

Material didactico para docentes en
Arquitectura o Ingenieria Civil

Capítulo 7A:
**Aplicaciones estructurales
del corrugado de acero
inoxidable**

Una mala elección de materiales
puede derivar en graves problemas





Un caso de estudio: Corrosión en el intercambiador de la autopista Turcot en Montreal ^{1,2}

- Un intercambiador clave entre las autopistas Decarie (Norte-Sur) y Ville Marie (Este-Oeste), construidas en 1966.
- Cerca de 300,000 vehiculos al día
- Construido en hormigón armado muy corroidos actualmente como consecuencia de las sales de deshielo

Tiene que ser reemplazado

- A pesar de la constantes supervisiones y reparaciones, tiene que ser retirado o parcialmente reemplazado
 - Coste estimado más de CAD 3000M.
 - Además, otros CAD 254M serán necesarios para asegurar la seguridad hasta que se terminen las obras en 2018
- La esperanza de vida de la estructura será solo de 50 años

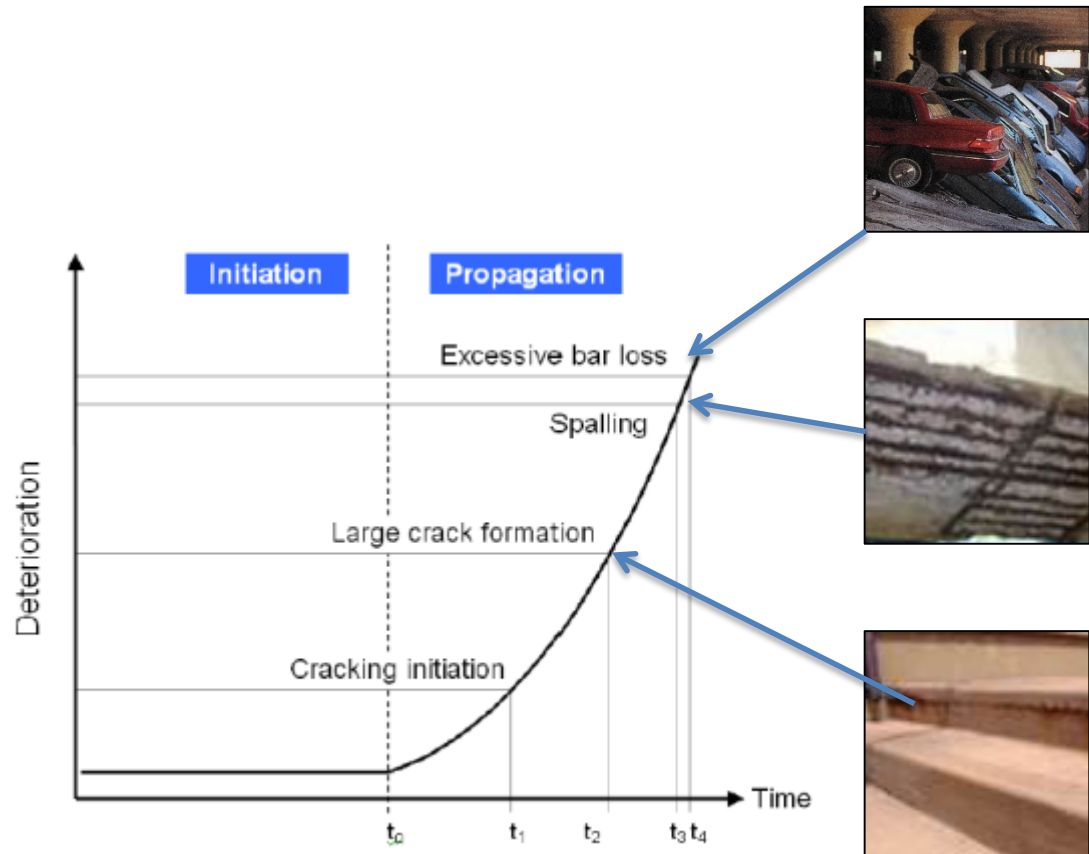


Cómo el hormigón armado puede ser dañado como consecuencia de la corrosión

Difusion de iones corrosivos (generalmente cloruros) a través del hormigón:

Pasos³:

1. Una vez los iones alcanzan el acero al carbono (t_0), la corrosión comienza
2. El material corroído, que ocupan un mayor volumen que en su estado original, genera presión hacia el exterior
3. Se generan grietas en el hormigón (t_1), creando acceso libre a los cloruros
4. La cobertura de hormigón se desprende (spalling) (t_3), exponiendo al aire la armadura
5. Si no se atiende a la corrosión, ésta continua, hasta que la armadura no puede soportar la carga aplicada y la estructura colapsa (t_4)



Las grietas en el hormigón aceleran la corrosión

El hormigón generalmente presenta grietas, a través de los cuales los iones corrosivos pueden alcanzar rápidamente el acero

A la derecha se muestran algunas causas de la formación de grietas (ref. 4).

Notese que las grietas no tienen lugar inmediatamente y que también ocurren en zonas escondidas donde no pueden ser reparados.

Tipo de grieta	Forma de la grieta	Causa principal	Tiempo de aparición
Deformación plástica	Por encima y alineado con el refuerzo de acero	Hundimiento alrededor de las barras de refuerzo, exceso de agua en mezcla	10 minutos a 3 horas
Disminución plástica	Diagonales o aleatorias	Excesiva evaporación	30 minutos a 6 horas
Expansión térmica y contracción	Transversales (a través del pavimento)	Excesiva temperatura generada o gradientes de temperaturas	1 día a 2 o 3 semanas
Perdidas por secado	Transversales o tipo patrón	Excesiva agua en la mezcla; Mala colocación de las juntas, o sobre espaciadas	Semanas a meses
Hielo y descongelación	Paralela a la superficie del hormigón	Inadecuada gestión de incorporación de aire; Agregados gruesos no duraderos	Después de 1 o 2 inviernos
Corrosión de la armadura	Sobre el corrugado	Cobertura de hormigón inadecuada, ingreso de humedad o cloruros	Más de 2 años
Reacciones electroquímicas	Desconchamiento; grietas paralelas a juntas o cantos	Reacciones en los áridos y la humedad	Generalmente al cabo de 5 años pero puede ser antes si existen áridos muy reactivos
Ataque de sulfatos	Desconchamiento	Sulfatos tanto externos como internos promueven la formación de ettringita	1 a 5 años

La selección adecuada de materiales es una buena inversión a largo plazo

El embarcadero de Progreso (1/3)^{5,6}



En Progreso (Mexico), fué construido un embarcadero en 1970.

El ambiente marino hizo que se corroyera la estructura con el consecuente fallo de la estructura.

El embarcadero de Progreso (2/3)



El embarcadero que aparece al lado, fué edificado entre 1937 y 1941 empleando corrugado de acero inoxidable.

El embarcadero de Progreso (3/3)

Sustainable
Civil Works
with Stainless:



Desde entonces, se ha mantenido en servicio sin mantenimiento alguno y permanece en inalterado.

Las grandes obras de ingeniería civil
deben garantizar una vida útil de
más de 100 años en la actualidad

Puente Haynes Inlet Slough, Oregon, EEUU 2004^{7,8}

Se trata de un puente inusual de arcos con bisagras que contiene 400 toneladas de corrugado de acero inoxidable en su plataforma.

Este puente de 230m de longitud sobre el Haynes Inlet Slough está diseñado para una vida útil sin mantenimiento de más de 120 años.

Pese a que el acero inoxidable es considerablemente más caro que el acero al carbono, el análisis del ciclo de vida de la estructura nos indica que a la larga acaba siendo un coste menor que optar por un acero más barato y sucesivos mantenimientos.





Puente Hong Kong- Zhuhai- Macau⁹ (La construcción empieza en 2009 y se completará entre 2017-2018)

El prestigioso proyecto del puente Hong Kong- Zhuhai- Macau es uno de los mayores del mundo. El tiempo de vida útil requerido sin necesidad de mantenimiento es de 120 años. Por lo tanto, se hizo necesaria la prescripción de corrugado de acero inoxidable en las zonas críticas de la estructura, especialmente en las zonas de carrera de mareas. Cerca de 15.000 toneladas de corrugado inoxidable serán instaladas en el proyecto.



Puente Broadmeadow , Dublin, Irlanda (2003)¹⁰

Se trata de una nueva construcción construida sobre el estuario con 150 toneladas de corrugado inoxidable distribuidos entre los pilares y parapetos.



Vista aérea

Reparación dique en Bayonne, Francia

El dique fué edificado en 1960 para proteger la entrada al puerto

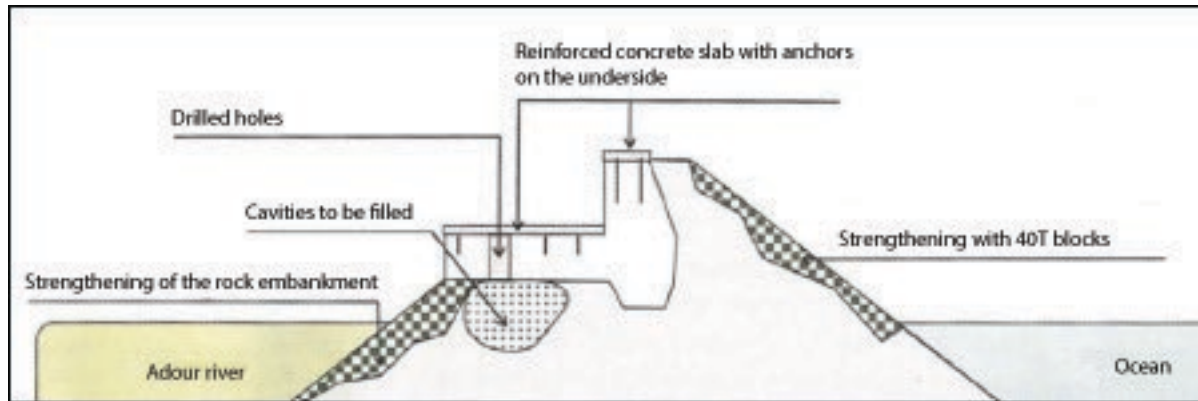
El lado que da al océano es mayor y está protegido por bloques de 40 tons que deben ser reemplazados a medida que las tormentas los van desgastando

En el lado del río, una plataforma de 7m de ancho permite a las grúas reponer los bloques

Grietas en el dique y las paredes que necesitan reparación



Sección del rompeolas



Reparación del rompeolas Bayonne, Francia

El rompeolas y la plataforma han sido reforzadas con un inoxidable tipo lean duplex (EN 1.4362)¹¹

Reparación del rompeolas

Principios de 2014, temporal sobre el dique





Puente Stonecutters Hong Kong^{12,13}

Se trata del segundo puente atirantado más largo del mundo, con un vano central de 1,018m. Las torres son de 298m de altura con 1,600 toneladas de acero inoxidable estructural en la zona de los anclajes del cable y 2800 toneladas de acero inoxidable corrugado en el hormigón armado de las torres.



Puente Belt Parkway, Brooklyn, EEUU (2004)¹⁴

Para asegurar una durabilidad de más de 100 años junto con una resistencia a la corrosión proveniente de las sales de deshielo y el ambiente marino, el puente y los parapetos fueron reforzados con corrugado de acero inoxidable tipo 2205.

Quando debe considerarse la barra de acero inoxidable corrugada¹⁵⁻²⁰:

- En ambientes corrosivos
- Cuando exista agua de mar y aún mas en climas cálidos
 - Puentes
 - Embarcaderos
 - Muelles
 - Anclajes de alumbrado,verjas,....
 - Rompeolas
 -
- Presencia de sales de deshielo
 - Puentes
 - Intercambiadores y pasos a nivel
 - Garajes y parkings
- Tanques de tratamientod e aguas residuales
- Plantas desalinizadoras
- En estructuras con largo ciclo de vida
 - Reparacion de estructuras patrimoniales
 - Cementerios nucleares
- En aquellos ambientes donde
 - La inspección es imposible
 - Las reparaciones son imposibles o muy costosas

Comparativa del corrugado inoxidable vs soluciones alternativas¹⁵⁻²⁰

	Ventajas	Limitaciones
Recubrimiento Epoxi	Menor coste inicial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se puede curvar sin romper ▪ Requiere manejo cuidadoso durante su instalación para evitar problemas
Galvanizado	Menor coste inicial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se puede curvar sin romper ▪ Pierde su efectividad una vez el Zn es corroído
Polimeros de fibra reforzada	Menor coste inicial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se puede curvar sin romper ▪ No resistente al calor ni al impacto en inviernos frios ▪ Menor resistencia que el acero ▪ No puede ser reciclado
ACERO INOXIDABLE	<p>Bajo coste a lo largo de su ciclo de vida:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diseño similar que con acero al carbono • Se puede combionar acero inoxidable y acero al carbono en las armaduras • Facil instalacion y o afectado por trabajos poco cuidadosos • No requiere mantenimiento • No tiene limite de vida • Permite menor espesor de pared • Buena resistencia al fuego • Puede ser reciclado en su totalidad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayores costes iniciales pero no más que un ligero % cuando <ul style="list-style-type: none"> ✓ El acero inoxidable es empleado en algunas zonas criticas ✓ Se seleccionan tipos lean duplex

Comparativa del corrugado inoxidable vs soluciones alternativas¹⁵⁻²⁰

	Advantages	Drawbacks
Protección catódica	¿Menores costes iniciales? Usado frecuentemente para reparaciones	<ul style="list-style-type: none">▪ Requiere un diseño cuidadoso para proteger toda la instalación▪ Requiere una instalación cuidadosa para mantener en funcionamiento los constactos eléctricos▪ Requiere una fuente de corriente permanente (que debe ser monitorizada y mantenida) o ánodos de sacrificio que tambien requieren monitorización y reemplazo.
Membranas/ selladores	¿Menores costes iniciales?	<ul style="list-style-type: none">▪ Requiere una instalación cuidadosa para evitar burbijas▪ No puede ser instalada en cualquier ambiente/clima▪ Funcionamiento a lo largo del tiempo en discusión▪ Limitado a superficies horizontales

Referencias bibliográficas

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. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref07_The_use_of_predictive_models_in_specifying_selective_use_of_stainless_steel_reinforcement.pdf
4. <http://www.nachi.org/visual-inspection-concrete.htm> visual inspection of concrete
5. <http://www.nickelinstitute.org/en/Sustainability/LifeCycleManagement/LifeCycleAssessments/LCAProgresoPier.aspx> (progreso Pier)
6. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref08_Special-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 (stonecutters' bridge)
13. 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 (belt parkway bridge)
15. Béton Armé d'inox: Le Choix de la durée (French) <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-t81>
16. Armaduras de Acero Inoxidable (Spanish) <http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/59armadurasaceroinoxidable.pdf>
17. www.ukcares.com/downloads/guides/PART7.pdf
18. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref19_Case_study_of_progreso_pier.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 (advantages of using ss rebar)
21. <http://www.stainlesssteelrebar.org>

NEW!

References on Galvanic Coupling

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/>

Presentación de ayuda para docentes de arquitectura e ingeniería civil

Capítulo 07B

Aplicaciones estructurales de productos planos de acero inoxidable

Acero inoxidable estructural

Proyectando en acero inoxidable

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

A partir de la versión anterior preparada por Nancy Baddoo
Steel Construction Institute, Ascot, Reino Unido

Índice

- Ejemplos de aplicaciones estructurales
- Características mecánicas del material
- Cálculo de acuerdo con Eurocódigo 3
- Métodos alternativos
- Flechas
- Información adicional
- Herramientas para ingenieros

Parte 1

Ejemplos de aplicaciones estructurales



Estación Sint Pieters, Gante (Bélgica)

Arquitectura: Wefirna

Oficina Técnica: THV Van Laere-Braekel Aero



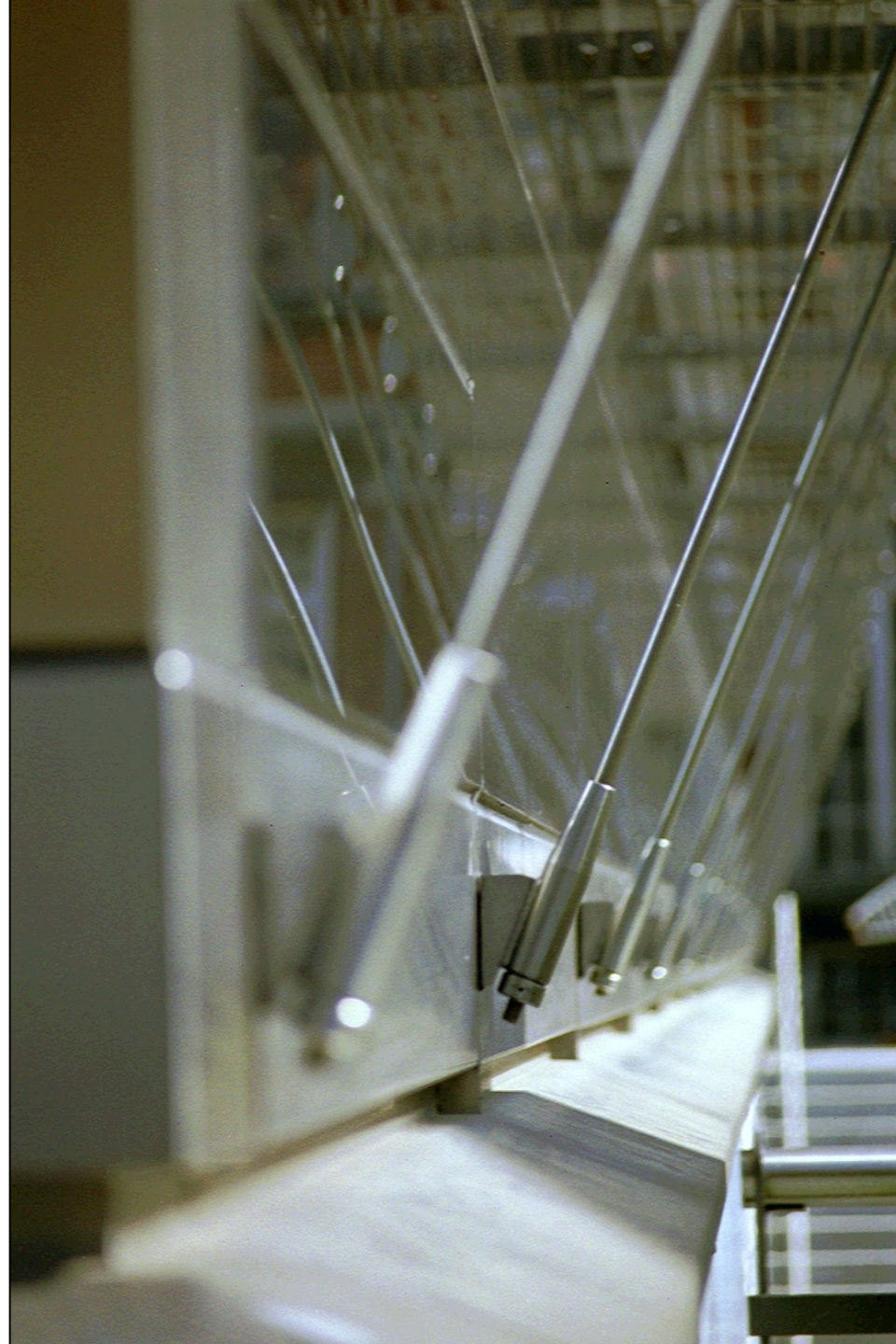
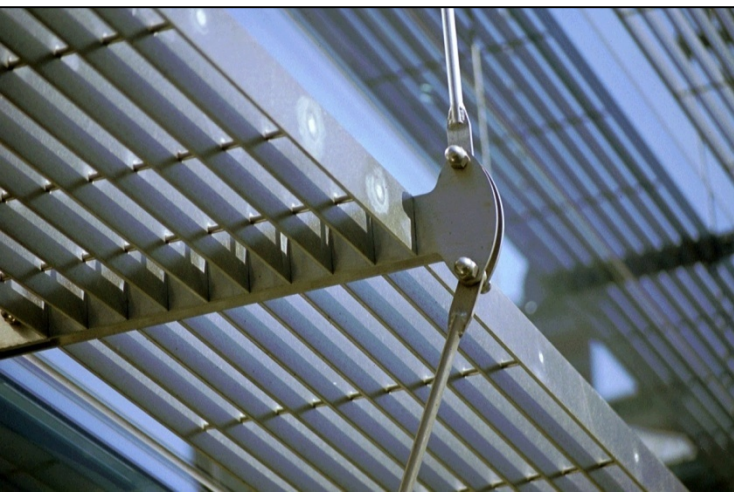
Escuela Militar en Bruselas

Arquit.: AR.TE

Ofic. Técnica:

Tractebel

Development

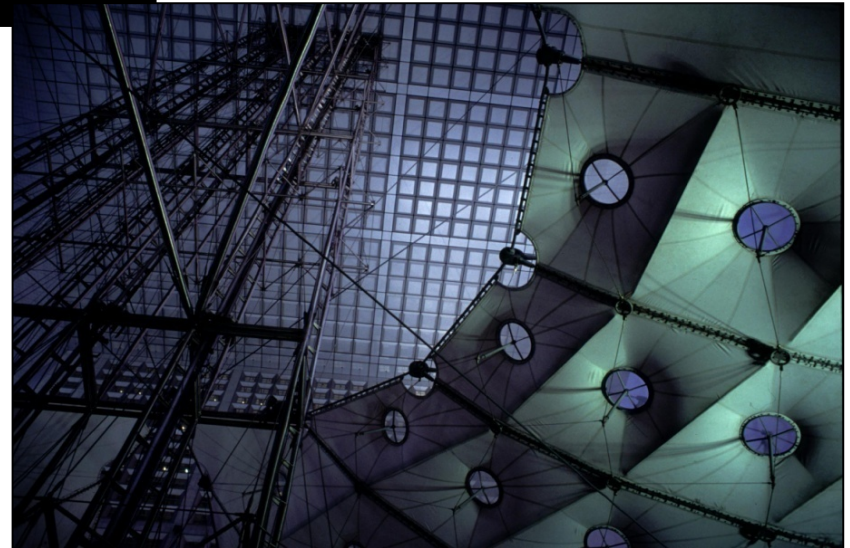




La Grande Arche de La Défense, París (Francia)

Arquit. : Johan Otto von Spreckelsen

Oficina Técnica: Paul Andreu





Villa Inox (Finlandia)



La Lentille de Saint-Lazare, París, (Francia)

Arquit.: Arte Charpentiers & Associés

Oficina Técnica: Mitsu Edwards

Estación en Porto (Portugal)



Oficinas Centrales Torno Internazionale S.P.A. Milán, (Italia)

Grado de acero inoxidable: EN 1.4404 (AISI 316L)

Arquitecto: Dante O. BENINI & Partners Architects



Fotografía: Toni Nicolino / Nicola Giacomini

Pórticos de acero inoxidable en una planta nuclear



Fotografía: Stainless Structurals LLC

**Soportes de fachada de
acero inoxidable,
Tampa, (USA)**



Fotografía: TriPyramid Structures, Inc.

