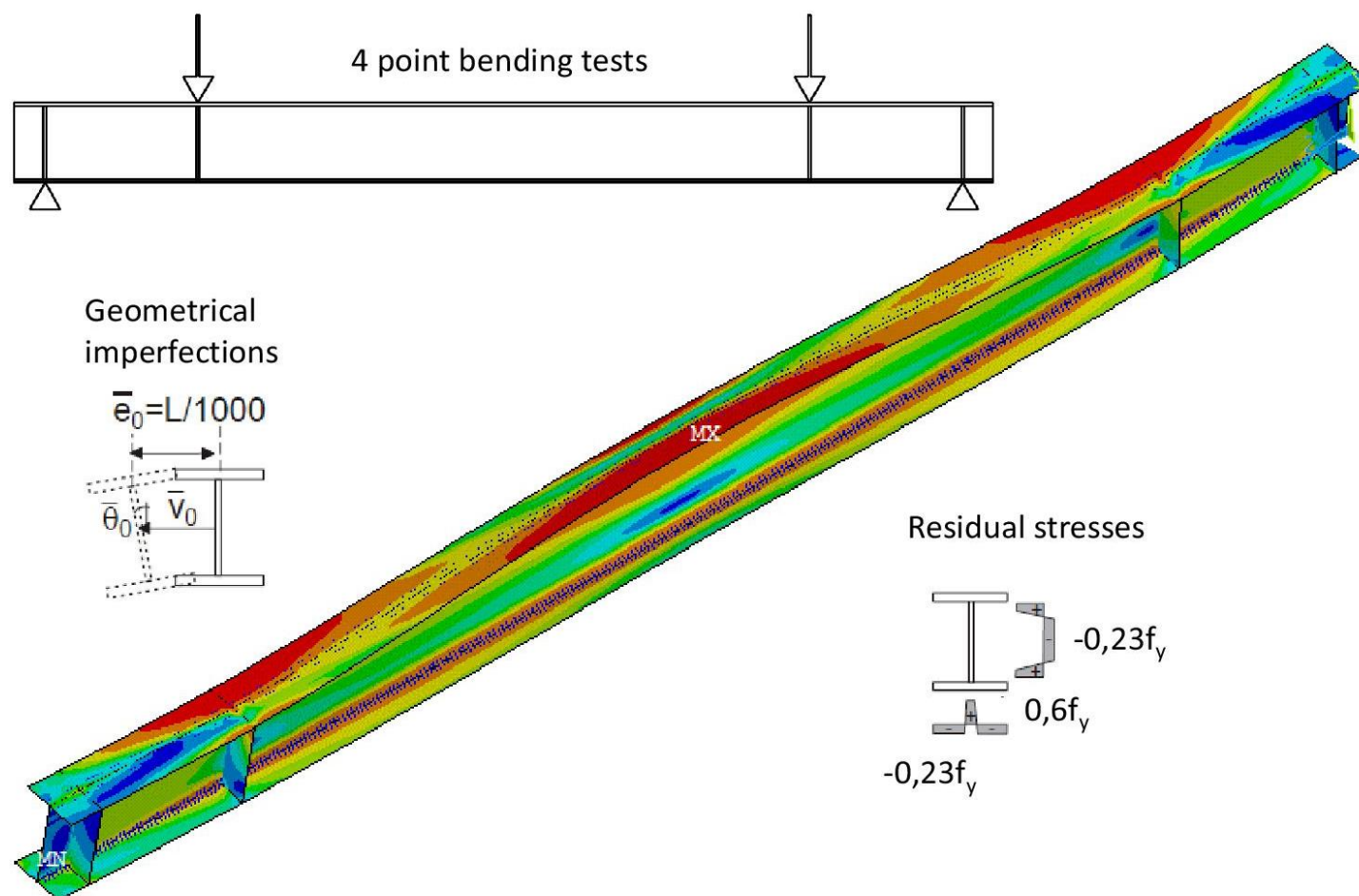
$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n \frac{E_0}{\sigma_{0.2}}}$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u}$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = \begin{cases} 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} & \text{Para austeníticos e duplex} \\ \frac{0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}}{1 - 0.0375(n - 5)} & \text{Para todas as ligas de aço inoxidável} \end{cases}$$

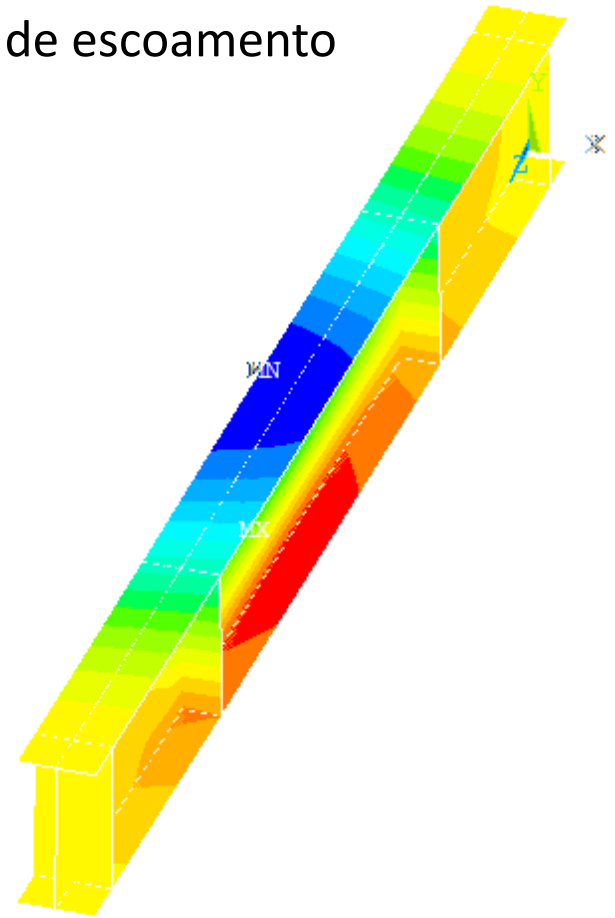
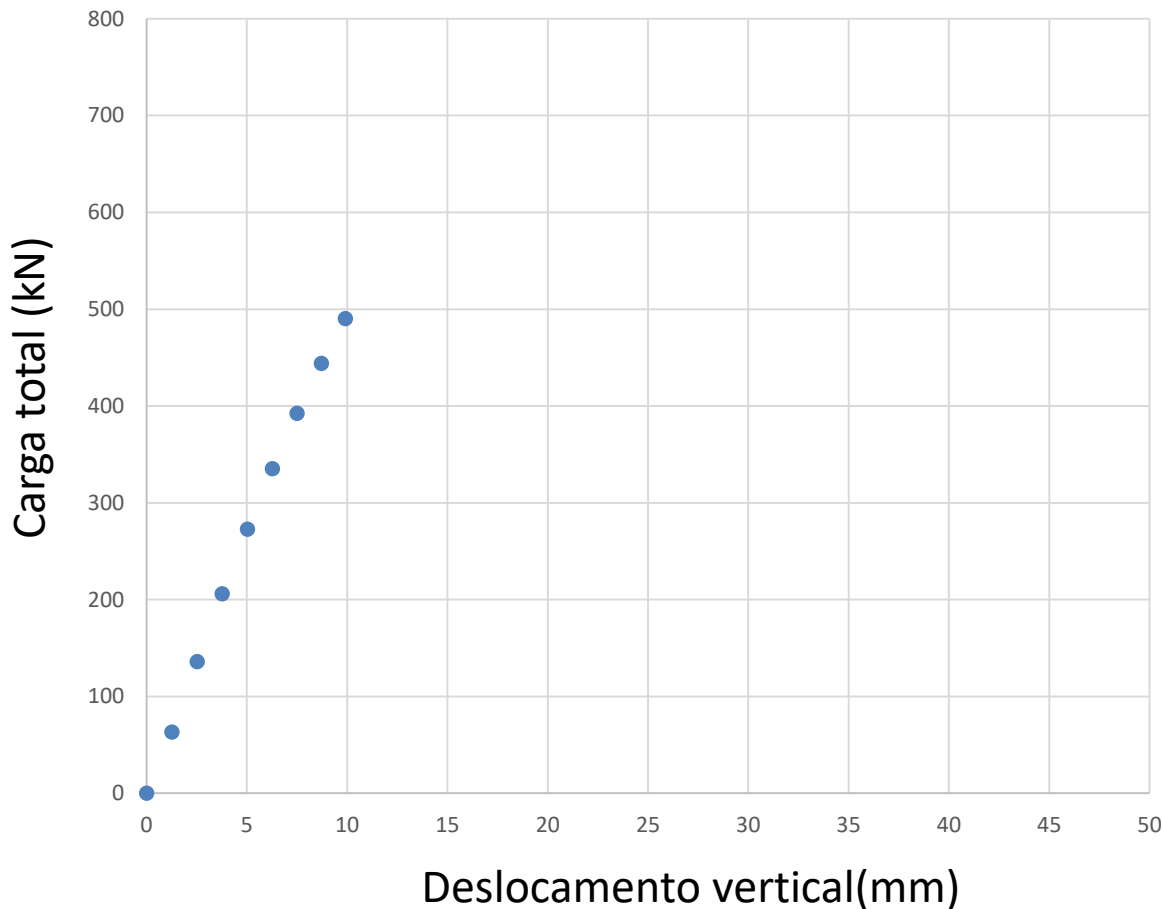
Modelo de elementos finitos