Vigas en I de acero inoxidable,

Planta de tratamiento de agua « Thames Gateway Water Treatment Works »,
(Reino Unido)



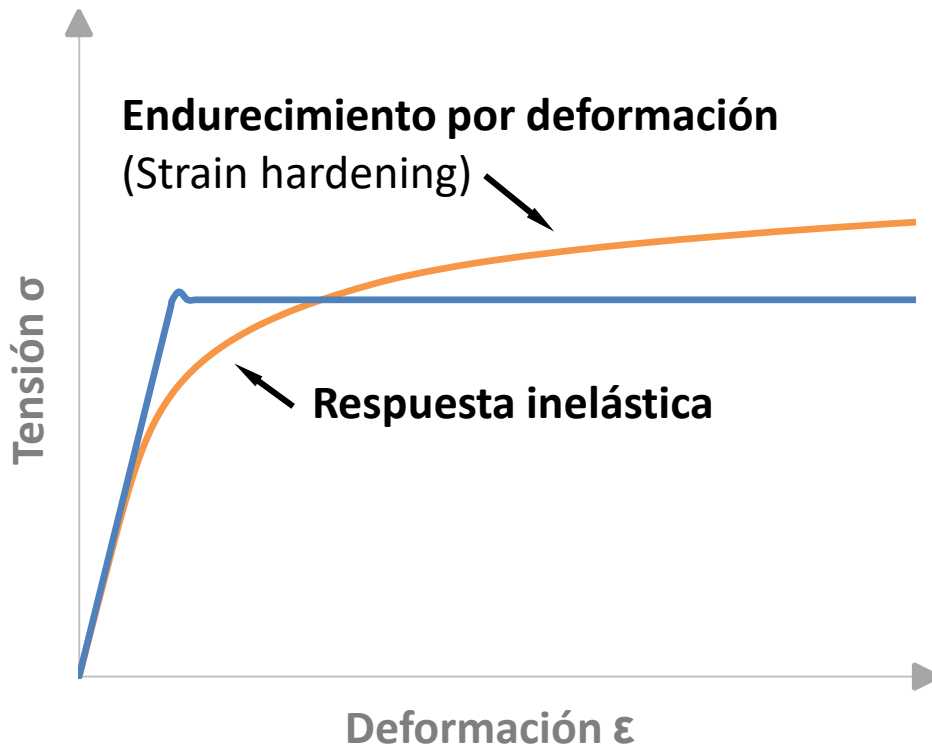
Fotografía: Interserve

Parte 2

Características mecánicas del material

Propiedades tenso-deformacionales: Acero al carbono vs acero inoxidable

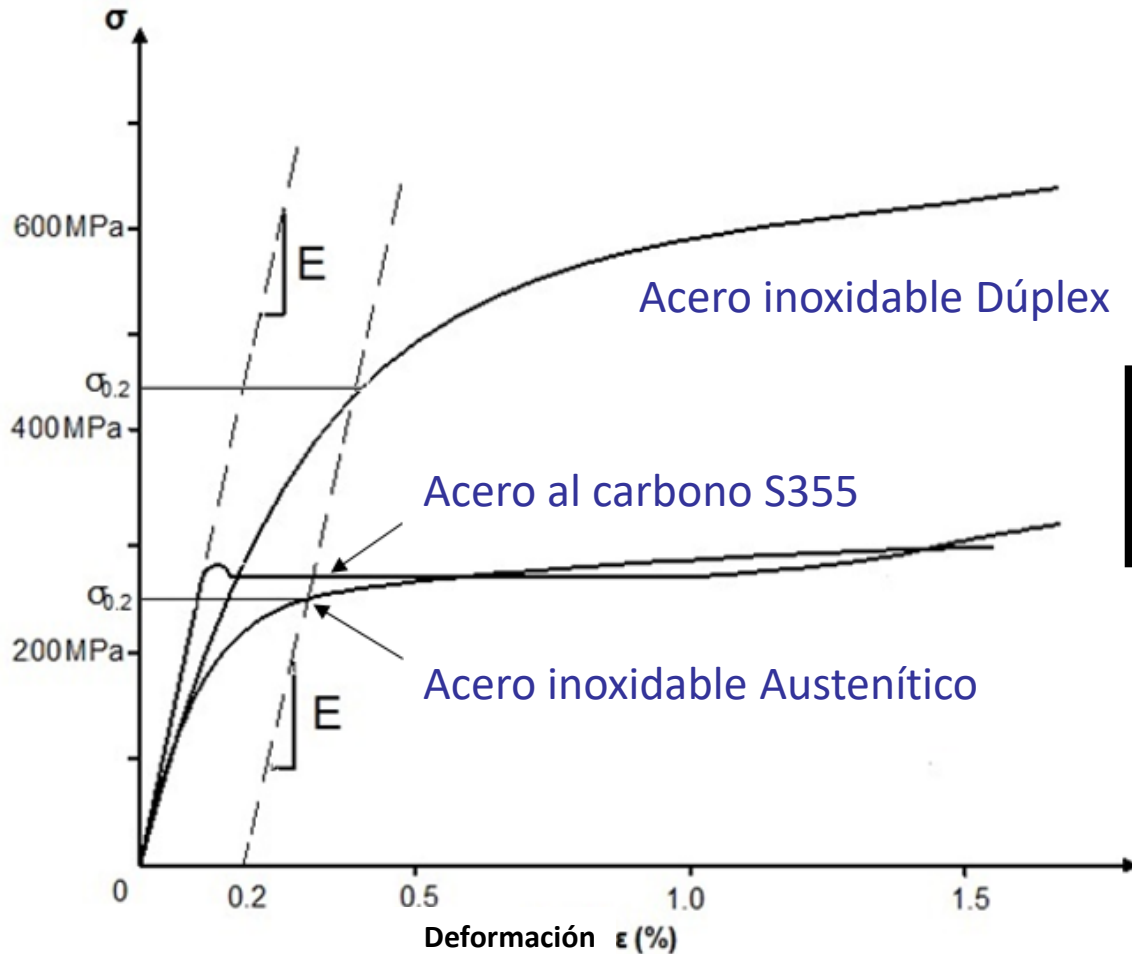
El acero inoxidable presenta un comportamiento σ - ϵ esencialmente diferente al del acero al carbono.



El acero al carbono presenta un límite elástico claramente marcado seguido de una rama plástica

El acero inoxidable presenta una plastificación gradual con un importante endurecimiento por deformación.

Características tenso-deformacionales a bajo nivel de deformación



La respuesta tenso-deformacional depende de la familia.

Resistencia de cálculo del acero inoxidable

Valores mínimos de la tensión correspondiente a una deformación remanente de 0.2% especificados en EN10088-4 y -5

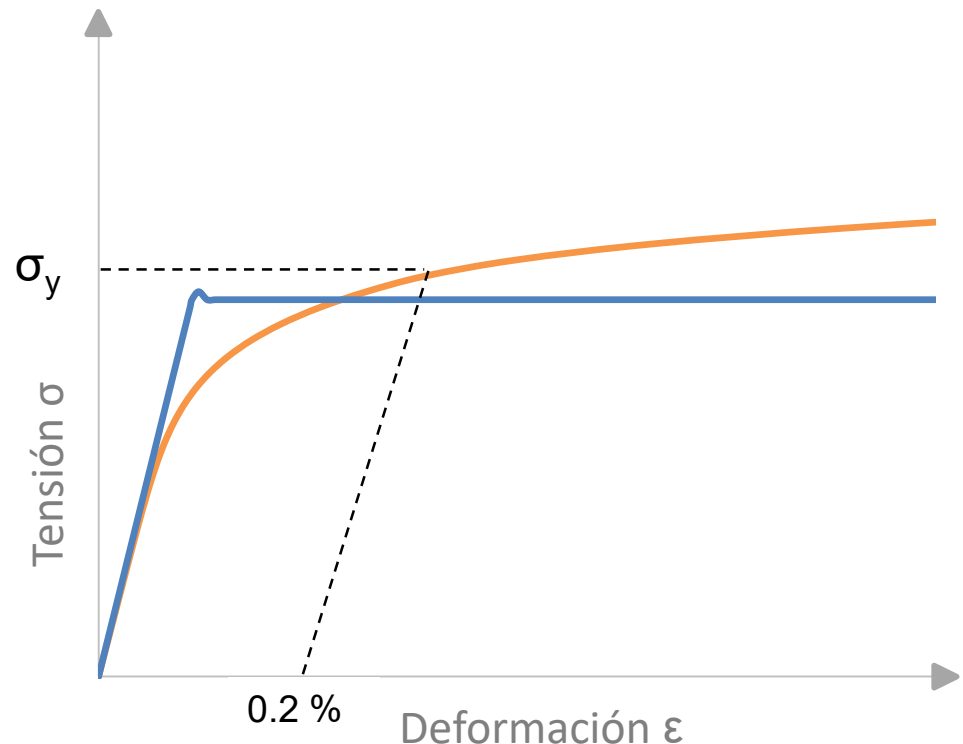
Austeníticos: $f_y = 220-350$ MPa

Dúplex: $f_y = 400-480$ Mpa

Ferríticos: $f_y = 210-280$ MPa

Módulo de Young:

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



Resistencia de cálculo del acero inoxidable

Grado	Familia	Límite elástico (N/mm ²) (tensión a deformación remanente de 0.2%)	Resistencia última (N/mm ²)	Módulo de Young (N/mm ²)	Deformación en rotura (%)
1.4301 (304)	Austenítico	210	520	200000	45
1.4401 (316)	Austenítico	220	520	200000	40
1.4062	Dúplex	450	650	200000	
1.4462	Dúplex	460	640	200000	
1.4003	Ferrítico	250	450	220000	

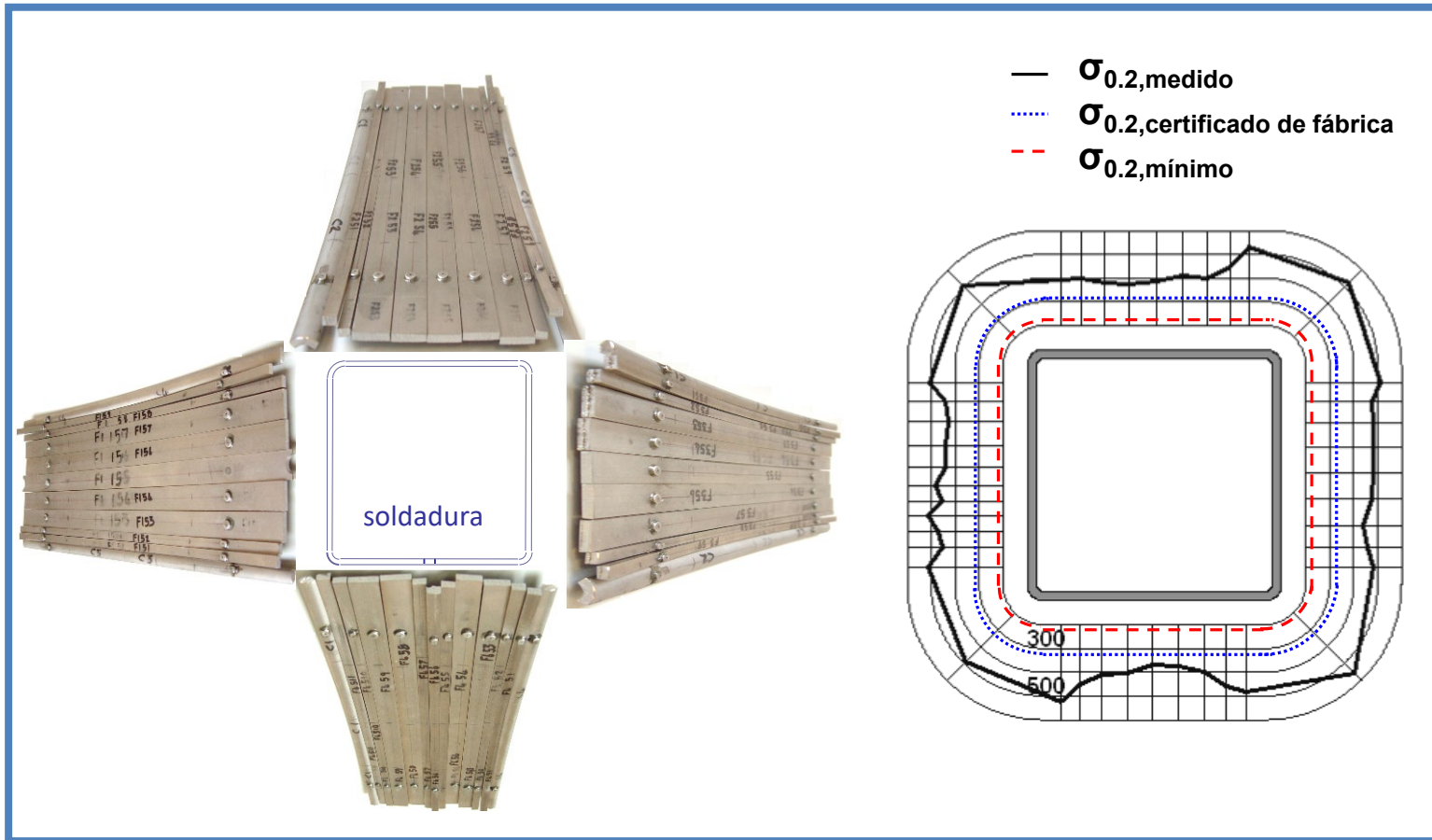
Endurecimiento por deformación (trabajado o laminado en frío)

- Incremento de la resistencia por deformaciones plásticas
- Causado por el conformado en frío, durante la producción del acero o en las operaciones de conformado

Durante la fabricación de una sección tubular rectangular, la tensión correspondiente a una deformación remanente de 0.2% aumenta alrededor de un 50% en las regiones conformadas de las esquinas!

Endurecimiento por deformación (trabajado o laminado en frío)

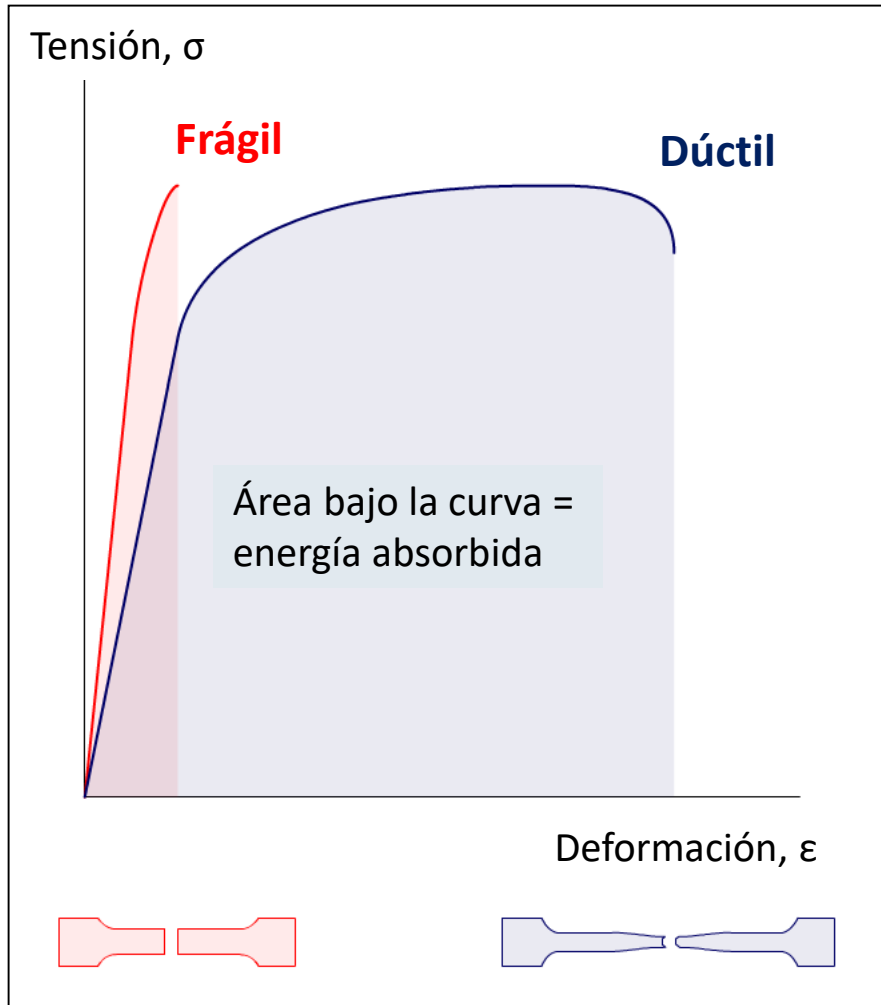
- Aumento de resistencia durante el conformado



Endurecimiento por deformación – no siempre beneficioso!

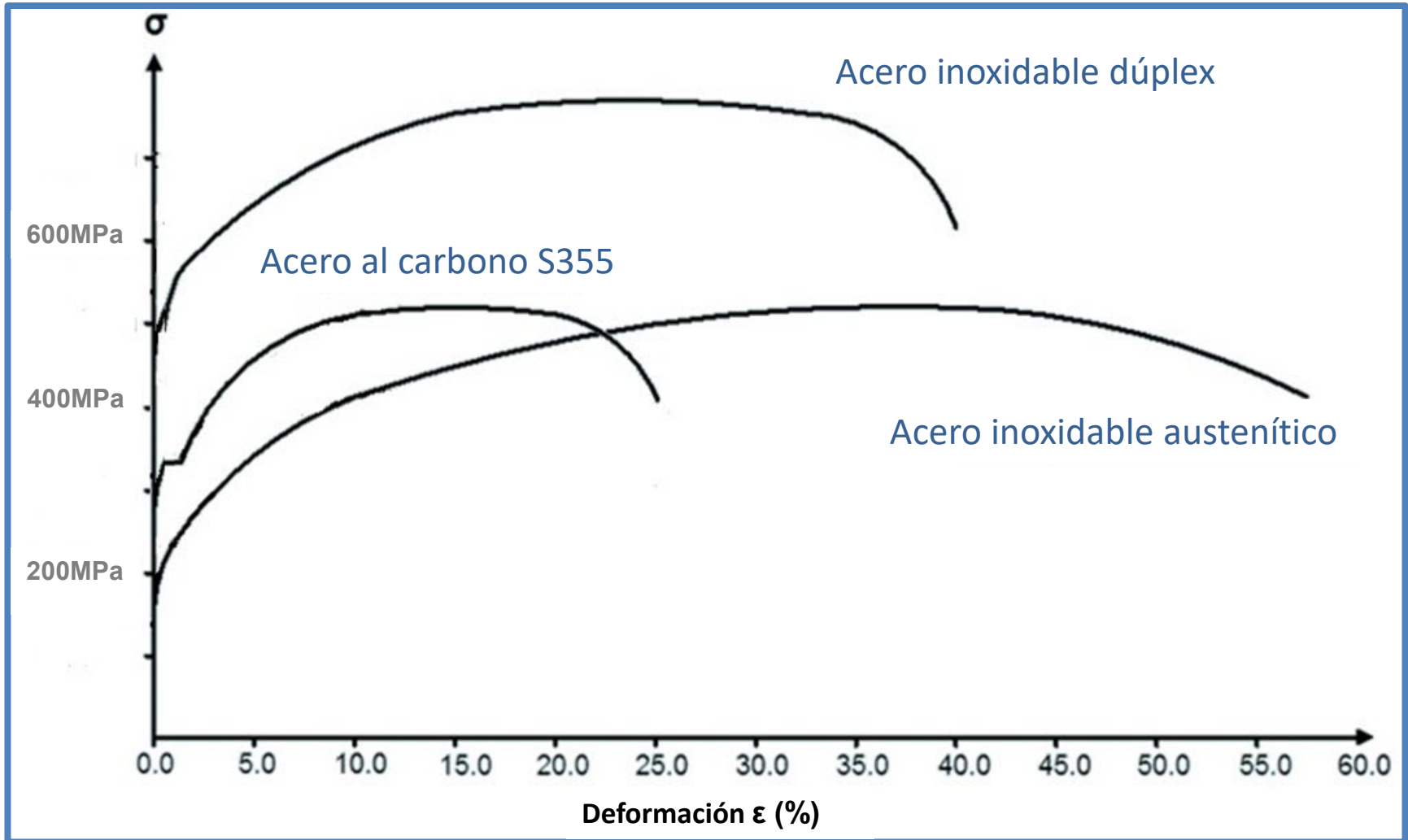
- Maquinaria de fabricación más pesada y potente
- Mayores requisitos de fuerza
- Reducción de ductilidad (no obstante, la ductilidad inicial es alta, especialmente para los austeníticos)
- Pueden producirse tensiones residuales no deseadas

Ductilidad y dureza



- **Ductilidad** – habilidad de deformarse sin rotura
- **Dureza** – habilidad de absorber energía y deformarse plásticamente sin fracturarse

Características tenso-deformacionales a altas deformaciones



Estructuras resistentes a explosiones e impactos



Baliza de seguridad



Fabricación del muro trapezoidal resistente a explosiones de la obra muerta de una plataforma offshore

Características tenso-deformacionales

La **no linealidad** lleva a.....

- Límites de ancho/espesor diferentes para efectos de abolladura local
- Comportamiento diferente de elementos frente a inestabilidades globales en compresión y flexión
- Mayores flechas

Influencia en el comportamiento frente a pandeo por flexión

- **Esbelteces bajas**

los pilares alcanzan o exceden la carga plástica

⇒ **beneficio** del endurecimiento por deformación

El inoxidable se comporta **al menos tan bien como** el acero al carbono

- **Esbelteces altas**

baja resistencia axial, bajo nivel tensional en el rango lineal del material

⇒ el inoxidable se comporta de **manera similar** al acero al carbono suponiendo geometrías y tensiones residuales similares

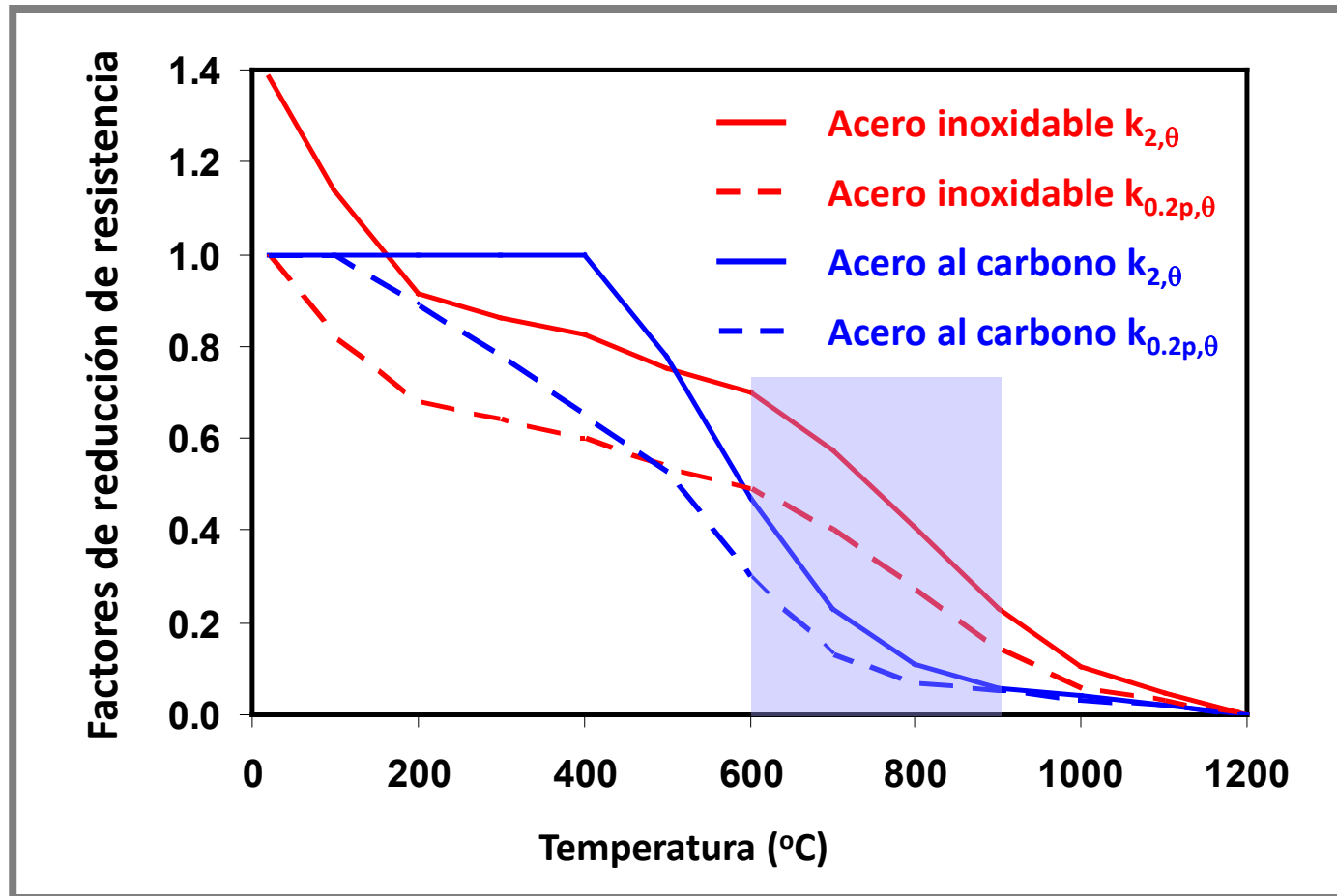
Influencia en el comportamiento frente a pandeo por flexión

- **Esbelteces intermedias**

la tensión media en el pilar se encuentra entre el límite de proporcionalidad y la tensión correspondiente a una deformación remanente de 0.2%,

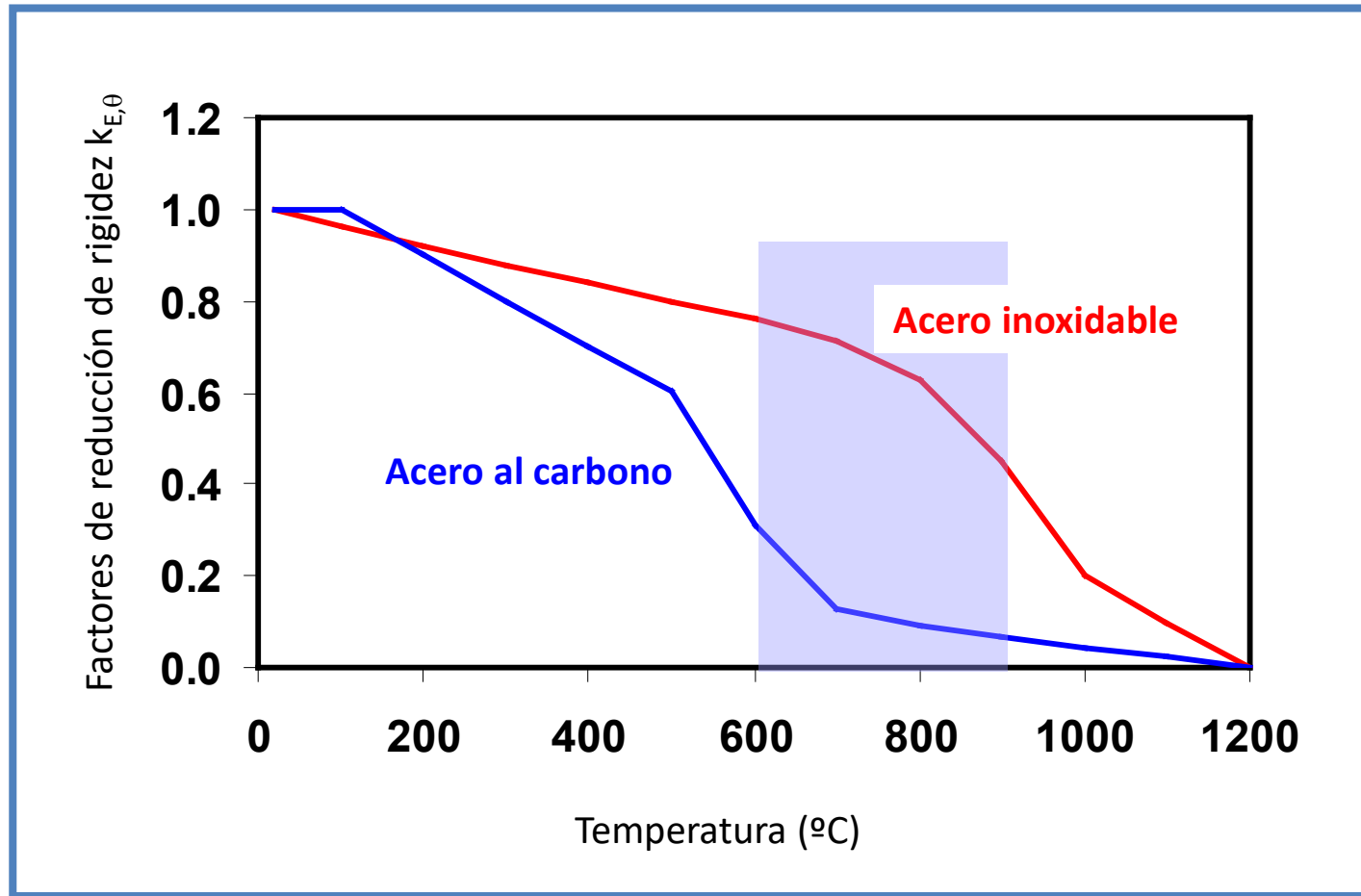
los pilares de acero inoxidable son **menos resistentes** que los de acero al carbono

Material a temperaturas elevadas



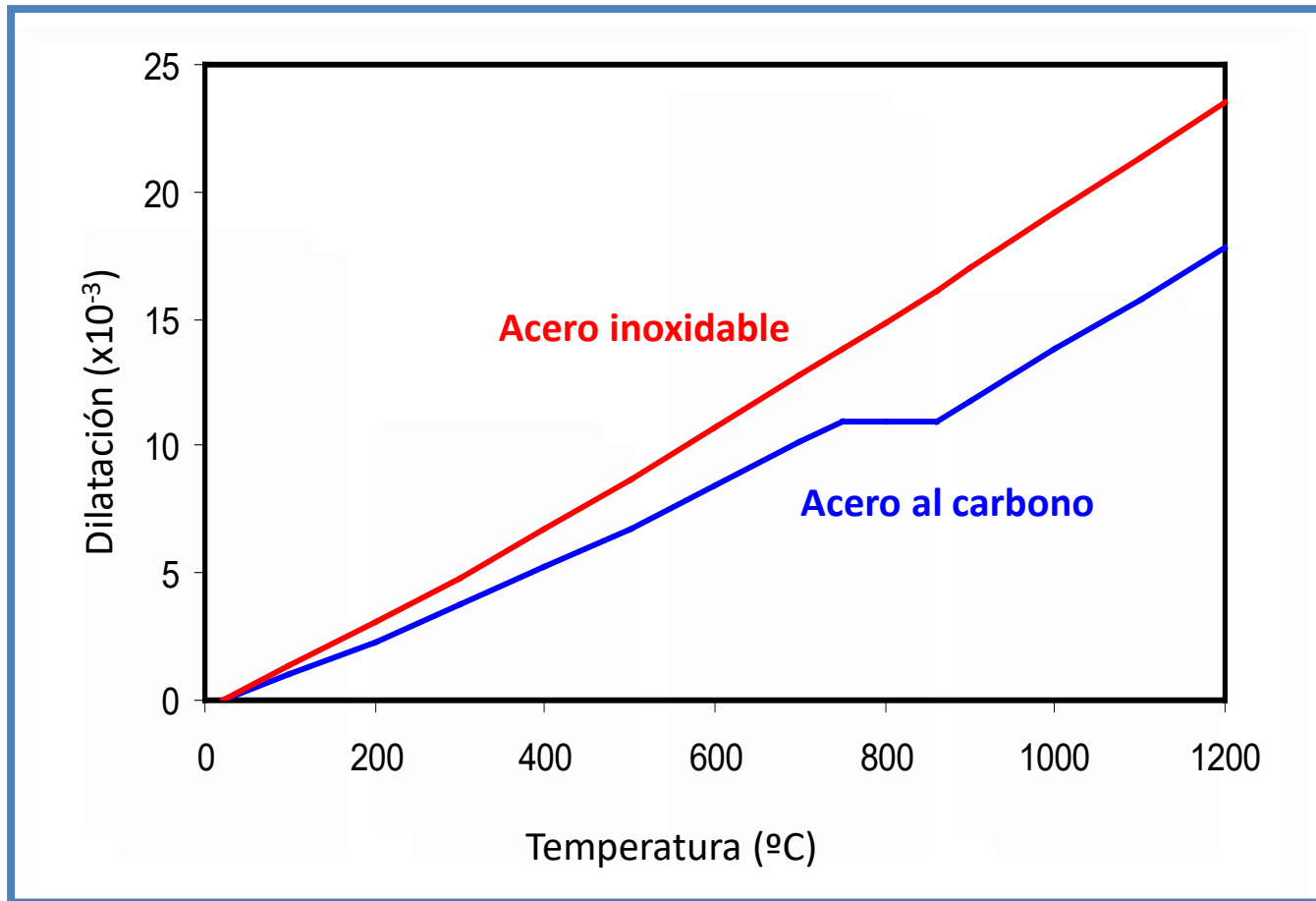
$k_{0.2p,q}$ = factor de reducción de resistencia a tensión de deformación plástica 0.2%
 $k_{2,q}$ = factor de reducción de resistencia a tensión de deformación total 2%

Material a temperaturas elevadas



Factor de reducción de rigidez

Material a temperaturas elevadas



Dilatación térmica

Parte 3

Cálculo de acuerdo con Eurocódigo 3

Normas de cálculo internacionales

¿Cuáles son las normas de cálculo disponibles para el acero inoxidable estructural?



Club Náutico Hamilton Island, Australia

EN 1990

Seguridad estructural, servicio y durabilidad

EN 1991

Acciones sobre estructuras

EN 1992

EN 1993

EN 1994

EN 1995

EN 1996

EN 1999

Diseño y detalles

EN 1997

Diseño geotécnico

EN 1998

Diseño sísmico

Conexiones entre los Eurocódigos

Los Eurocódigos son una colección de normas de cálculo europeas integradas que cubren los materiales de construcción más habituales

Eurocode 3: Parte 1 (EN1993-1)

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

Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero, Parte 1.4 Reglas adicionales para aceros inoxidable

BRITISH STANDARD

Eurocode 3 — Design of steel structures —

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

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

ICS 91.040.01, 91.080.10

BS EN
1993-1-4:2006

Proyecto de estructuras de acero.
Reglas adicionales para aceros
inoxidables (2006)

- Modifica y suplementa las directrices para acero al carbono dadas en otras partes de Eurocódigo 3 cuando necesario
- Aplicable a edificios, puentes, tanques, etc.

Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero,

Parte 1.4 Reglas adicionales para aceros inoxidables

- Proceder de la misma manera que para acero al carbono
- Emplear las mismas directrices que para acero al carbono para elementos traccionados y vigas arriostradas
- Existen diferencias en límites de clasificación seccional, abolladura local y curvas de pandeo por flexión debido a:
 - Curva tenso-deformacional no lineal
 - Propiedades de endurecimiento por deformación
 - Tensiones residuales diferentes

Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero,

Parte 1.4 Reglas adicionales para aceros inoxidables

Tipos de elementos

- Laminados en caliente y soldados
- Conformados en frío
- Barras

Número de grados

Familia	EC3-1-4	Revisión futura
Ferrítico	3	3
Austenítico	16	16
Dúplex	2	6

Alcance

- Elementos y uniones
- Incendio (*por referencia a EN 1993-1-2*)
- Fatiga (*por referencia a EN 1993-1-9*)

Otras normas y manuales de diseño

- **Japón** – dos normas: una para elementos conformados en frío y una para elementos soldados
- **Sudáfrica, Australia, Nueva Zelanda** – normas para elementos conformados en frío de acero inoxidable
- **China** – norma en desarrollo
- **US** – norma ASCE para elementos conformados en frío y el manual AISC Design Guide para elementos laminados en caliente y soldados

Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero,

Parte 1.4 Reglas adicionales para aceros inoxidables

¿Cuáles son las reglas de cálculo para acero inoxidable recogidas en EN 1993-1-4 y cuáles las principales diferencias con las equivalentes para acero al carbono?



Porche con pilares resistentes a explosión en la entrada del Seven World Trade Centre, Nueva York

Clasificación seccional y expresiones para la abolladura local en EN1993-1-4

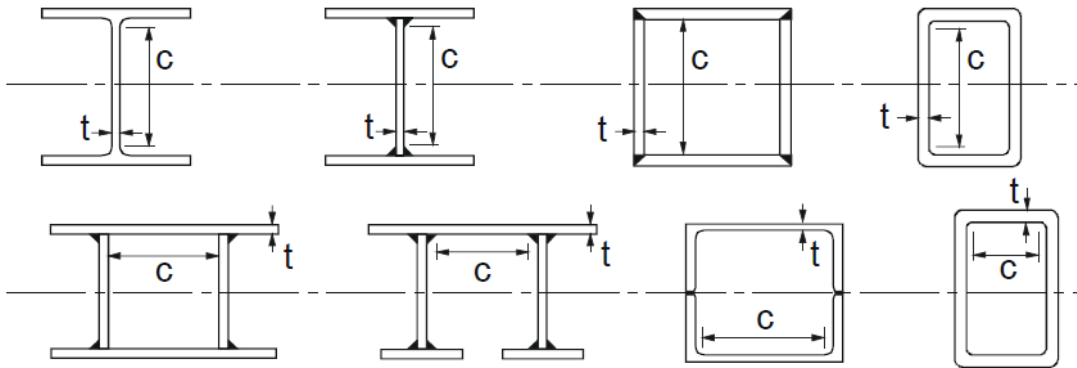
- Valores límite de los ratios ancho/espesor más bajos que para acero al carbono
- Expresiones ligeramente diferentes para el cálculo del ancho eficaz en secciones esbeltas

No obstante...

La versión revisada de EN1993-1-4 contendrá límites menos conservadores y expresiones de ancho eficaz.