- Viga em forma de I submetida a flexão sofrendo flambagem lateral por torção: todas as imperfeições podem ser modeladas



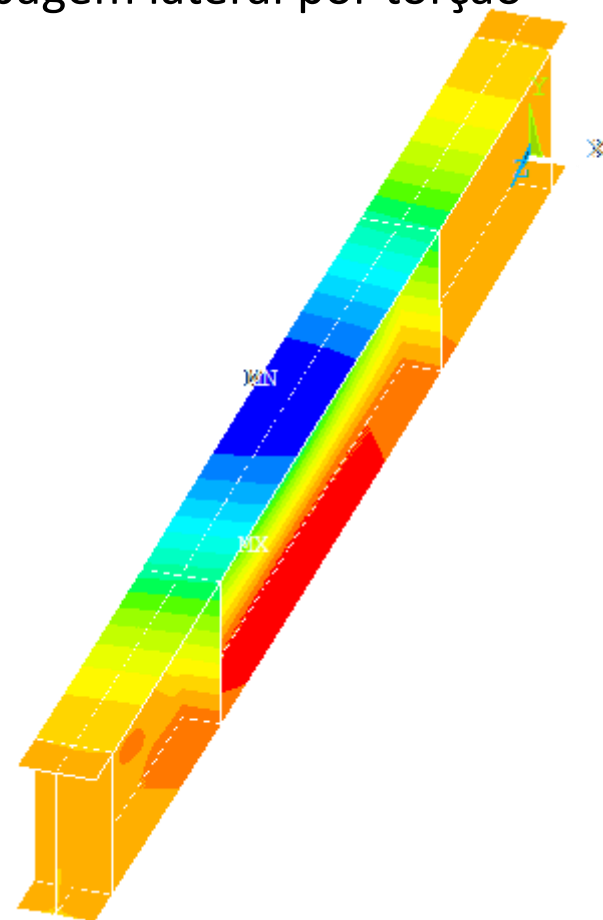
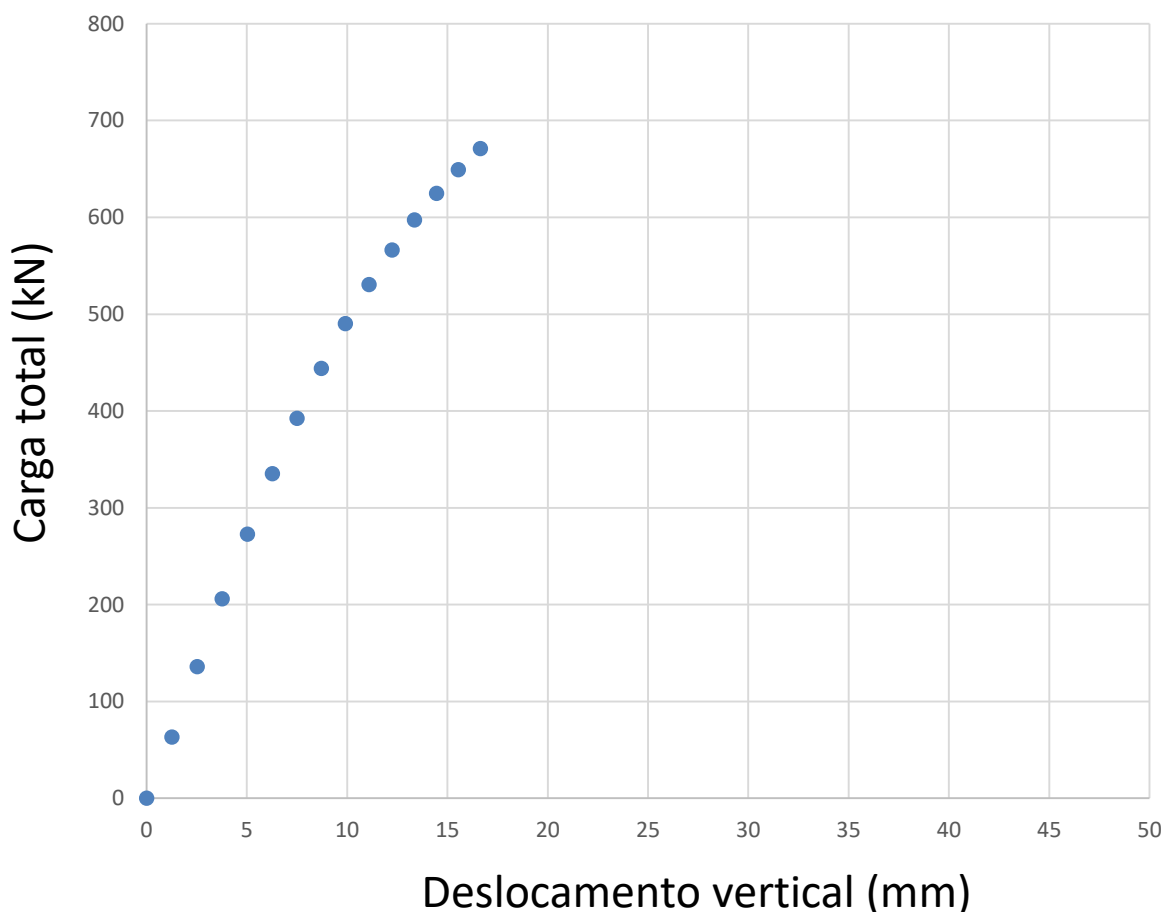
Modelo de elementos finitos