Clasificación seccional y expresiones para la abolladura local en EN1993-1-4

- Elementos internos comprimidos

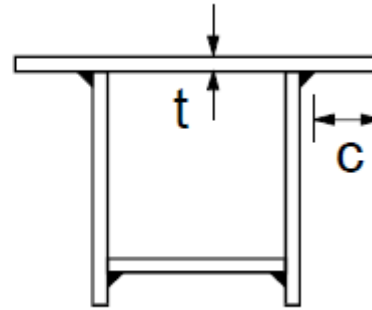
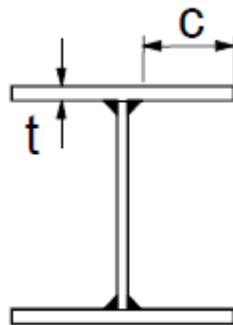


$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

Clase	EC3-1-1: acero al carbono		EC3-1-4: acero inoxidable		EC3-1-4: Revisado	
	Flexión	Compresión	Flexión	Compresión	Flexión	Compresión
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	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$

Clasificación seccional y expresiones para la abolladura local en EN1993-1-4

■ Elementos en voladizo comprimidos



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

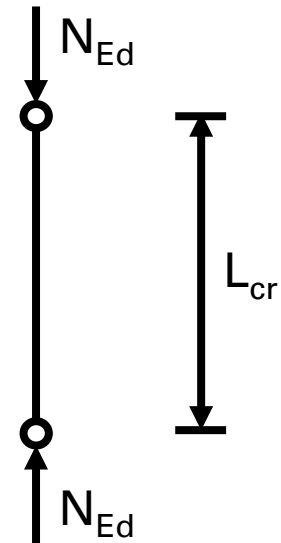
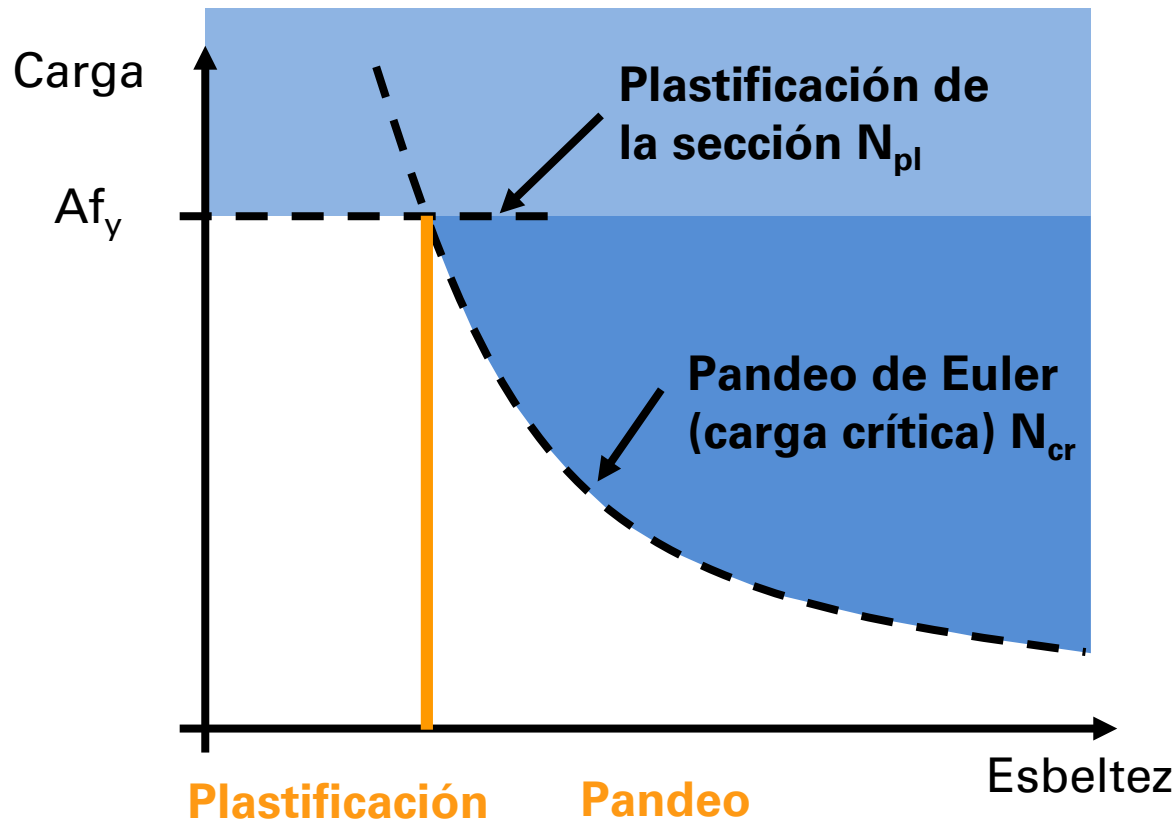
	EC3-1-1: acero al carbono	EC3-1-4: acero inoxidable		EC3-1-4: Revisado
Clase	Compresión	Compresión Soldado	Compresión Conformado en frío	Compresión
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 14\varepsilon$

Diseño de pilares y vigas

- En general, emplear las mismas directrices que para acero al carbono
- Pero considerar curvas de pandeo diferentes para el pandeo por flexión de pilares y pandeo lateral de vigas no arriostradas (pandeo lateral)
- Asegurarse de que se considera el valor adecuado de f_y para el grado considerado (valores mínimos especificados recogidos en EN10088-4 y -5)

Comportamiento del pilar “perfecto”

Dos límites: plastificación y pandeo



Pandeo por flexión de pilares

Resistencia de cálculo a pandeo por compresión $N_{b,Rd}$:

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

para Clases 1, 2 y 3

Coefficiente de reducción

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

para Clase 4 (simétrica)

Pandeo por flexión de pilares

Esbeltez adimensional: $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secciones Clase 1, 2 y 3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{para secciones Clase 4}$$

N_{cr} es la carga crítica elástica de pandeo para el modo de pandeo considerado, basado en las propiedades brutas de la sección

Pandeo por flexión de pilares

Coefficiente de reducción: χ

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

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

Factor de imperfección

Esbeltez límite

Pandeo por flexión de pilares

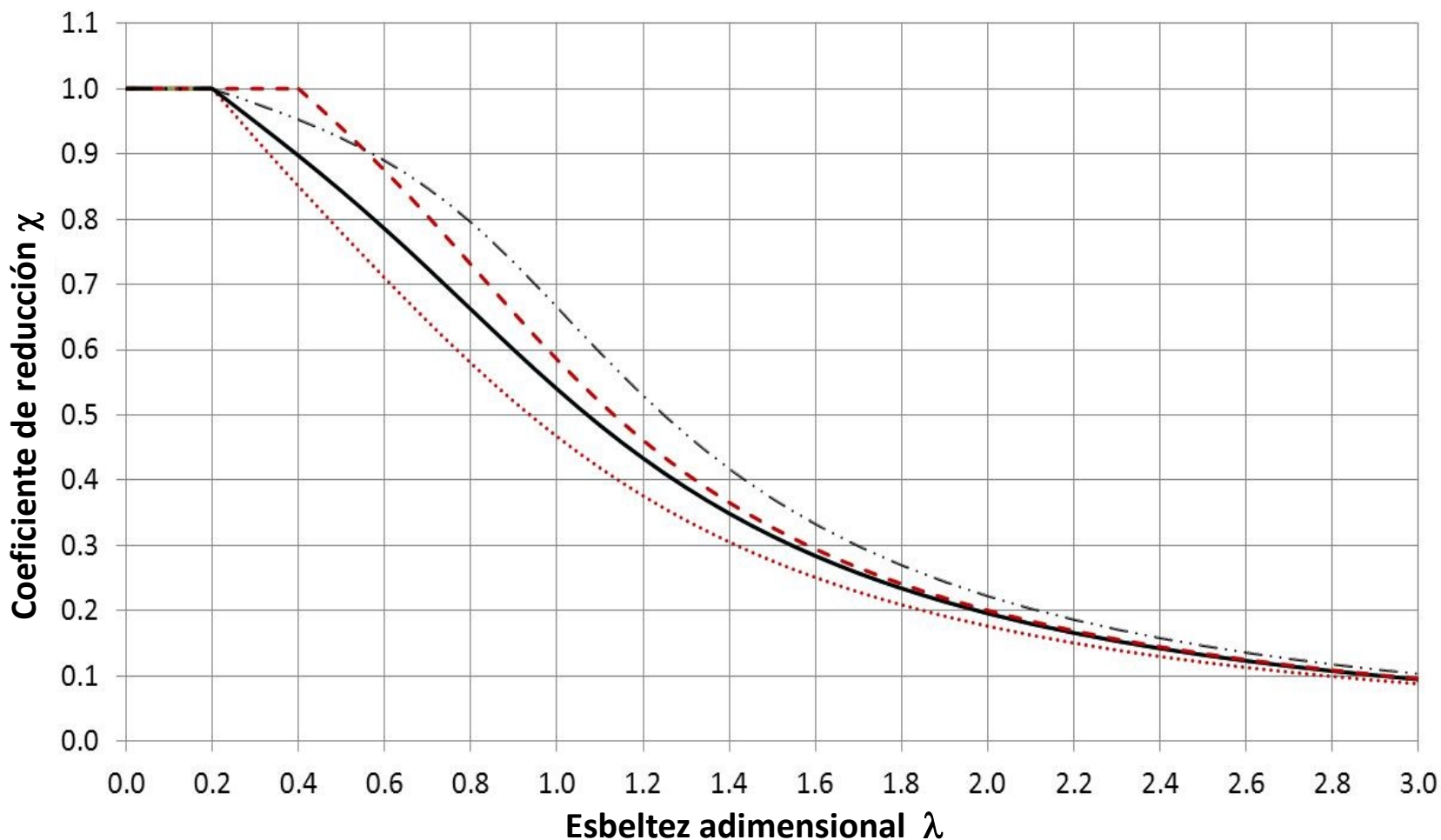
- La elección de la curva de pando adecuada depende de la sección transversal, proceso de fabricación y eje considerado

Tabla 5.3: Valores de α y λ_0 para pandeo por flexión, pandeo por torsión y pandeo por torsión y flexión.

Modo de pandeo	Tipo de elemento	α	λ_0
Flexión	Secciones abiertas conformadas en frío	0,49	0,40
	Secciones tubulares (soldadas o sin soldar)	0,49	0,40
	Secciones abiertas soldadas (eje fuerte)	0,49	0,20
	Secciones abiertas soldadas (eje débil)	0,76	0,20
Torsión y torsión y flexión	Todos los elementos estructurales	0,34	0,20

Extraído de EN1993-1-4

Eurocódigo 3. Curvas de pandeo por flexión

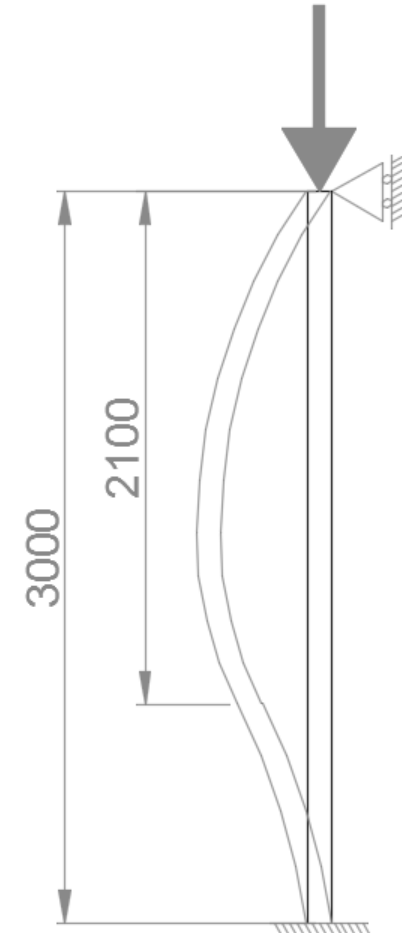
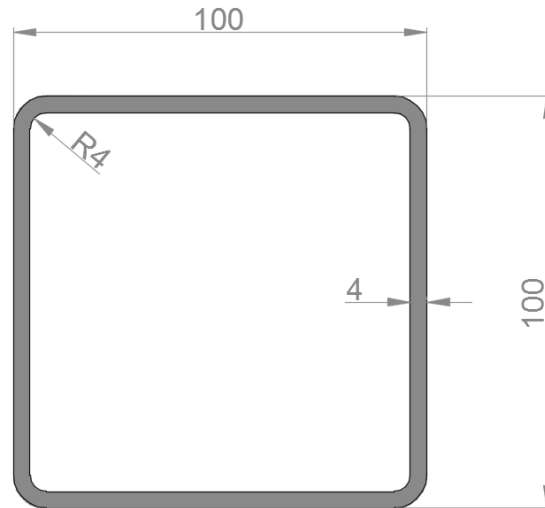


- - - Acero inoxidable: secciones tubulares (soldadas o sin soldar), secciones en C conformadas en frío
- Acero inoxidable: secciones en I soldadas
- Acero al carbono: secciones en I soldadas, secciones tubulares y en C conformadas en frío
- - - Acero al carbono: secciones tubulares acabadas en caliente

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo por Flexión

- Sección tubular rectangular conformada en frío sometida a una carga concéntrica de compresión

	Acero al carbono	Acero inoxidable austenítico
Material	S235	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	235	230
E [N/mm ²]	210000	200000



Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo por Flexión

EC 3-1-1: S235

- Clasificación

Todas son partes internas

Para Clase 1:

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

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

La sección es Clase 1

EC 3-1-4: Austenítico

- Clasificación

Todas son partes internas

Para Clase 1:

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

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

La sección es Clase 1

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo por Flexión

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Dúplex
A [mm ²]	1495	1495
f _y [N/mm ²]	235	230
γ _{M0} [-]	1	1,1
N _{c,Rd} [kN]	351	313
L _{cr} [mm]	2100	2100
λ ₁ [-]	93,9	92,6
λ̄ [-]	0,575	0,583
α [-]	0,49	0,49
λ̄ ₀ [-]	0,2	0,4
φ [-]	0,76	0,71
χ [-]	0,80	0,89
γ _{M1} [-]	1	1,1
N _{b,Rd} [kN]	281	277

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo por Flexión

■ Comparación

	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
Sección $N_{c,Rd}$ [kN]	351	313
Pandeo $N_{b,Rd}$ [kN]	281	277

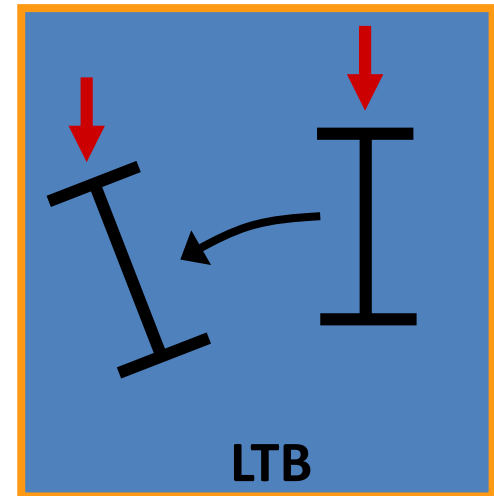
- En este ejemplo, los pilares de acero al carbono e inoxidable presentan una resistencia a pandeo por flexión similar

El **beneficio** del endurecimiento por deformación no es apreciable

⇒ EC3 1-4 no considera los efectos de endurecimiento por deformación debidamente

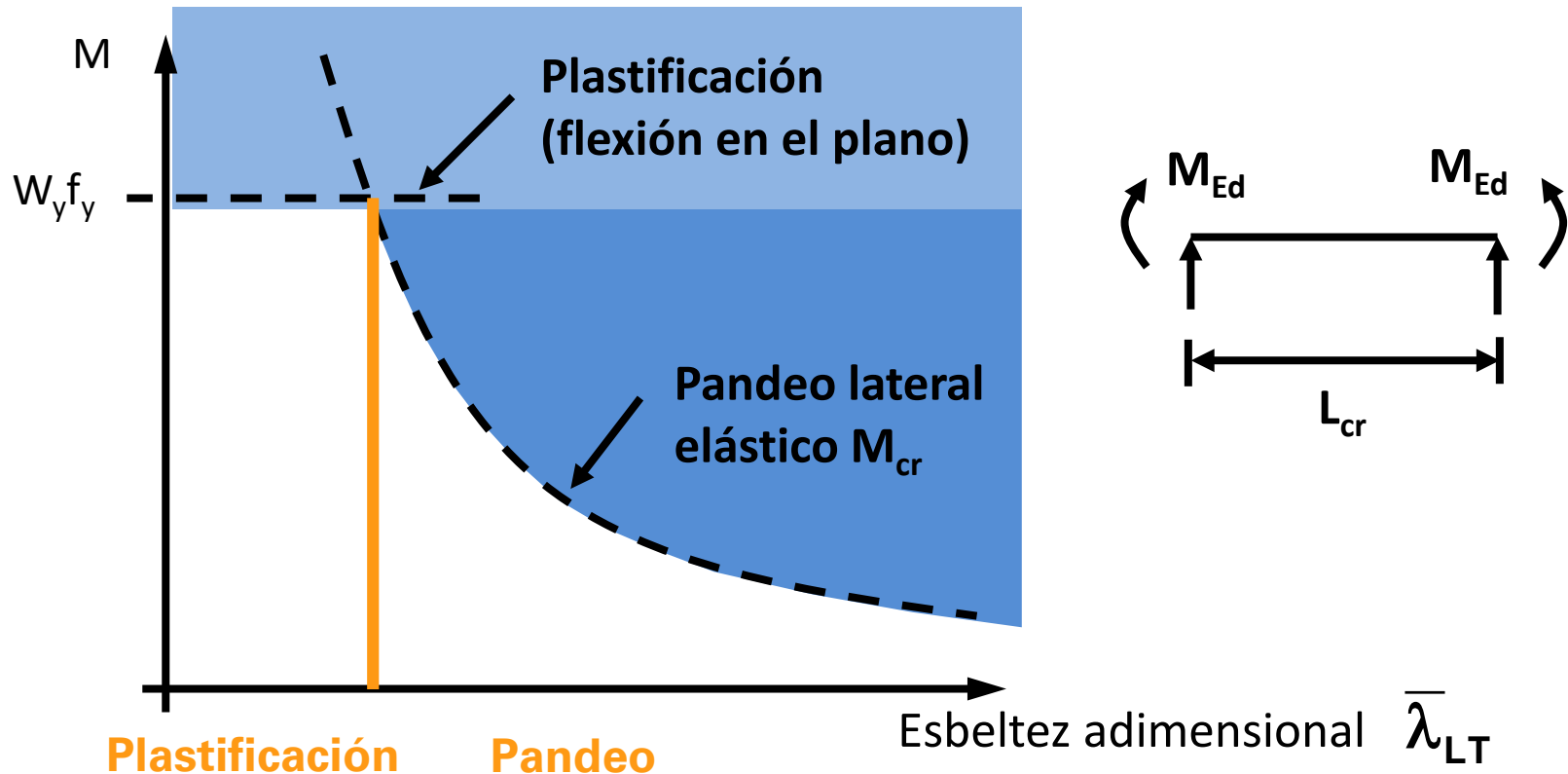
Pandeo lateral

- Puede despreciarse en caso de:
 - Secciones tubulares (CHS, SHS), barras circulares o cuadradas
 - Vigas totalmente arriostradas lateralmente
 - Flexión alrededor del eje débil
 - $\bar{\lambda}_{LT} < 0.4$



Pandeo lateral

- El método de cálculo frente a pandeo lateral es análogo al tratamiento del pandeo por flexión en pilares.