- A curva carga-deflexão pode ser calculada
 - Resultados: comportamento elástico e início de escoamento



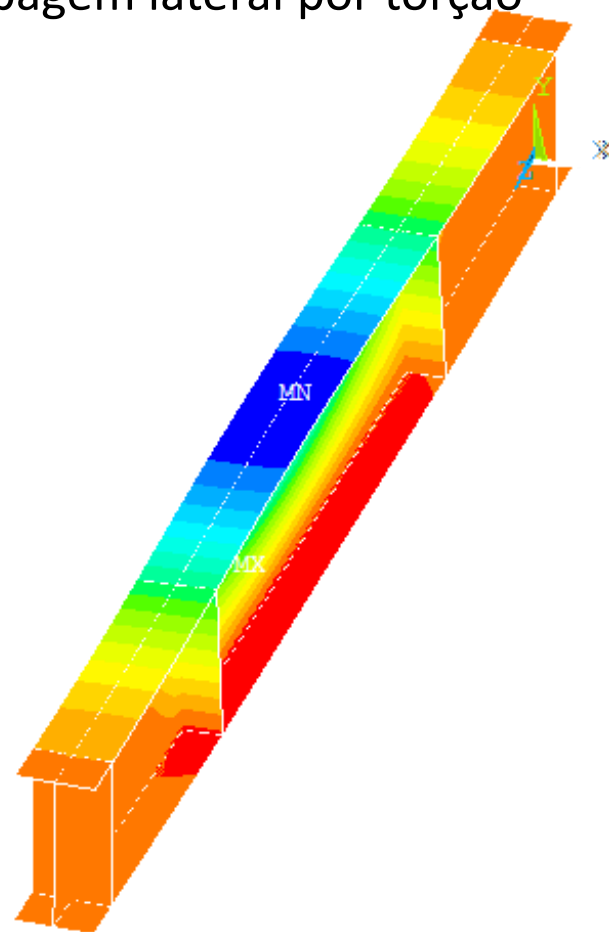
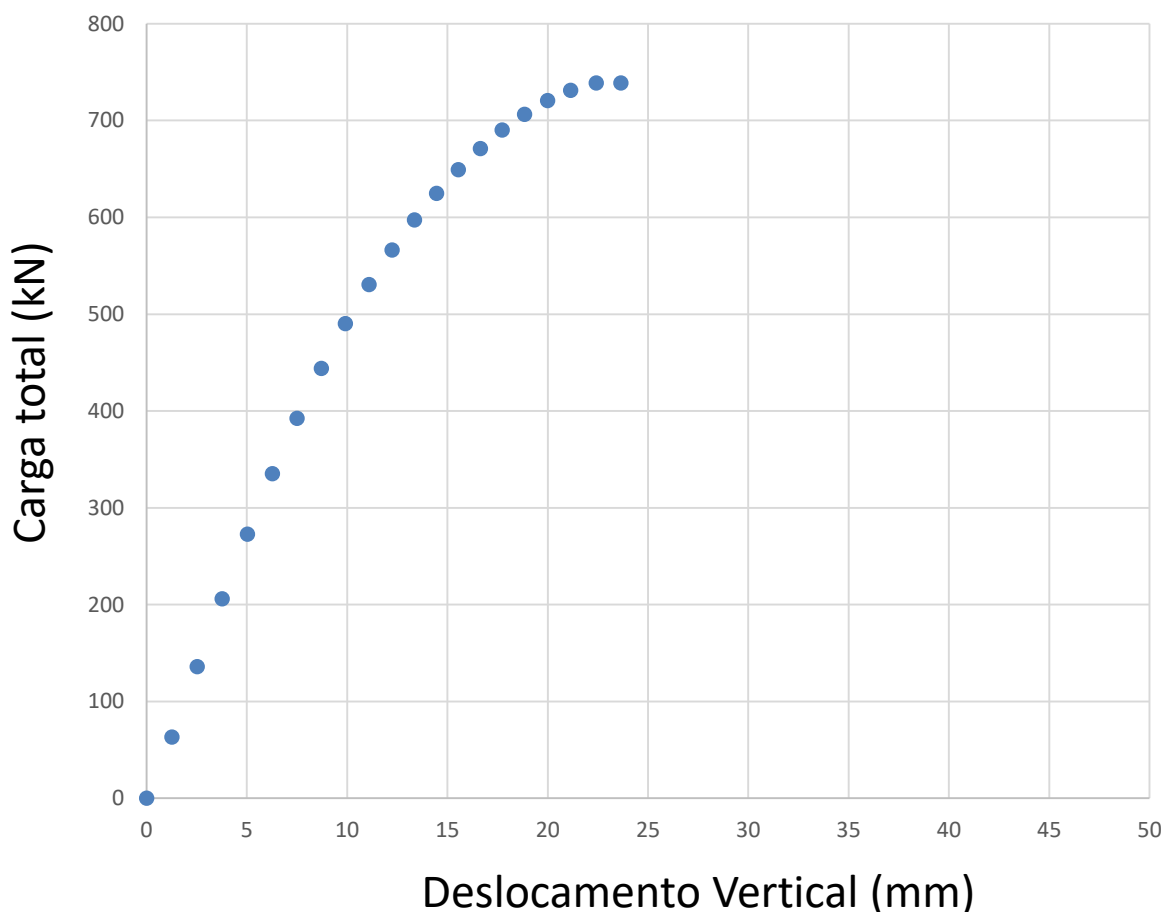
Modelo de elementos finitos

- A curva carga-deflexão pode ser calculada
 - Resultados: fenômeno de instabilidade => flambagem lateral por torção