Pandeo lateral

- La resistencia de cálculo frente a pandeo lateral $M_{b,Rd}$ de una viga no arriostrada (o segmento de viga) debe determinarse a partir de:

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

Coeficiente de reducción por pandeo lateral (LTB)

Pandeo lateral

- Las curvas para pandeo lateral se muestran en la diapositiva siguiente:

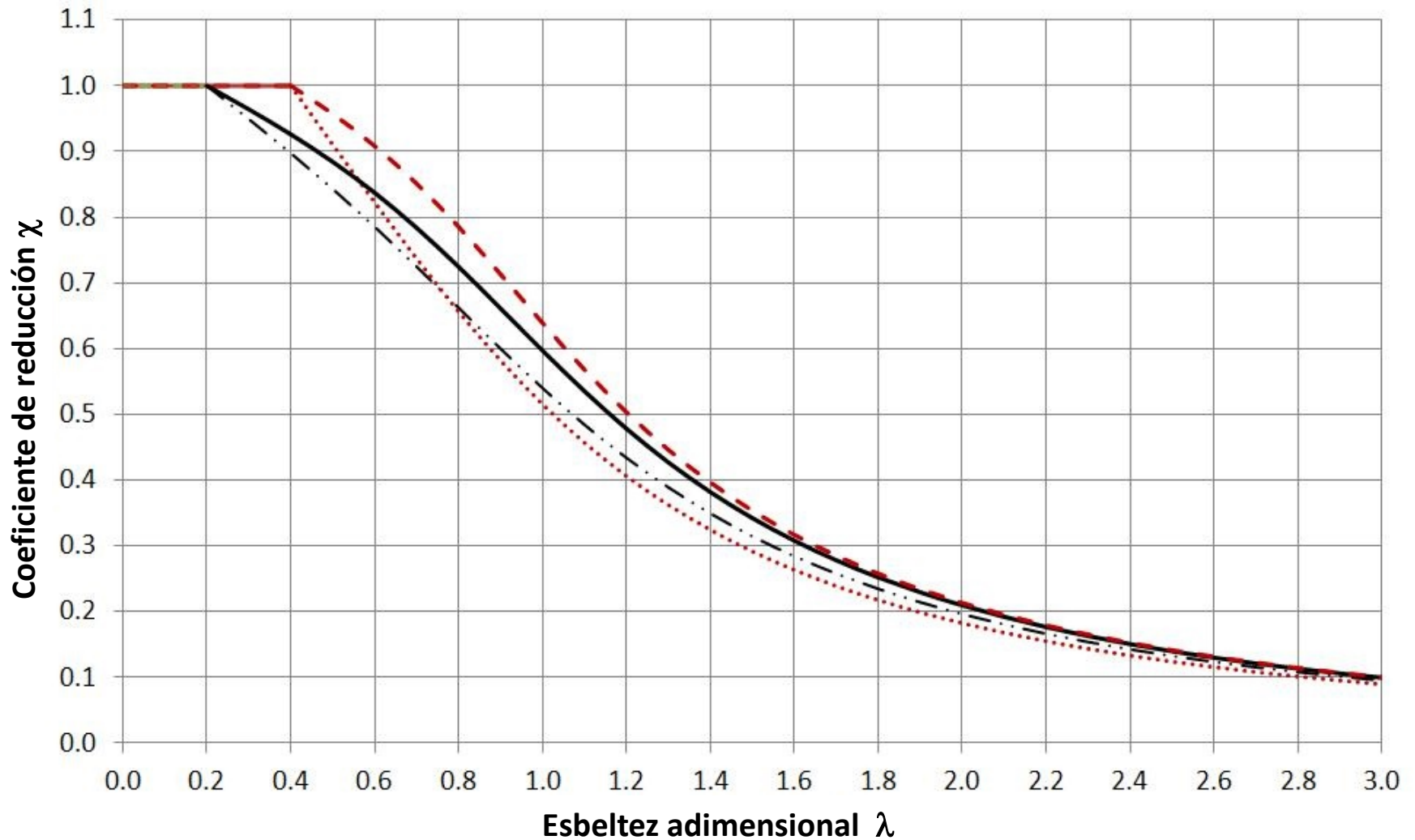
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{but } \chi_{LT} \leq 1.0$$

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

Factor de imperfección

Esbeltez límite

Eurocódigo 3. Curvas de pandeo lateral



— · — Acero al carbono: secciones en I soldadas

— Acero al carbono: secciones en C conformadas en frío

····· Acero inoxidable: secciones en I soldadas

— — Acero inoxidable: secciones en C conformadas en frío

Esbeltez adimensional

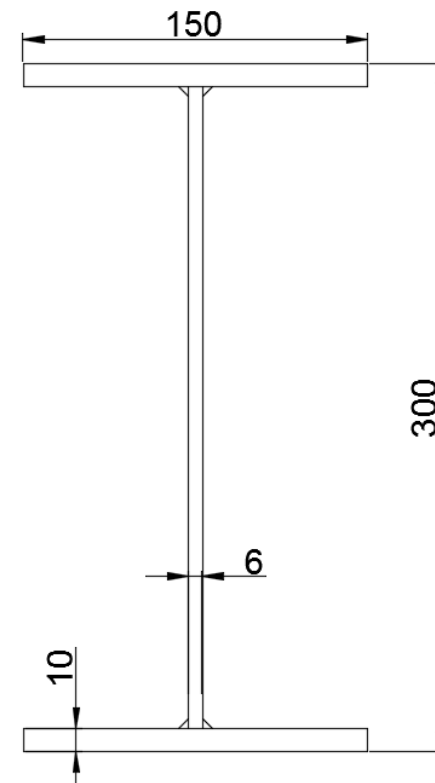
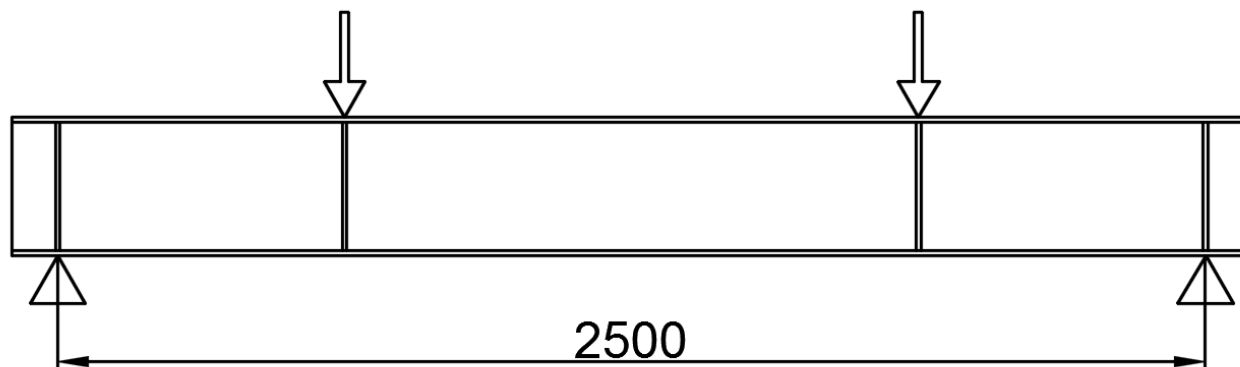
- Esbeltez a pandeo lateral:

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

- Curvas de pandeo como para compresión (excepto curva a_0)
- W_y depende de la clasificación seccional
- M_{cr} es el momento flector crítico elástico de pandeo lateral

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo Lateral

- Viga de sección en I flectada



	Acero al carbono	Acero inoxidable dúplex
Material	S355	EN 1.4162
f_y [N/mm ²]	355	450
E [N/mm ²]	210000	200000

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo Lateral

EC 3-1-1: S355

■ Clasificación

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

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

Clase 1

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

Clase 1

La sección es Clase 1

EC 3-1-4: Dúplex

■ Clasificación

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

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

Clase 3

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

Clase 3

La sección es Clase 3

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo Lateral

EC 3-1-1: S355

- Momento último
 - Para Clase 1

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

EC 3-1-4: Dúplex

- Momento último
 - Para Clase 3

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

Revisión de EC 3-1-4:

- Límites de clasificación: más cercanos a los de acero al carbono
 - Con los nuevos límites la sección es Clase 2

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

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo Lateral

Momento flector crítico elástico de pandeo lateral:

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

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: dúplex
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]	5,6.10 ⁶	5,6.10 ⁶
I_T [mm ⁴]	1,2.10 ⁵	1,2.10 ⁵
I_ω [mm ⁶]	1,2.10 ¹¹	1,2.10 ¹¹
E [MPa]	210000	200000
G [MPa]	81000	77000
M_{cr} [kNm]	215	205

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo Lateral

Resistencia frente a pandeo lateral

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Dúplex	EC 3-1-4: Revisado
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

Eurocódigo 3. Ejemplo de Pandeo Lateral

■ Comparación

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Dúplex	EC 3-1-4: Revisado
f_y [N/mm ²]	355	450	450
γ_{M0} [-]	1,0	1,1	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
Sección $M_{c,Rd}$	196	202	226
Pandeo lateral $M_{b,Rd}$	111	99	103

- En este ejemplo, las vigas de acero al carbono e inoxidable presentan una resistencia similar a pandeo lateral
- No obstante: Ensayos y estudios recientes indican que las especificaciones de EC3-1-4 deberían adaptarse para ser más reales
 ⇒ **demasiado conservadores**
 (Esto se mostrará en el ejemplo de elementos finitos)

Parte 4

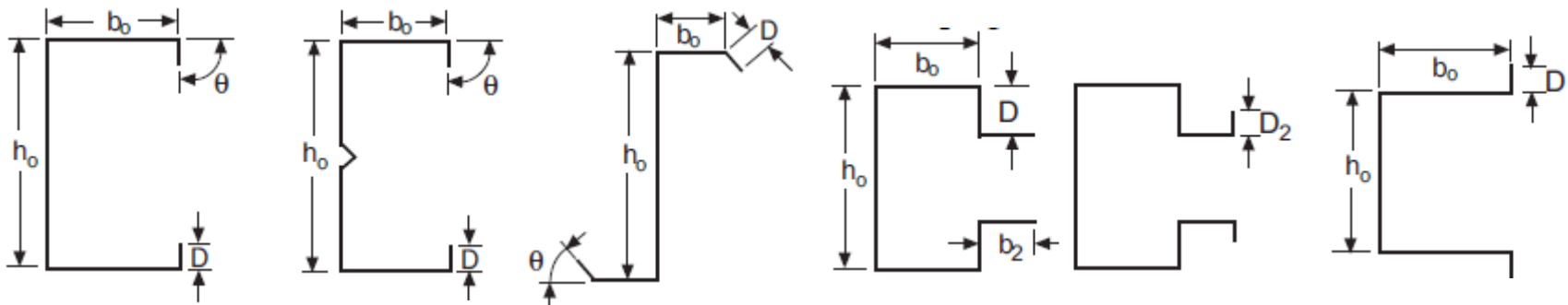
Métodos alternativos

Métodos alternativos

- Direct Strength Method (DSM)
 - Incluido en la norma americana
 - Para perfiles de pared delgada
- Continuous Strength Method (CSM)
 - Incluye el efecto beneficioso del endurecimiento por deformación
- Modelos de elementos finitos
 - Método más tedioso
 - Puede incluir todas las especificidades del modelo o problema estudiado

Direct Strength Method

- Apéndice 1 de la norma AISI
- Método muy sencillo y directo
- Empleado para secciones de pared delgada

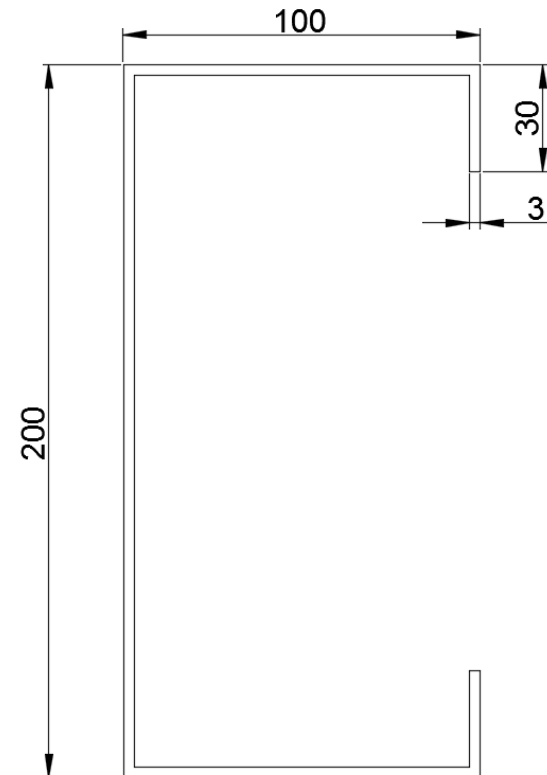


- Requiere un “Análisis de modos elásticos de pandeo”
 - Métodos teóricos disponibles en la literatura
 - Métodos de bandas finitas (por ejemplo CUFSM)
- Más información en: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

Direct Strength Method – Ejemplo

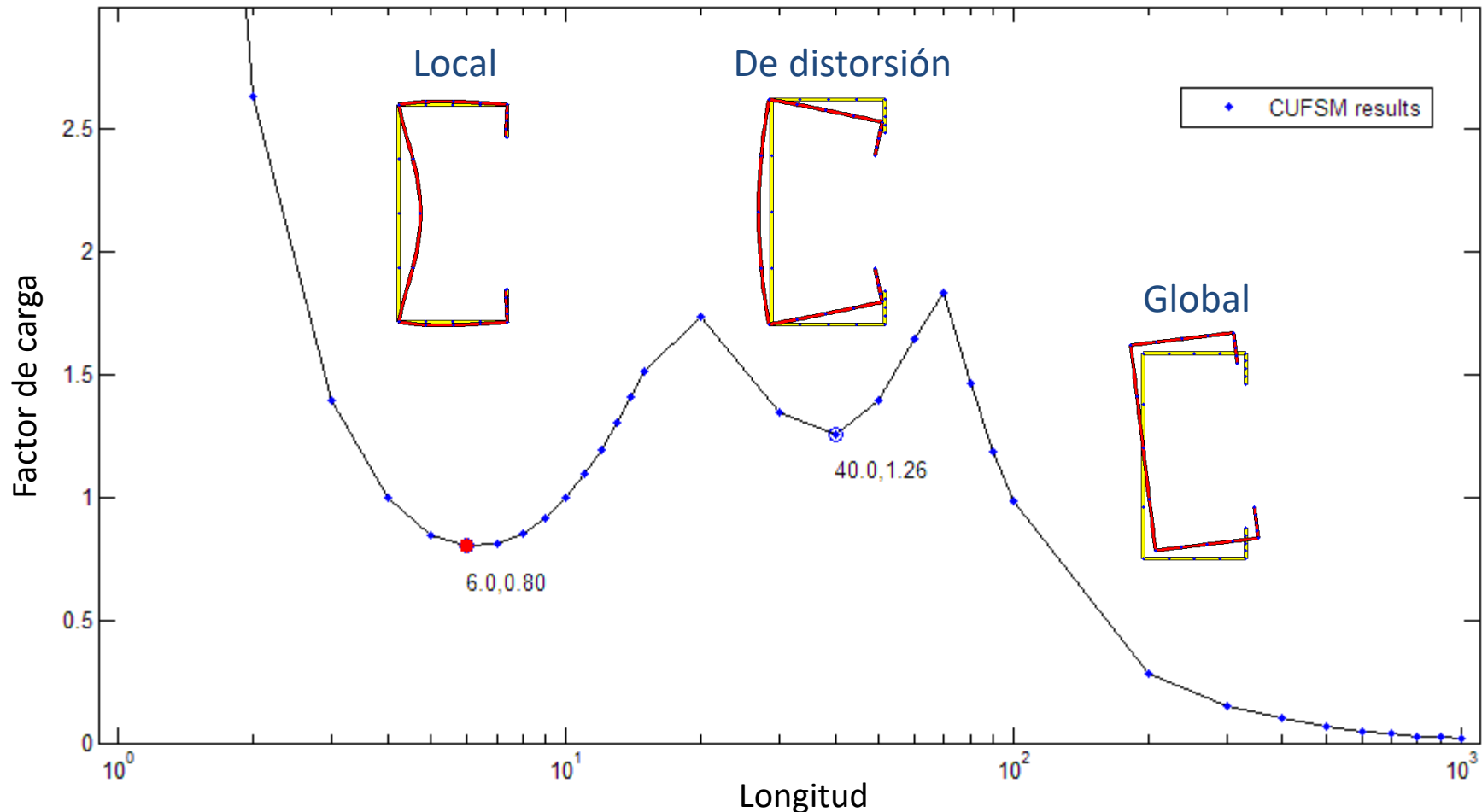
- Sección en C con labios rigidizados sometida a compresión
 - Pilar simplemente apoyado
 - Altura de pilar: 5m

	Acero inoxidable 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 – Ejemplo

- Primer paso: Análisis de modos elásticos de pandeo



Direct Strength Method – Ejemplo

- Resultados del análisis de modos elásticos de pandeo
 - En el ejemplo, los factores de carga obtenidos del análisis de modos de pandeo son:
 - Para abolladura local: 0,80
 - Para abolladura por distorsión: 1,26
 - Para pandeo por flexión: 0,28

- Segundo paso: Cálculo de las resistencias nominales
 - Para abolladura local \Rightarrow una ecuación
 - Para abolladura por distorsión \Rightarrow una ecuación
 - Para pandeo por flexión \Rightarrow una ecuación

Direct Strength Method – Ejemplo

- Resistencia nominal de pandeo por flexión P_{ne}

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

- $P_y = Af_y = 376 \text{ kN}$

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

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 – Ejemplo

- Resistencia nominal frente a abolladura 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 – Ejemplo

- Resistencia nominal frente a abolladura por distorsión 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 – Ejemplo

- Tercer paso: La resistencia a compresión es “simplemente” la menor de las tres resistencias nominales obtenidas
 - Abolladura local: $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$
 - Abolladura por distorsión: $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$
 - Pandeo por flexión: $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

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

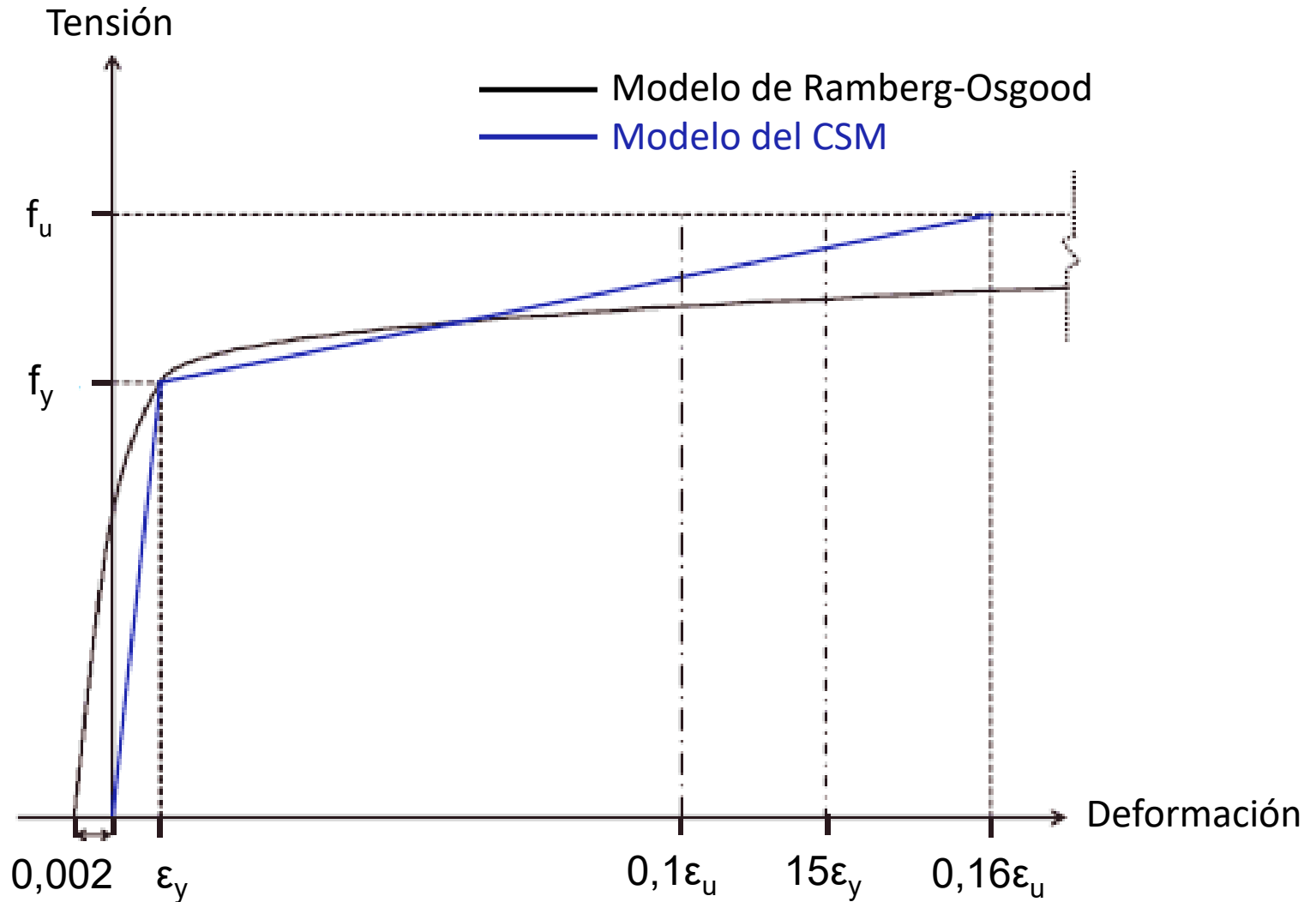
Continuous Strength Method

- Propiedades materiales del acero inoxidable:
 - Modelo material no lineal
 - Importante endurecimiento por deformación
 - Los métodos de cálculo convencionales no son capaces de considerar el potencial real de la sección transversal

El Continuous Strength Method
emplea un modelo material que
incluye los efectos de endurecimiento
por deformación