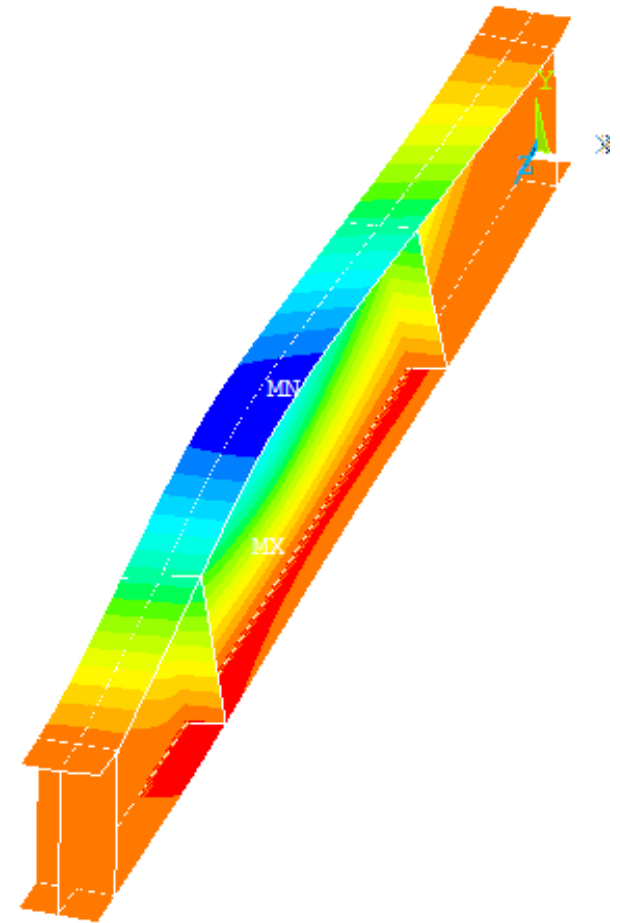
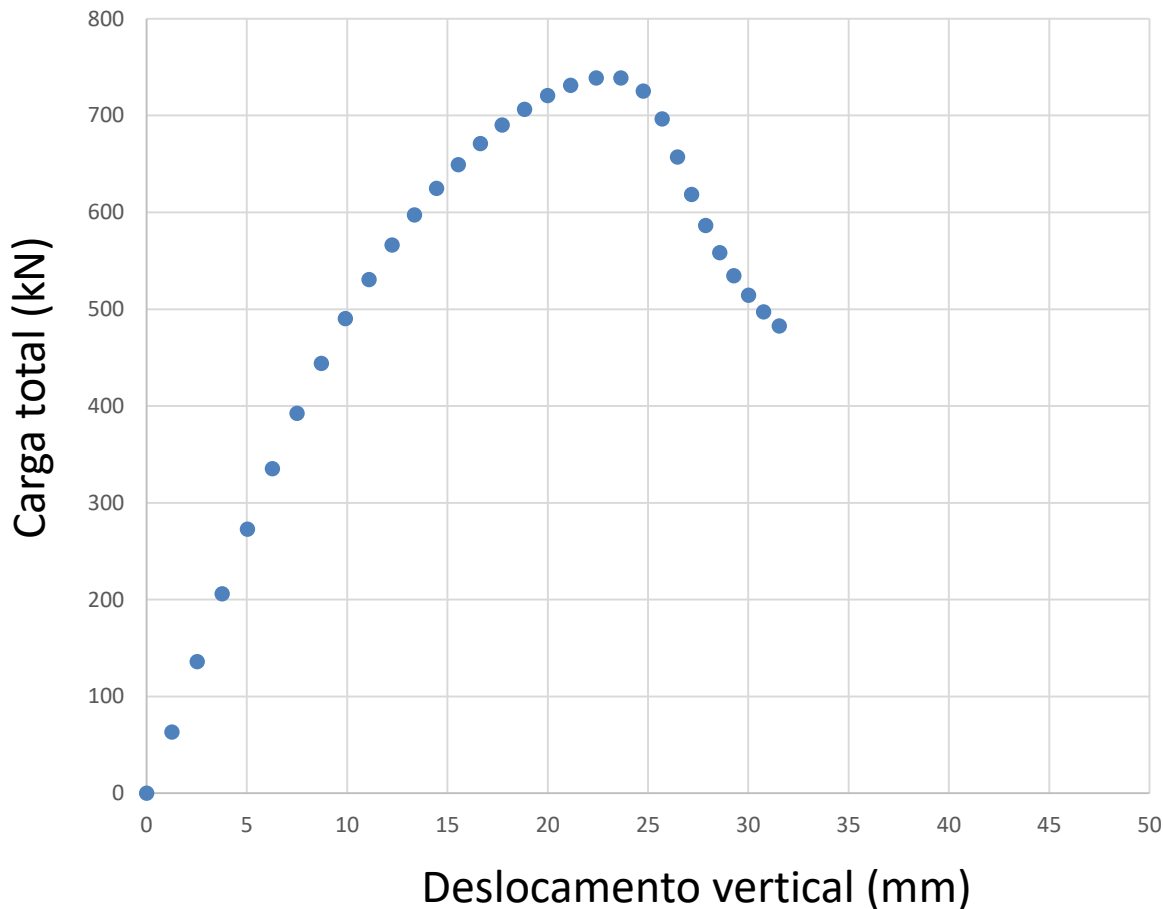
Modelo de elementos finitos

- A curva carga-deflexão pode ser calculada
 - Resultados: fenômeno de instabilidade => flambagem lateral por torção



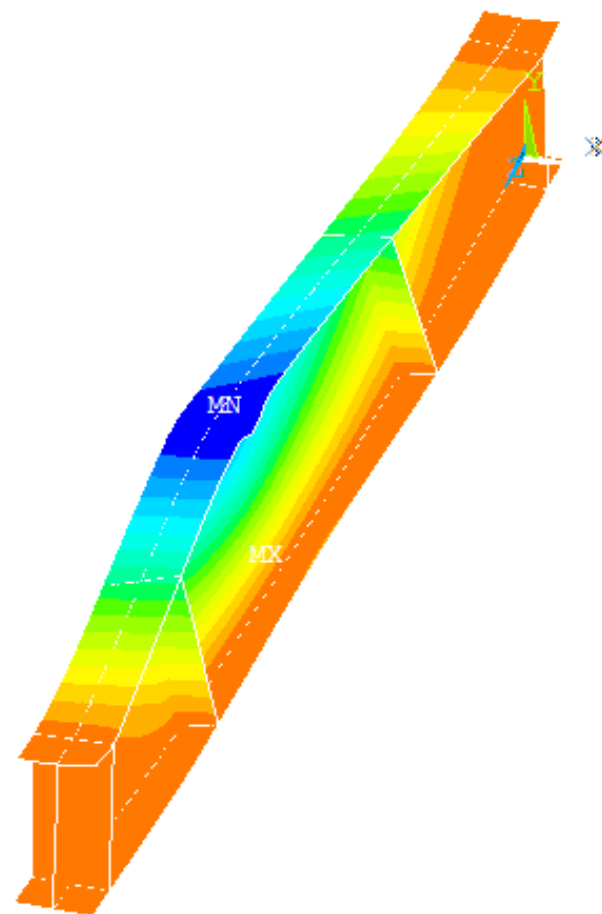
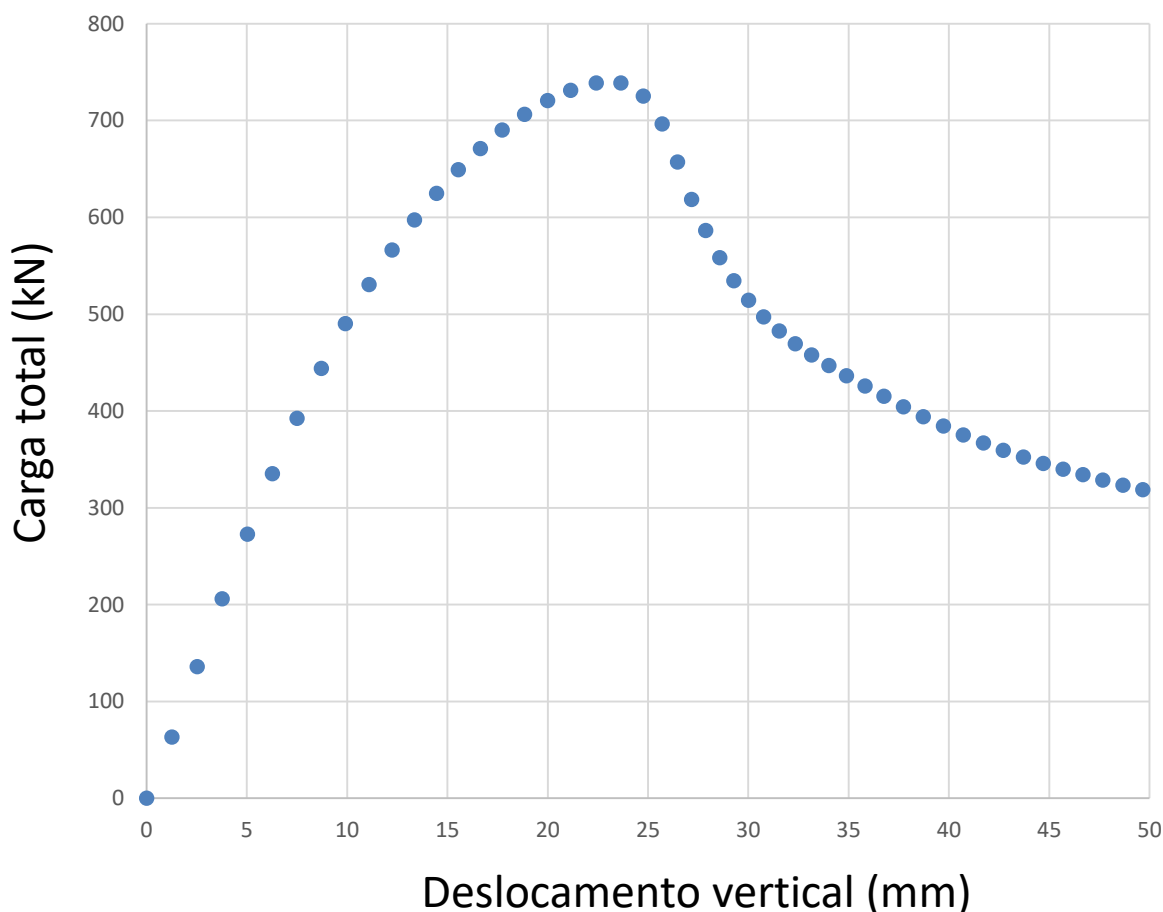
Modelo de elementos finitos

- A curva carga-deflexão pode ser calculada
 - Resultados: comportamento pós flambagem