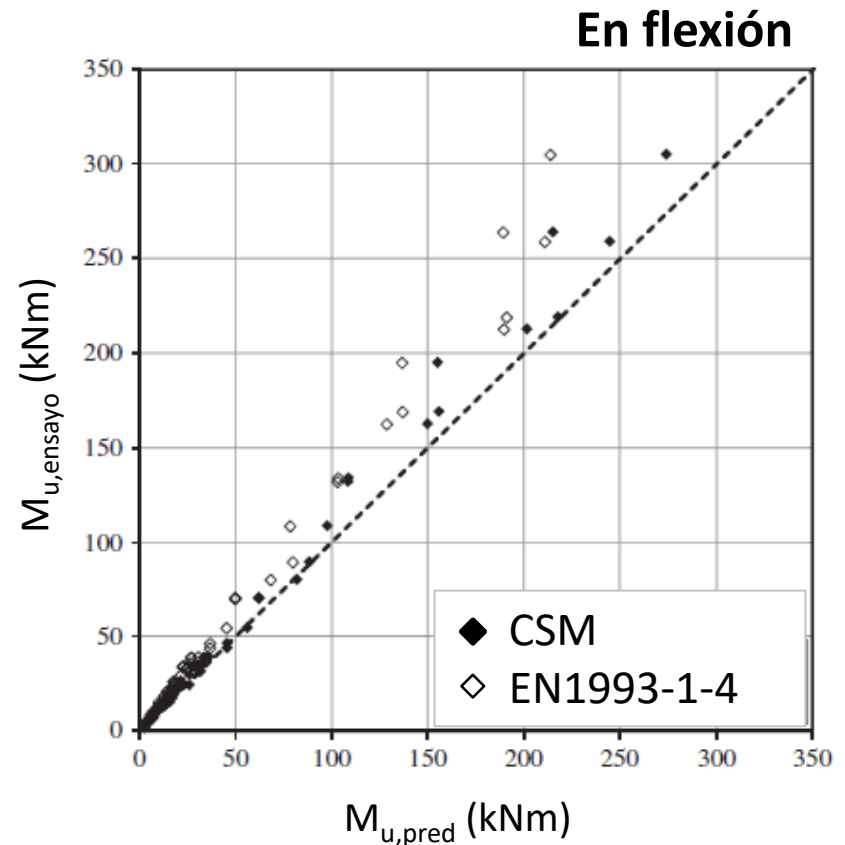
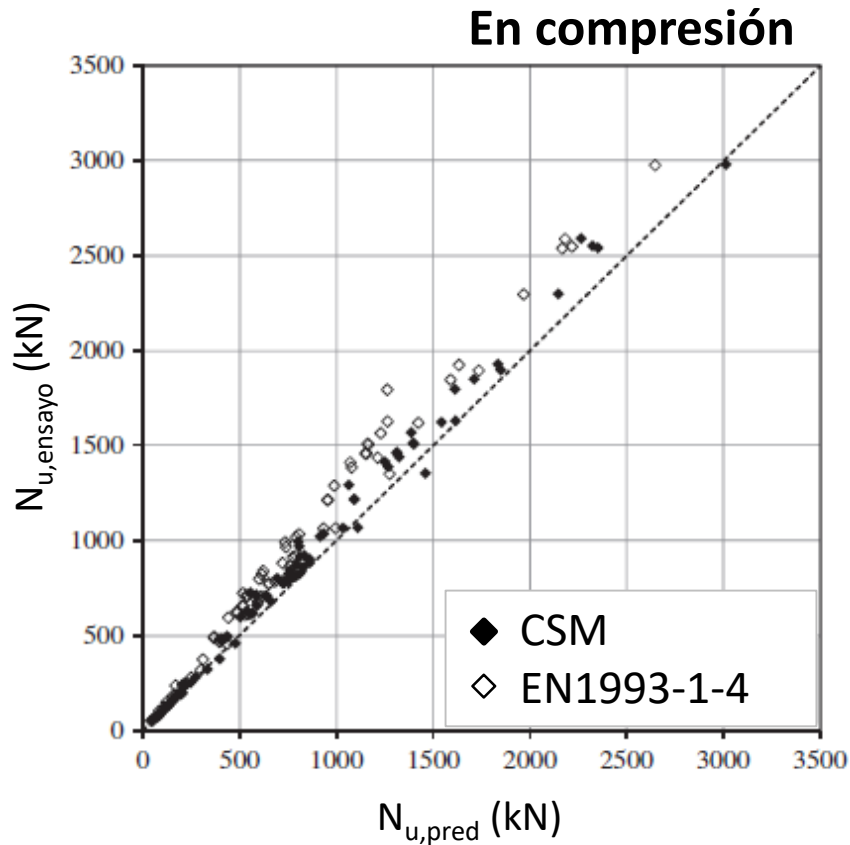
Continuous Strength Method

- Modelo material considerado por el CSM:



Continuous Strength Method

- Comparación entre las predicciones de EC3 y CSM y resultados experimentales:

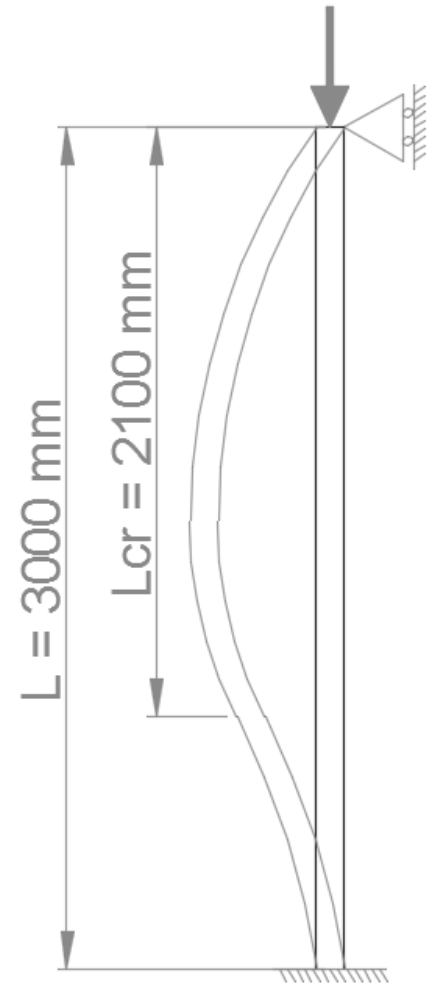
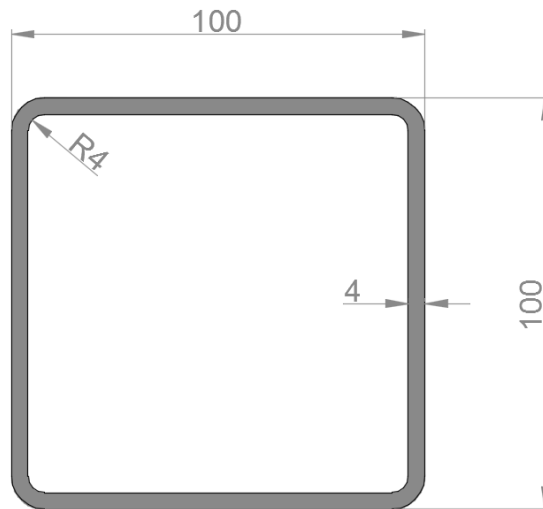


El CSM estima el comportamiento seccional de manera precisa

CSM: Ejemplo de pandeo por flexión

- Sección tubular rectangular conformada en frío sometida a una compresión concéntrica (ejemplo de la diapositiva 51)

	Acero inoxidable austenítico
Material	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	230
E [N/mm ²]	200000



CSM: Ejemplo de pandeo por flexión

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

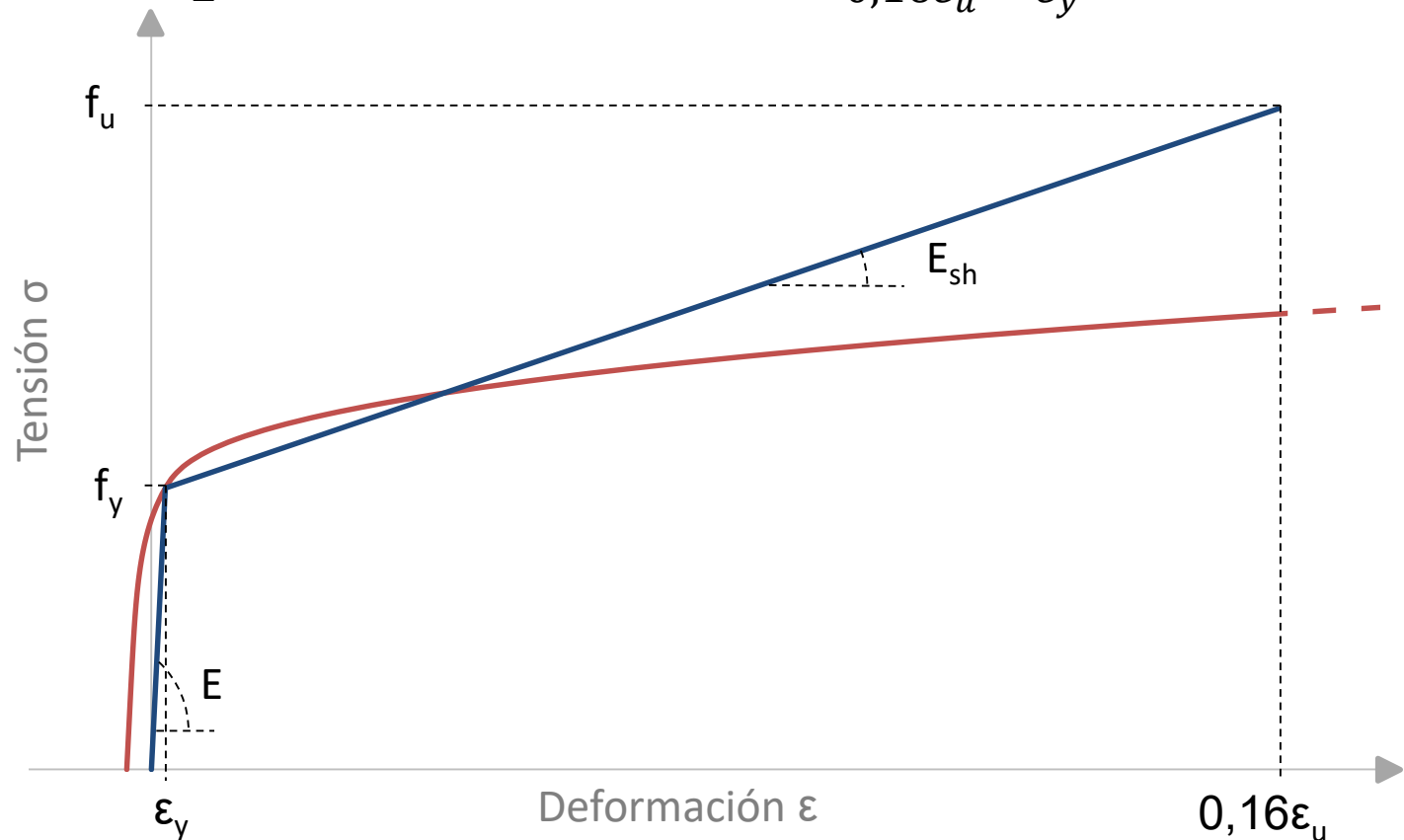
$$f_u = 540 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

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



CSM: Ejemplo de pandeo por flexión

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

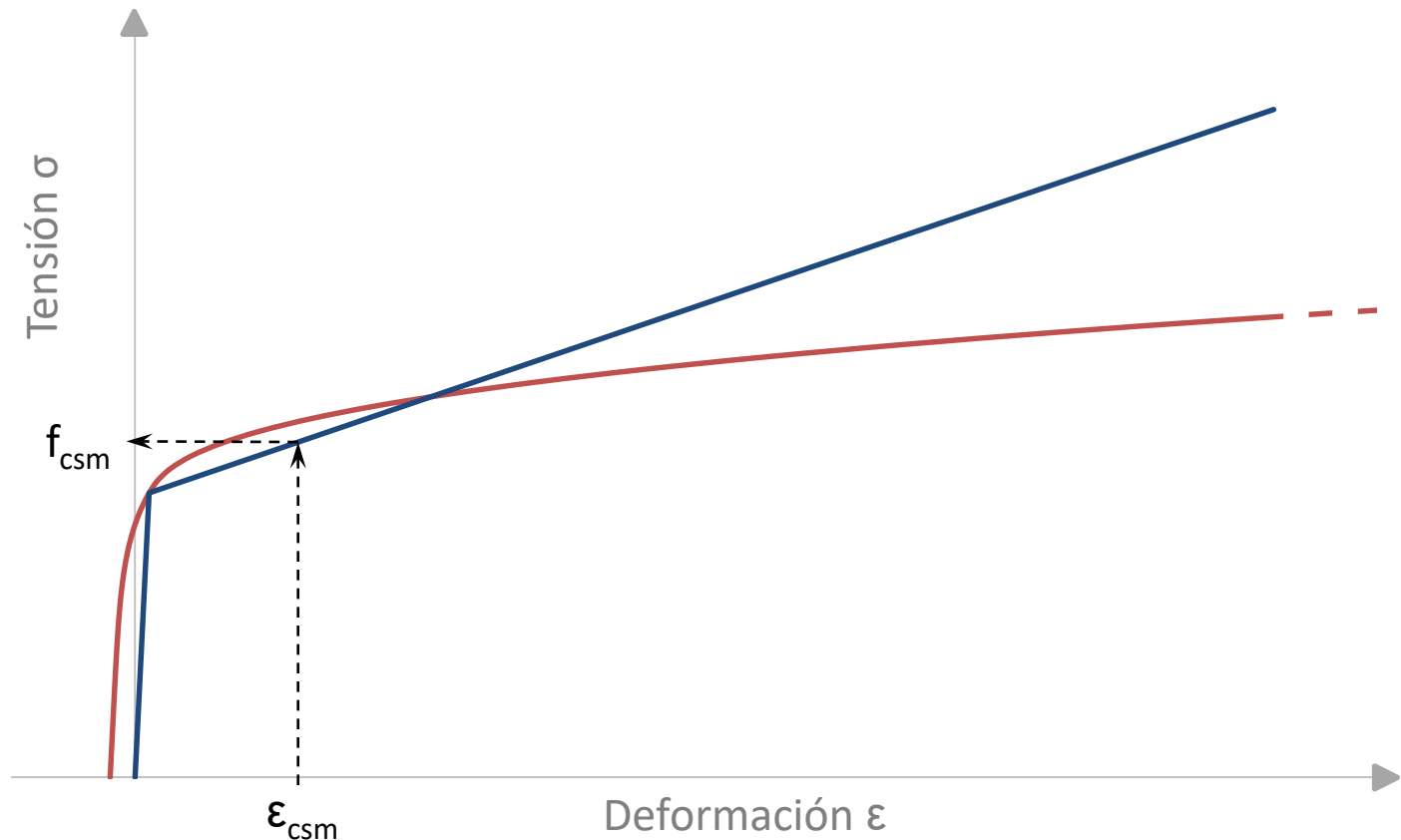
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

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



CSM: Ejemplo de pandeo por flexión

- $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} = 0,60$
 - $\sigma_{cr,cs}$ = tensión crítica de abolladura de la sección transversal bruta considerando la interacción entre elementos
- $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} = 5,27$
- $f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 247 \text{ N/mm}^2$
- $N_{c,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} = 335 \text{ kN}$

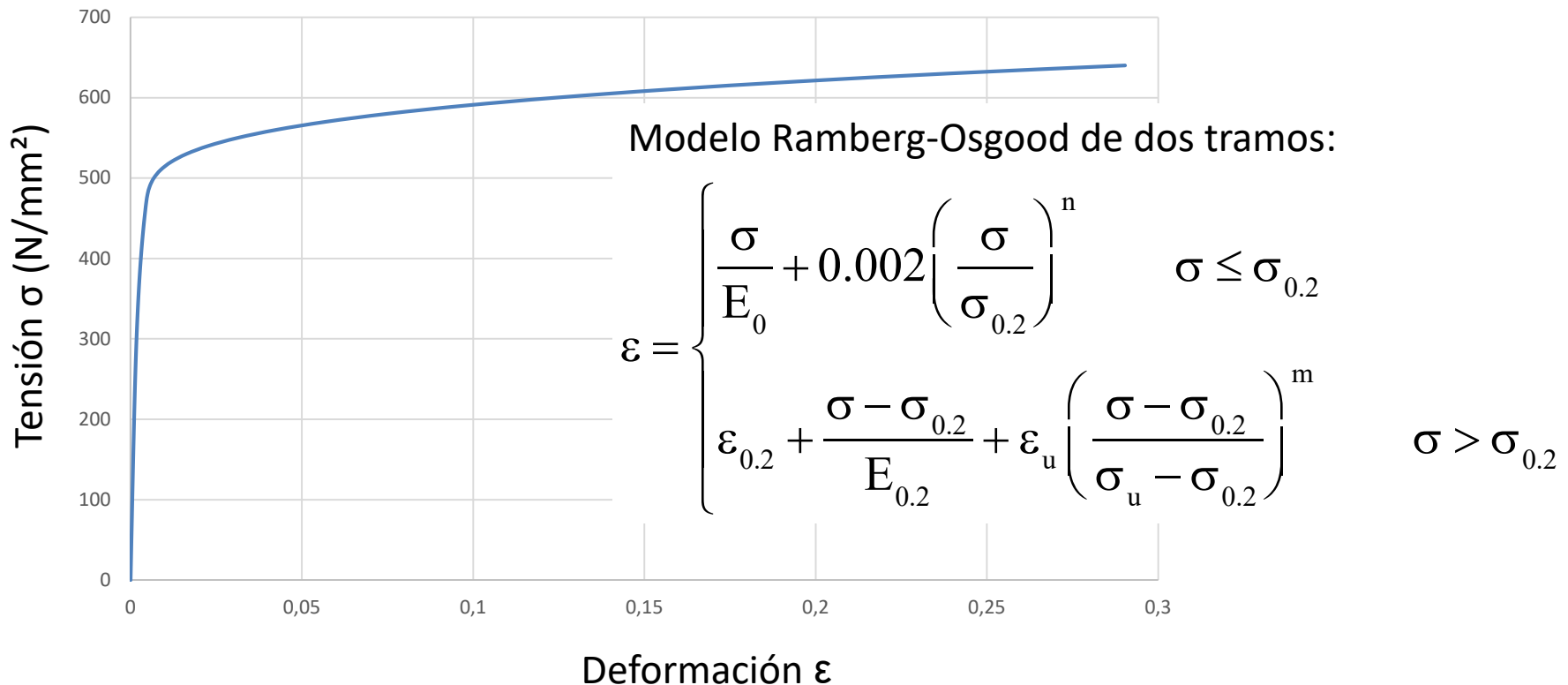
CSM: Ejemplo de pandeo por flexión

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

	EC3-1-1: S235	CSM: Austenítico	EC3-1-4: Austenítico
f_y [N/mm ²]	235	230	230
γ_{M0} [-]	1,0	1,1	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
Sección transversal $N_{c,Rd}$ [kN]	351	335	313
Pandeo $N_{b,Rd}$ [kN]	281	294	277

Modelo de elementos finitos

- La curva tensión-deformación del material puede modelarse de manera precisa (por ejemplo, utilizando el modelo de Ramberg-Osgood o a partir de la curva experimental “real” obtenida de ensayos)



Modelo de elementos finitos

- Los parámetros de no linealidad pueden obtenerse de las siguientes expresiones (de acuerdo con las ecuaciones revisadas por Rasmussen):

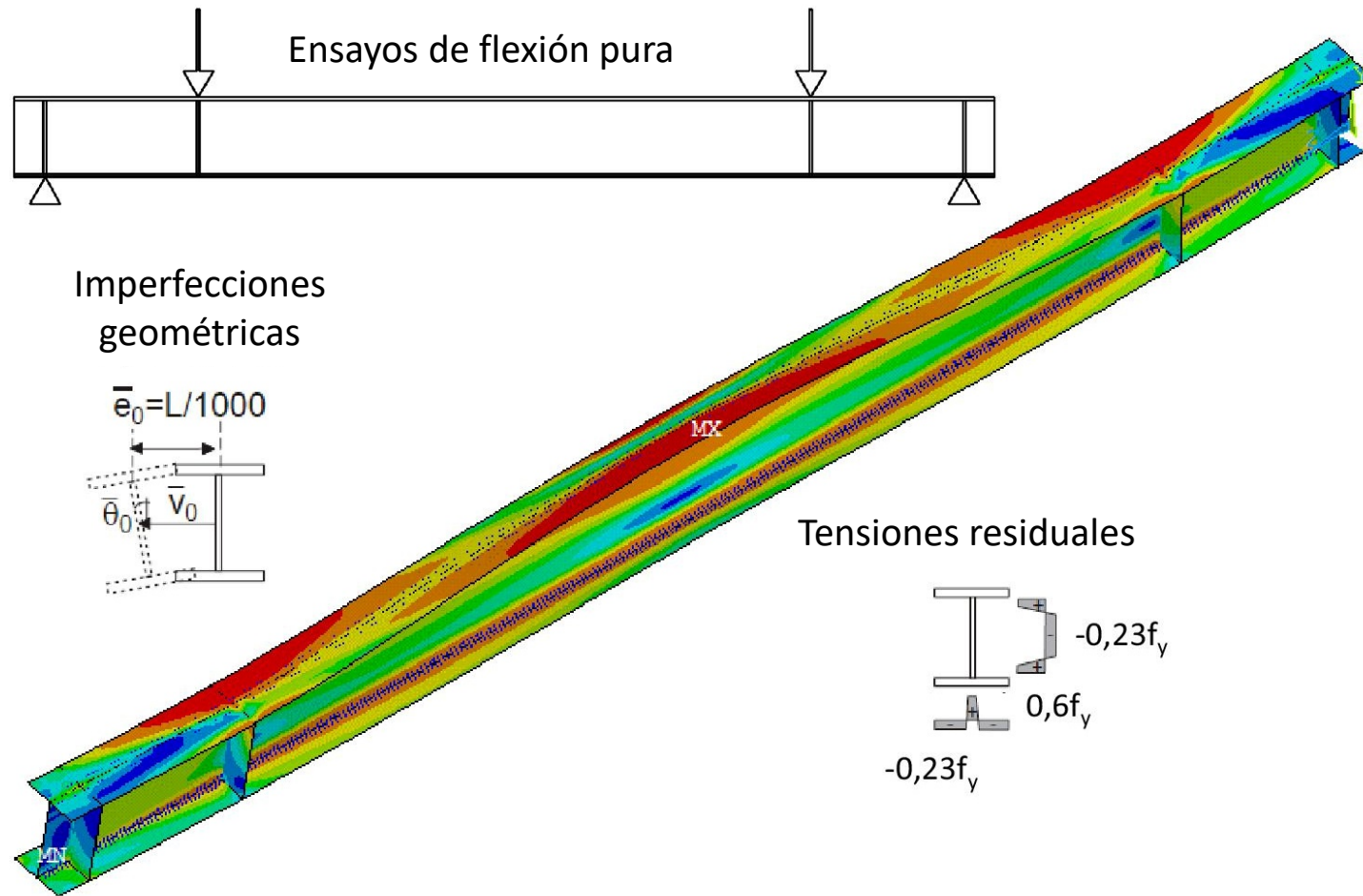
$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n \frac{E_0}{\sigma_{0.2}}}$$