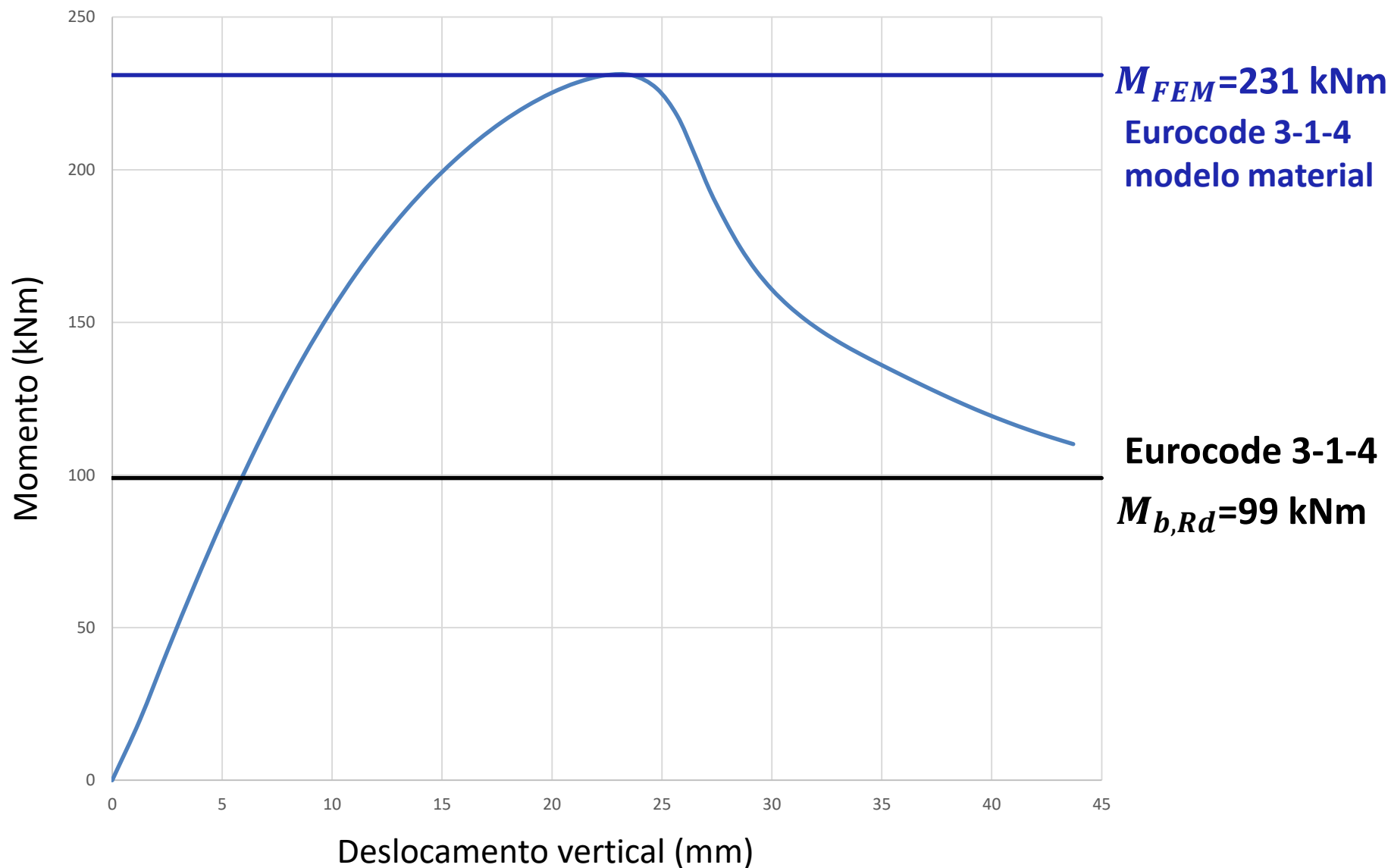


Modelo de elementos finitos

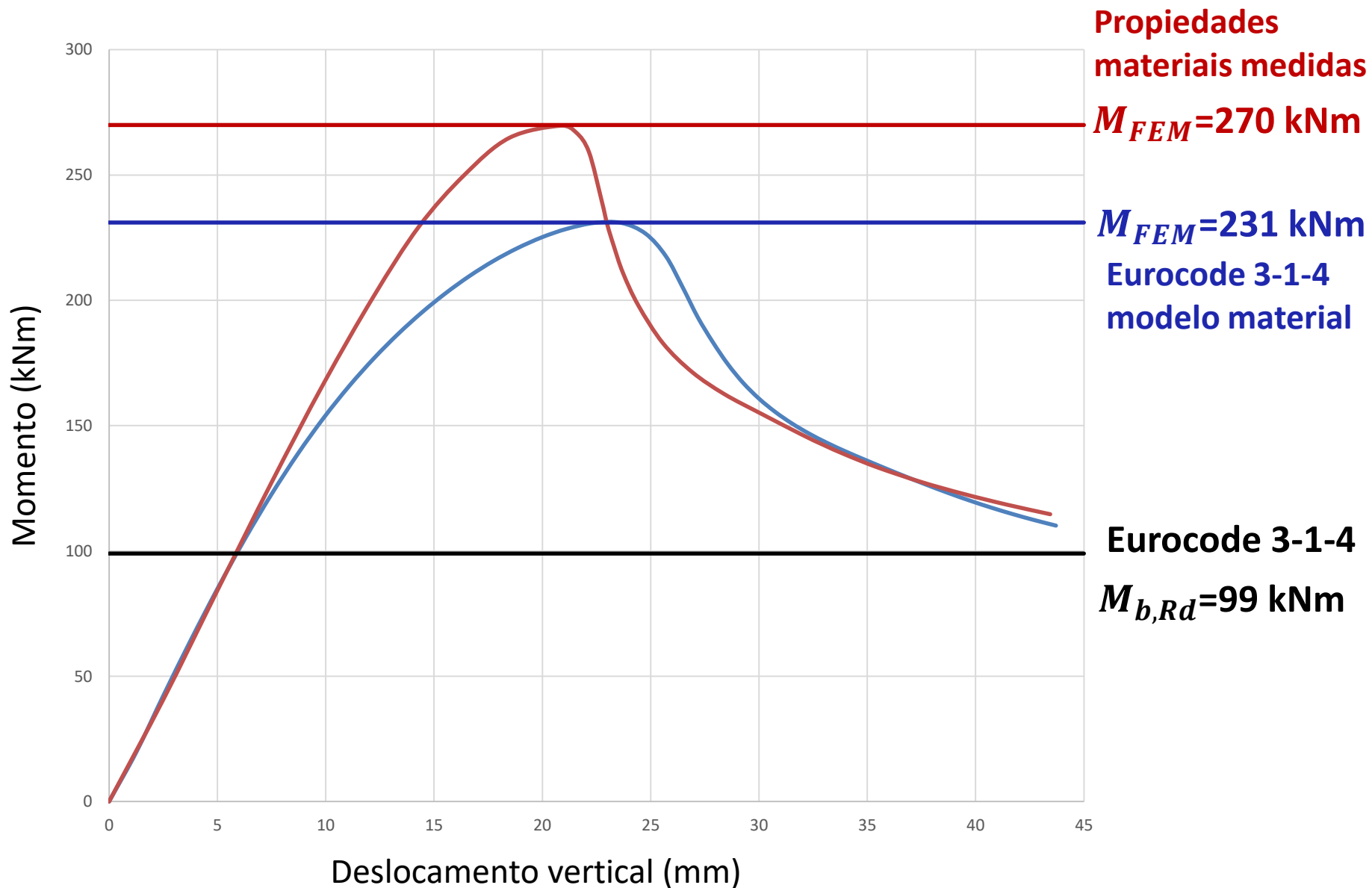
- A curva carga-deflexão pode ser calculada
 - Resultados: comportamento pós flambagem



Modelo de elementos finitos



Modelo de elementos finitos



Seção 5

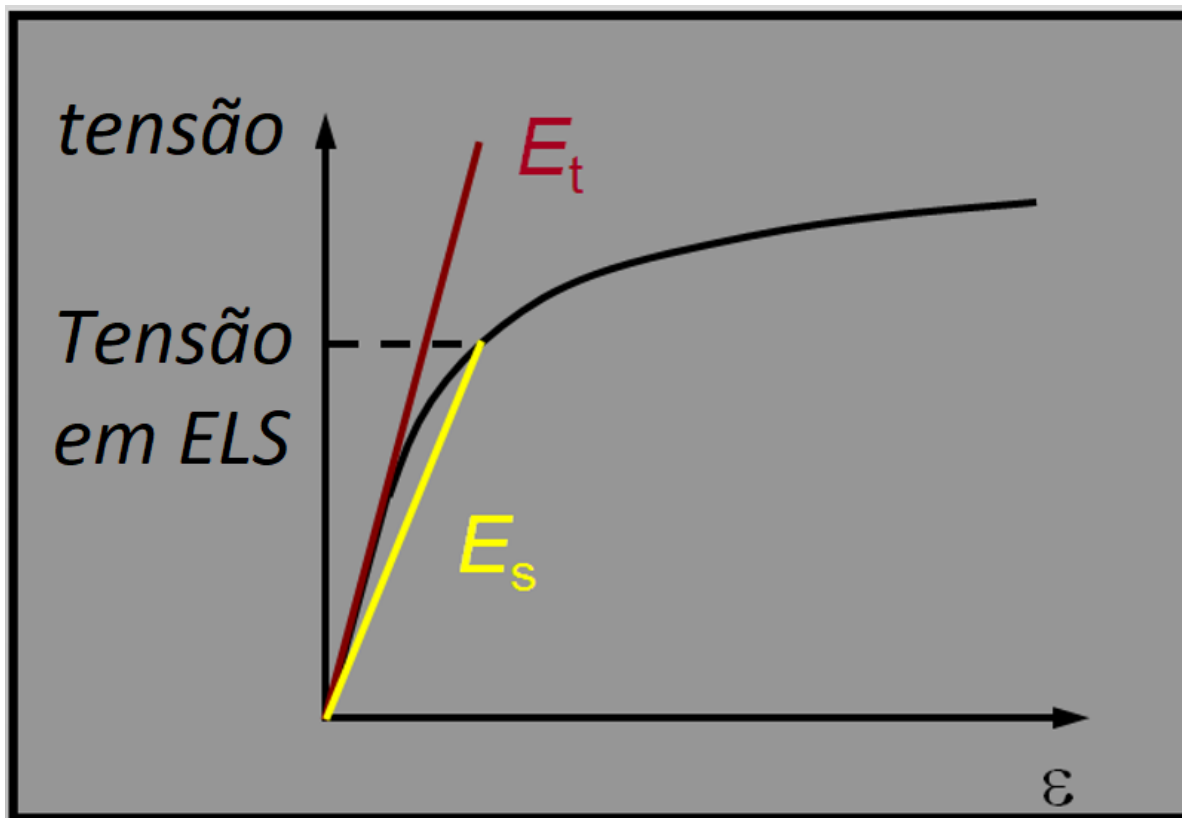
Deflexões

Deflexões

- Curva tensão-deformação não linear significa que a rigidez do aço inoxidável ↓ enquanto a tensão ↑
- As deflexões são ligeiramente superiores no aço inoxidável do que no aço carbono
- Use o módulo secante correspondente à tensão no elemento no Estado Limite de Serviço (ELS)

Defexões

Módulo secante E_s para a tensão no elemento em ELS



Defexões

Módulo secante E_s determinado a partir do modelo de Ramberg-Osgood:

$$E_s = \frac{E}{1 + 0.002 \frac{E}{f} \left(\frac{f}{f_y} \right)^n}$$

f é a tensão no estado limite de serviço

n é uma constante do material

Deflexões em uma viga de aço inoxidável austenítico

Relação de tensão f/f_y	Módulo secante, E_s N/mm ²	% aumento na deflexão
0.25	200,000	0
0.5	192,000	4
0.7	158,000	27

f = tensão no estado limite de serviço

Seção 6

Informação adicional

Resposta ao carregamento sísmico

- Maior ductilidade (*aço inoxidável* austenítico) + suporta maior número de ciclos de carga
→ maior dissipação de energia histerética sob carga cíclica
- Maior encruamento
→ favorece o desenvolvimento de zonas plásticas maiores e deformáveis
- Dependência maior da taxa de deformação
→ maior resistência para maiores taxas de deformação

Projeto de conexões aparafusadas

- A resistência mecânica e à corrosão dos parafusos e o material das peças a serem unidas devem ser semelhantes
- Parafusos de aço inoxidável devem ser usados para conectar elementos de aço inoxidável para evitar corrosão bimetálica
- Parafusos de aço inoxidável também podem ser usados para conectar elementos de aço galvanizado e alumínio

Projeto de conexões aparafusadas

- As diretrizes para parafusos de aço carbono podem ser aplicadas ao aço inoxidável em geral (tração, cisalhamento)
- Devido à alta ductilidade do aço inoxidável, as deformações devem ser limitadas por regras especiais, para a máxima resistência

$$f_{u,\text{red}} = 0.5f_y + 0.6f_u < f_u$$

Parafusos protendidos

Úteis em estruturas como pontes, torres, mastros etc quando:

- a conexão está sujeita a cargas vibratórias,
- o deslizamento entre as peças de união deve ser evitado,
- a carga aplicada frequentemente muda de um valor positivo para um negativo
- Não existem normas do projeto para parafusos protendidos de aço inoxidável
- Os testes devem sempre ser realizados

Projeto de conexões soldadas

- As diretrizes para o aço carbono geralmente podem ser aplicadas ao aço inoxidável
- Use o consumível correto para o tipo de aço inoxidável
- O aço inoxidável pode ser soldado ao aço carbono, mas é necessária uma preparação especial

Resistência à fadiga

- O comportamento de fadiga das juntas soldadas é governado pela geometria da solda
- O desempenho do aço inoxidável austenítico e do duplex é pelo menos tão bom quanto o do aço carbono
- Siga as diretrizes para o aço carbono

Seção 7

Recursos para engenheiros

Recursos para engenheiros

- Centro de Informações Online
- Estudo de casos
- Guias de projetos
- Exemplos de projetos
- Software



A CENTURY OF INNOVATION

From small beginnings a hundred years ago, stainless steel has grown to be an integral part of our lives. Utilised primarily for its corrosion resistance, stainless steel is also found in applications where strength, innovation and aesthetics are important.

[VIEW WEBSITE](#)

ONLINE INFORMATION
CENTRE FOR STAINLESS
STEEL IN CONSTRUCTION

[VIEW WEBSITE](#)

DESIGN MANUAL FOR
STRUCTURAL STAINLESS
STEEL

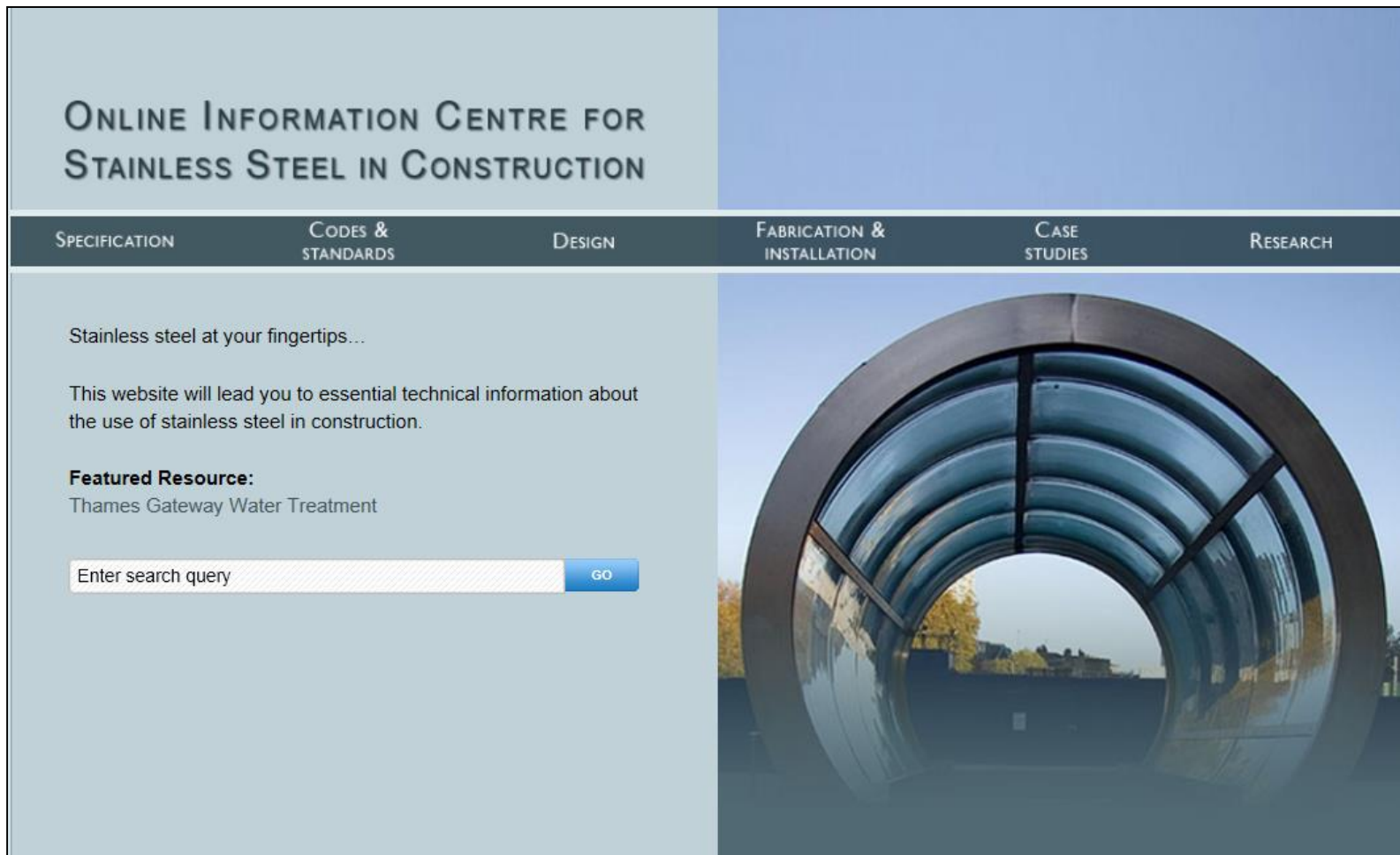
[VIEW PUBLICATION](#)