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

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = \begin{cases} 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} & \text{para aceros inoxidables austeníticos y dúplex} \\ \frac{0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}}{1 - 0.0375(n - 5)} & \text{para todos los grados de acero inoxidable} \end{cases}$$

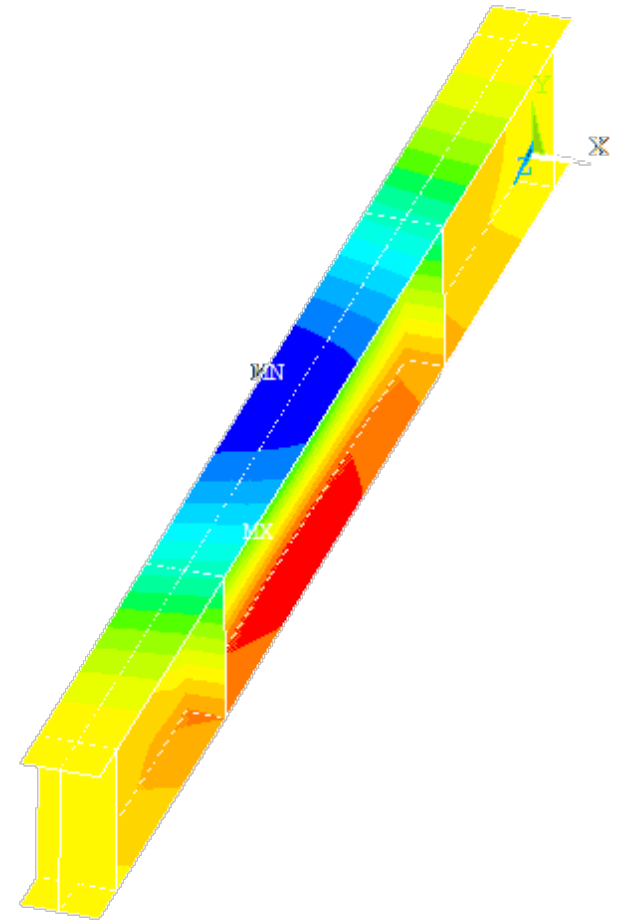
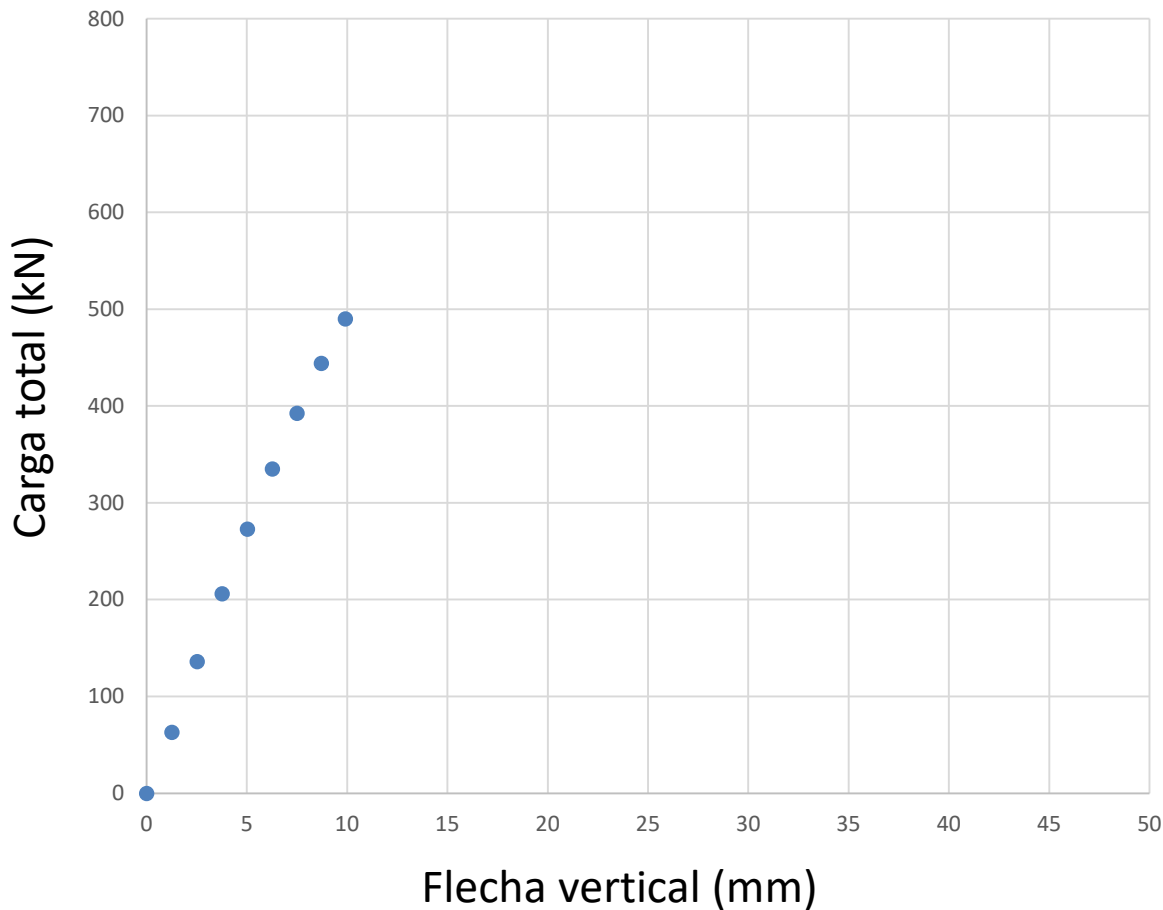
Modelo de elementos finitos

- Viga en I flectada sometida a pandeo lateral: todas las imperfecciones pueden ser modelizadas



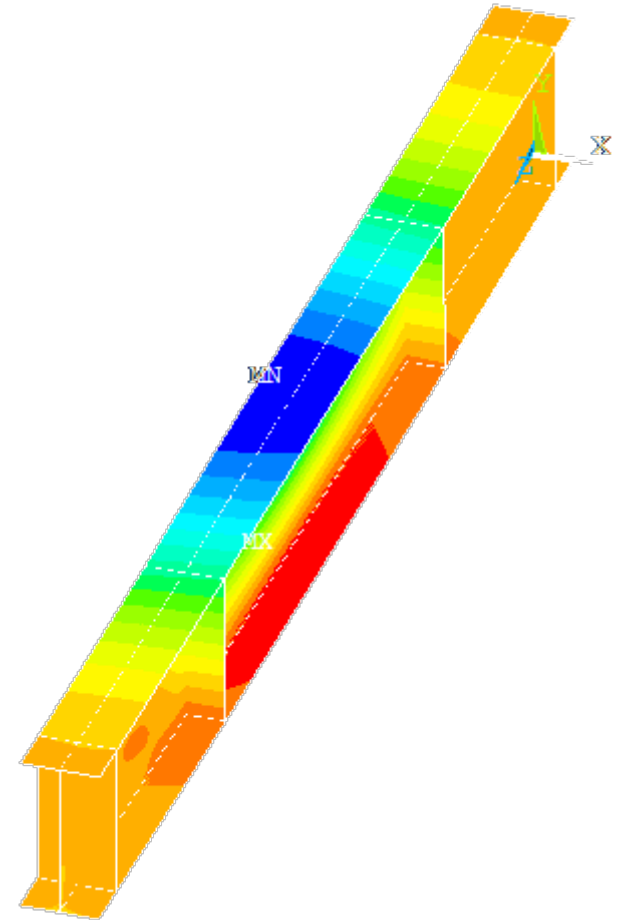
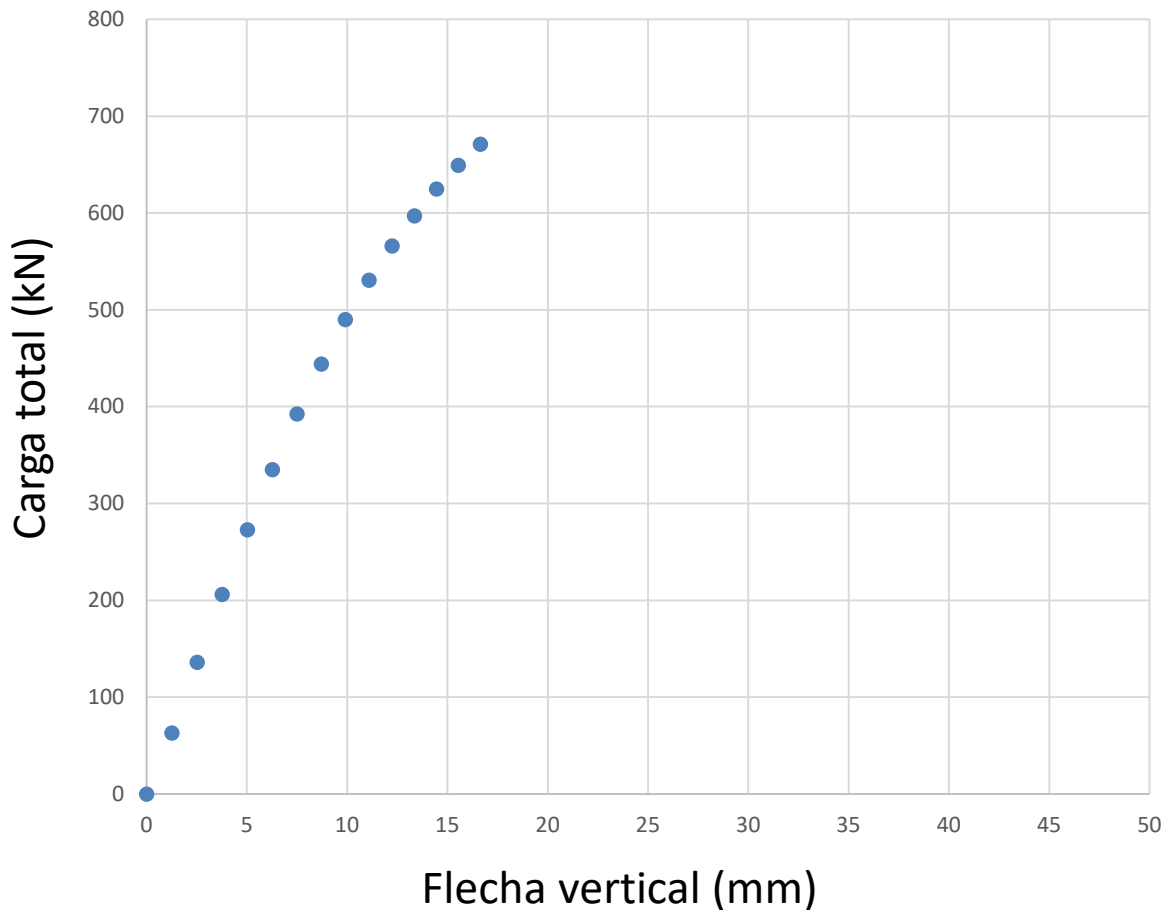
Modelo de elementos finitos

- Permiten obtener las curvas carga-flecha
 - Resultados: comportamiento rama elástica e inicio de plastificación



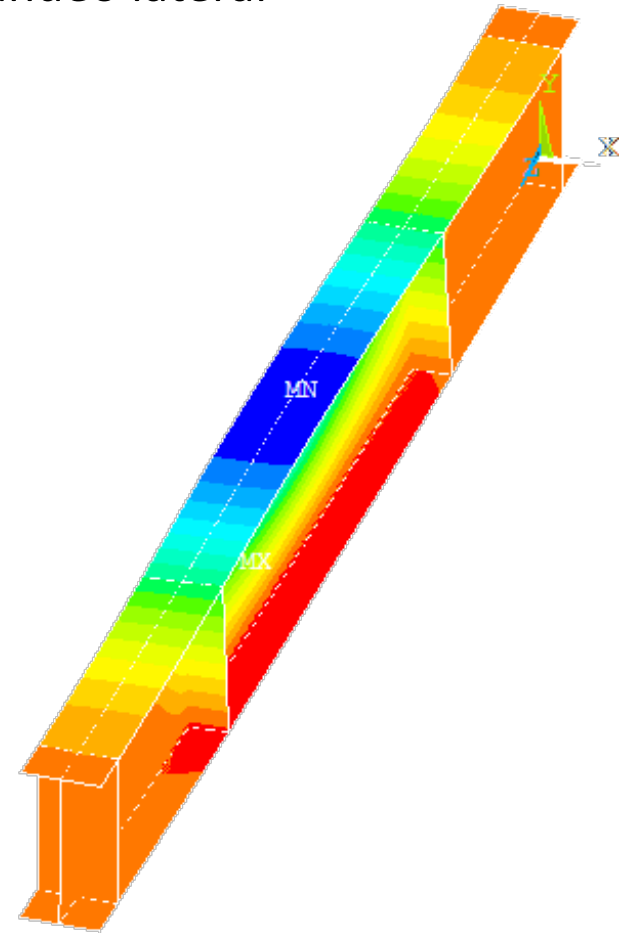
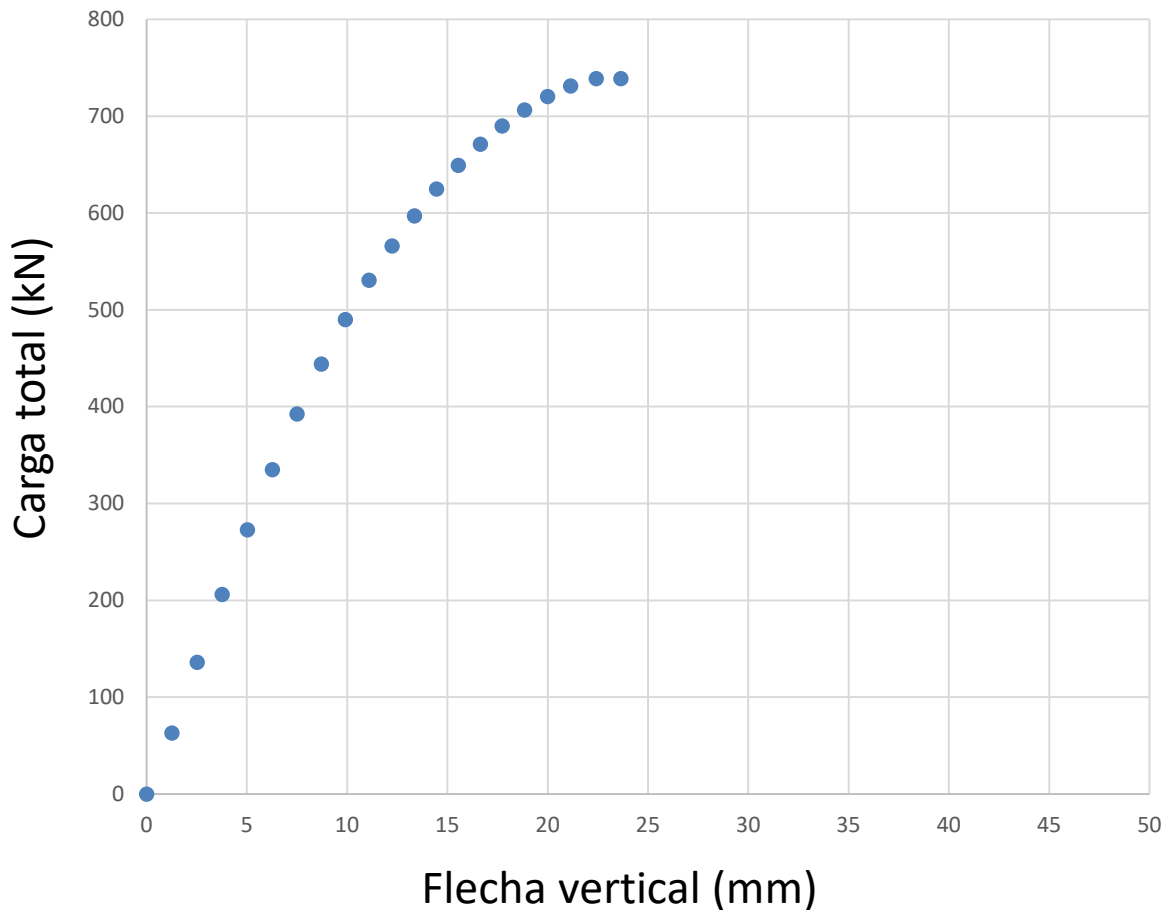
Modelo de elementos finitos

- Permiten obtener las curvas carga-flecha
 - Resultados: fenómeno de inestabilidad => Pandeo lateral



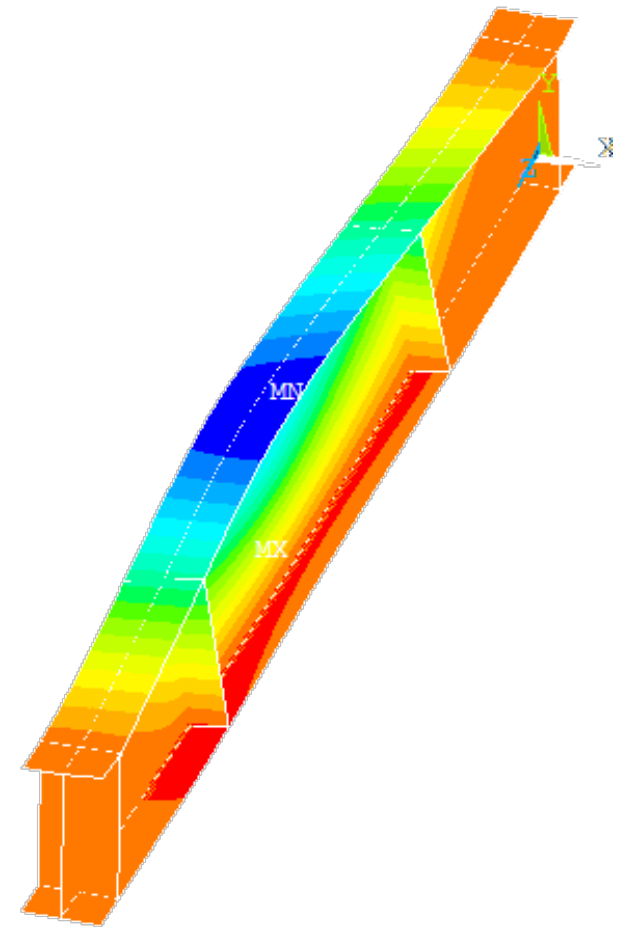
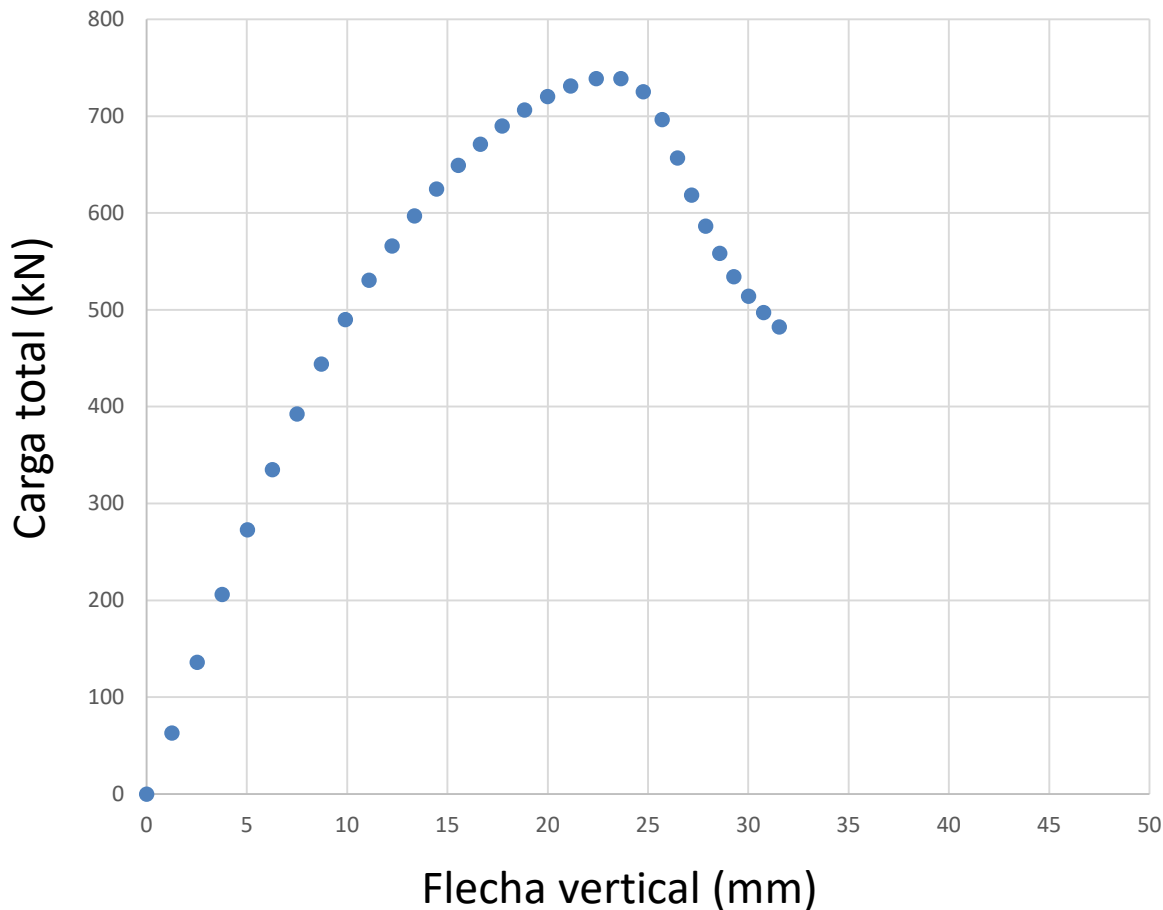
Modelo de elementos finitos