STRUCTURAL STAINLESS
STEEL CASE STUDIES

[VIEW CASE STUDIES](#)

Centro de Informações para o uso de aço inoxidável na construção

www.stainlessconstruction.com



12 estudos de casos de aplicações estruturais

www.steel-stainless.org/CaseStudies



Structural Stainless Steel Case Study 01

Stonecutters Bridge Towers

Stonecutters Bridge, Hong Kong, is a cable stayed structure with a total length of 1596 m and a main span of 1018 m. The bridge crosses the Rambler Channel and is the main entrance to the busy Kwai Chung Container Port. It is visible from many parts of Hong Kong Island and Kowloon. The most striking features of the bridge are the twin tapered mono towers at each end supporting the 50 m wide deck. These tapered towers rise to 295 m above sea level; the lower sections are reinforced concrete while the upper 115 m are composite sections with an outer stainless steel skin and a reinforced concrete core.

Material Selection



Figure 1: General view of Stonecutters Bridge

The design life of the bridge is 120 years. A highly durable material was required for the upper sections of the bridge towers because of the harsh marine and polluted environment. Additionally, post-construction maintenance on the towers will be extremely difficult, due to the live traffic beneath. Stainless steel was chosen for the skin of the composite section of the upper tower because of its durability and also its attractive appearance. Carbon steel would have required protective coatings that would have needed replacing after an estimated 25-30 years.



Figure 2: Mono tower and stay cables

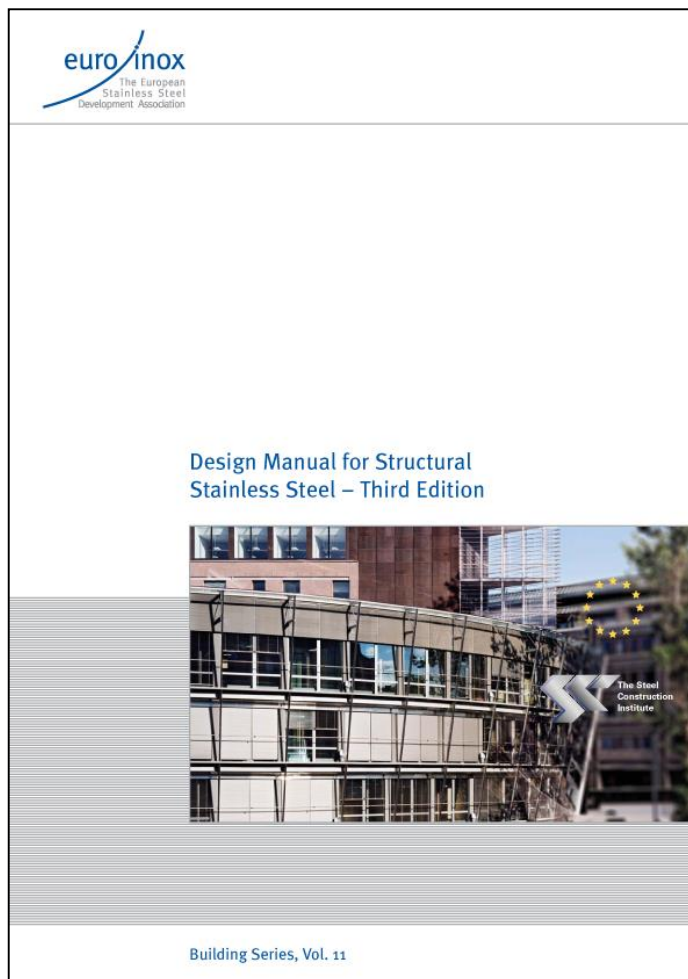
A polished 1K finish (as defined in EN 10089 Part 2 [1]) was specified for all exposed surfaces, with an average surface roughness R_a of 0.5 μm . A slightly textured, non-directional, low reflective appearance was then created by shot peening the surface with a mixture of aluminium oxide and glass beads.

Standard molybdenum-alloyed austenitic steel grades were initially considered but discounted because of their relatively low design strength (220 N/mm²) and uncertainty regarding corrosion performance, given the roughness of the desired surface finish. Higher alloyed austenitics with better corrosion resistance, e.g. 1.4539 (N08904) and 1.4439 (S31726), were not considered in detail as they would not have met the requirements for cost, availability and strength. Duplex steel 1.4462 (S32205) was chosen as it has high strength (460 N/mm²) with good corrosion resistance and tolerance on surface finish.

Structural Stainless Steel Case Study 01Page 1



Guia de projeto para Eurocódigo



www.steel-stainless.org/designmanual

- Guia
- Comentários
- Exemplos de projetos

Software de projetos on line:

www.steel-stainless.org/software

Resumo

- Desempenho estrutural :
semelhante ao aço carbono, mas algumas modificações necessárias devido à curva tensão-deformação não-linear
- Normas de projetos foram desenvolvidas
- Recursos (guias de projetos, estudos de caso, exemplos, software) estão disponíveis gratuitamente!

Referências

- EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures – Part1-1: General rules and rules for buildings. 2005
- EN 1993-1-4. Eurocode 3: Design of steel structures – Part1-4: Supplementary rules for stainless steel. 2006
- EN 1993-1-4. Eurocode 3: Design of steel structures – Part1-4: Supplementary rules for stainless steel. Modifications 2015
- M. Fortan. Lateral-torsional buckling of duplex stainless steel beams - Experiments and design model. PhD thesis. 2014-...
- AISI Standard. North American specification Appendix 1: Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using the Direct Strength Method. 2007
- B.W. Schafer. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 766-778
- S.Afshan, L. Gardner. The continuous strength method for structural stainless steel design. Thin-Walled Structures 68 (2013) 42-49

Obrigado!

Barbara Rossi – barbara.rossi@kuleuven.be

Maarten Fortan – maarten.fortan@kuleuven.be

Teste seus conhecimentos sobre Aços Inoxidáveis aqui:

<https://www.surveymonkey.com/r/3BVK2X6>