- Permiten obtener las curvas carga-flecha
 - Resultados: fenómeno de inestabilidad => Pandeo lateral



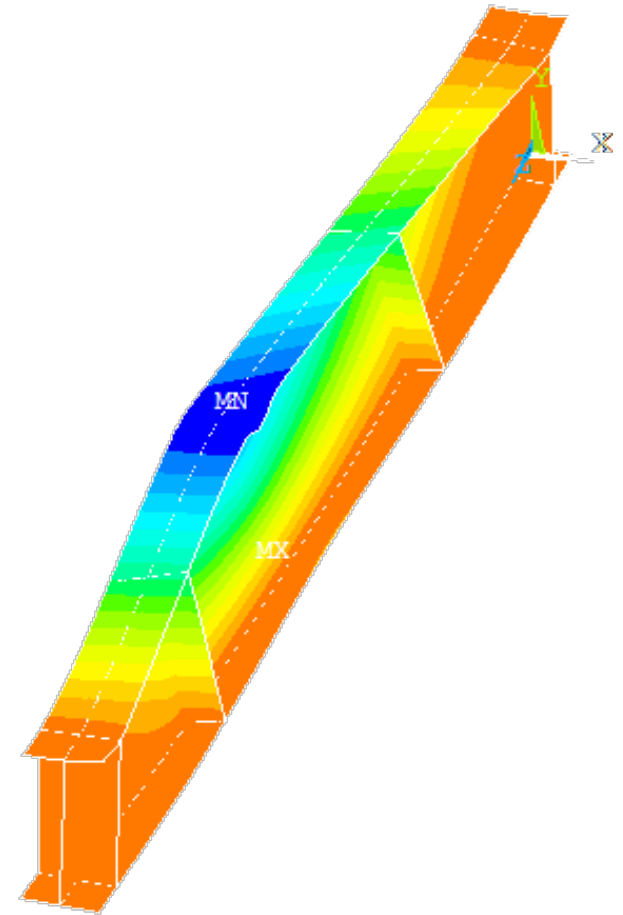
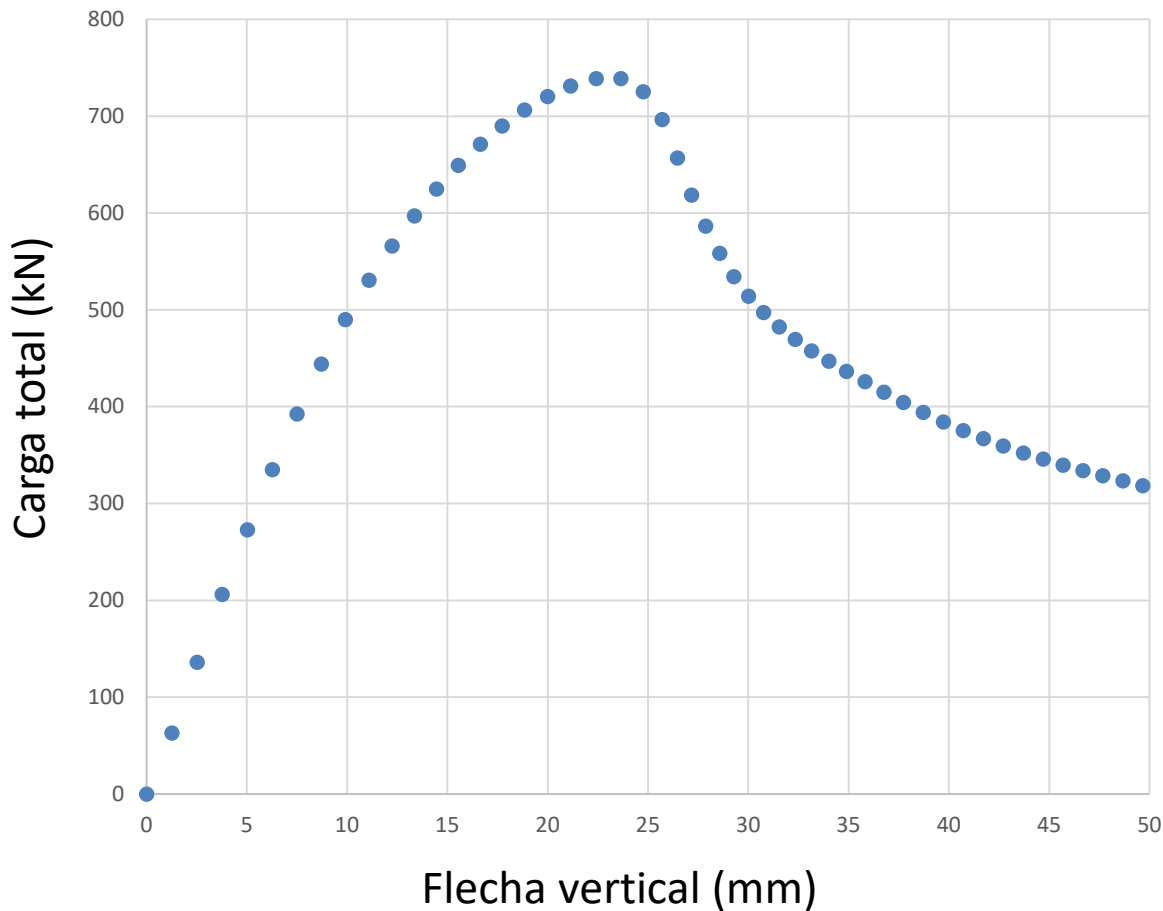
Modelo de elementos finitos

- Permiten obtener las curvas carga-flecha
 - Resultados: comportamiento postcrítico

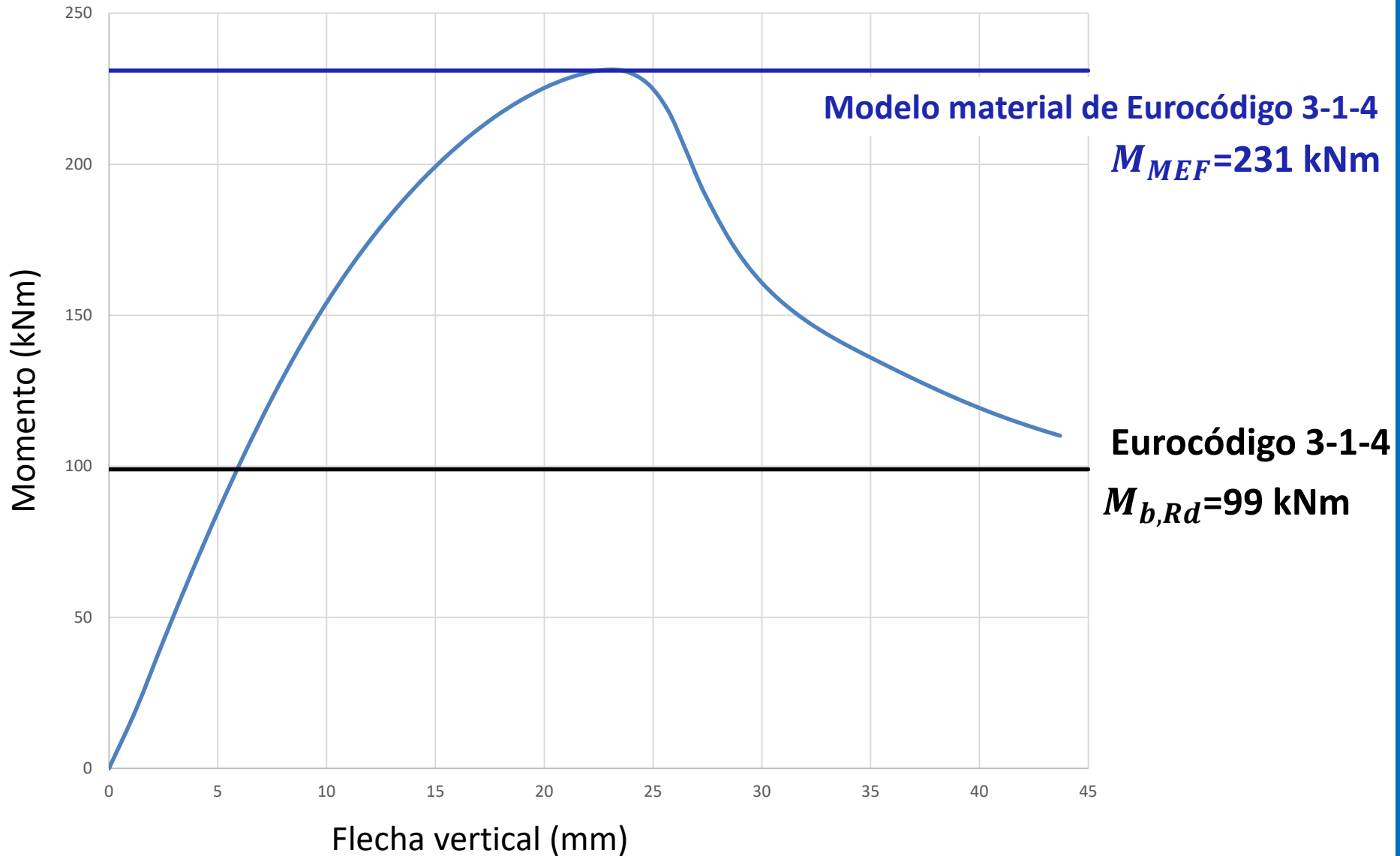


Modelo de elementos finitos

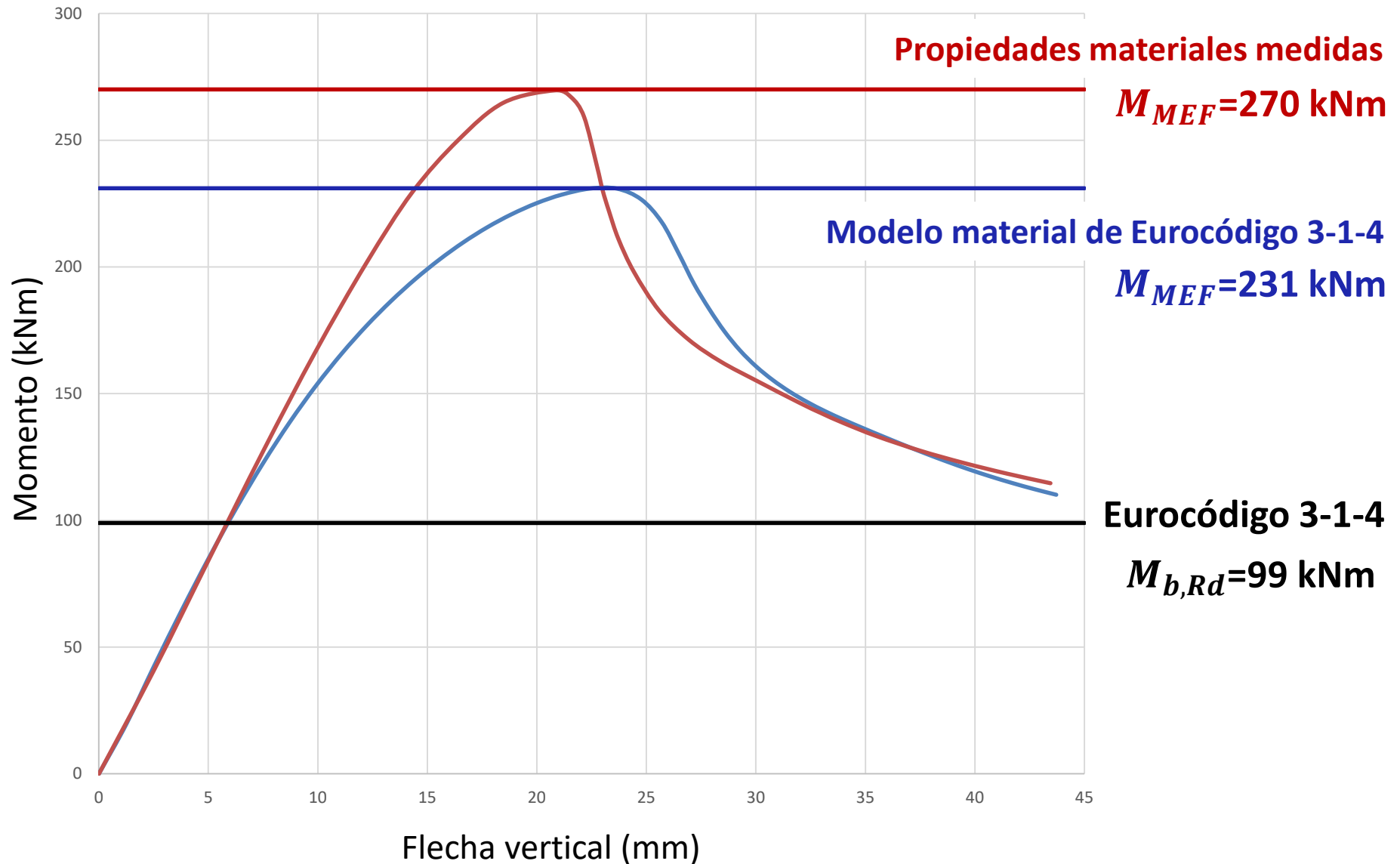
- Permiten obtener las curvas carga-flecha
 - Resultados: comportamiento postcrítico



Modelo de elementos finitos



Modelo de elementos finitos



Parte 5

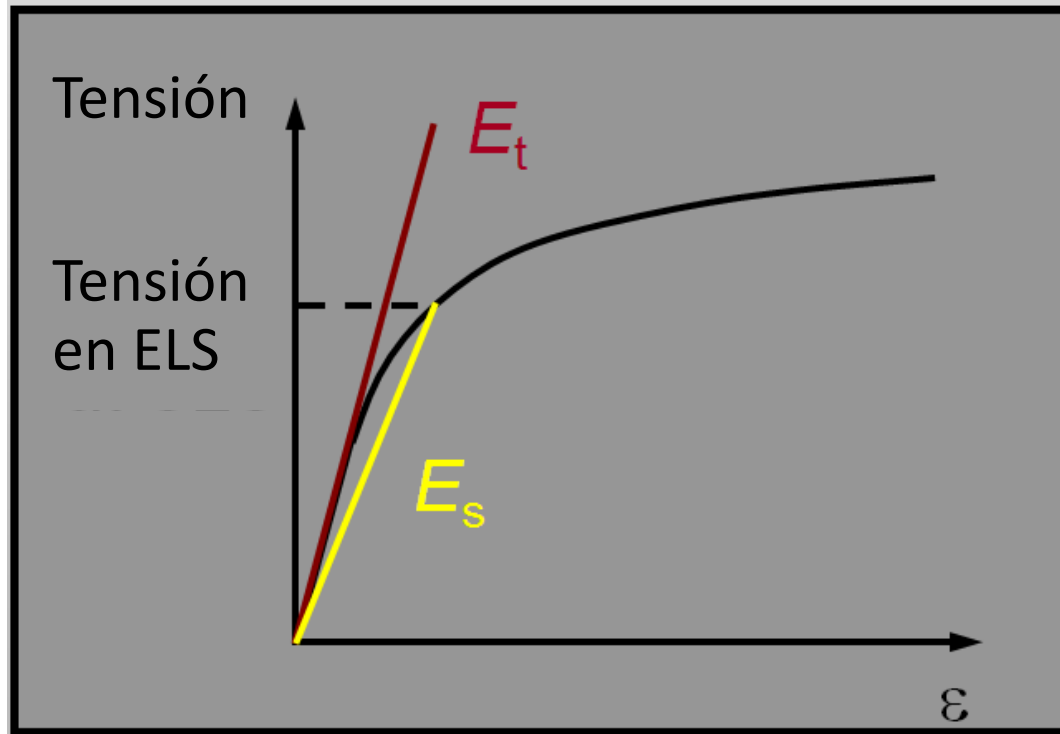
Flechas

Flechas

- La curva tenso-deformacional no lineal implica que la rigidez del acero inoxidable ↓ conforme la tensión ↑
- Las flechas son ligeramente superiores para el acero inoxidable que para el acero al carbono
- Debe emplearse el módulo secante correspondiente a la tensión en el elemento en Estado Límite de Servicio (ELS)

Flechas

Módulo secante E_s para la tensión en el elemento en ELS



Flechas

Módulo secante E_s obtenido del modelo de Ramberg-Osgood:

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

f es la tensión en estado límite de servicio

n es una constante material

Fechas en una viga de acero inoxidable austenítico

Relación de tensión f/f_y	Módulo secante, E_s N/mm ²	% incremento en flechas
0.25	200,000	0
0.5	192,000	4
0.7	158,000	27

f = tensión en Estado Límite de Servicio

Parte 6

Información adicional

Respuesta frente a acciones sísmicas

- Mayor ductilidad (acero inoxidable austenítico) + soporta mayor número de ciclos de carga
→ mayor disipación de energía histerética para cargas cíclicas
- Mayor endurecimiento por trabajado del material
→ favorece el desarrollo de zonas plásticas mayores y deformables
- Mayor dependencia a la velocidad de deformación
→ mayor resistencia para velocidades de deformación rápidas

Diseño de uniones atornilladas

- La resistencia mecánica y a la corrosión de los tornillos y del material de las piezas a unir debe ser similar
- Los tornillos de acero inoxidable deben utilizarse para conectar elementos de acero inoxidable para evitar corrosiones bimetalicas
- Los tornillos de acero inoxidable pueden también emplearse para conectar elementos de acero galvanizado y aluminio

Cálculo de uniones atornilladas

- Las directrices para tornillos de acero al carbono pueden aplicarse al acero inoxidable de manera general (tracción, cortante)
- Debido a la alta ductilidad del acero inoxidable, deben limitarse las deformaciones mediante expresiones especiales para la resistencia última.

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

Tornillos pretensados

Útiles en estructuras como puentes, torres, mástiles, etc. cuando:

- La unión se ve sometida a cargas de vibración,
 - Es necesario evitar el deslizamiento entre las partes a unir,
 - La carga aplicada cambia frecuentemente de signo positivo a negativo
-
- No hay reglas de diseño para tornillos pretensados de acero inoxidable
 - Siempre deben llevarse a cabo ensayos

Cálculo de uniones soldadas

- Las directrices para acero al carbono pueden aplicarse de manera general para el acero inoxidable
- Debe emplearse el material de aportación adecuado para el grado de acero inoxidable contemplado
- El acero inoxidable puede soldarse al acero al carbono, pero se requiere una preparación especial

Resistencia frente a fatiga

- El comportamiento a fatiga de las uniones soldadas está gobernado por la geometría de la soldadura
- La respuesta del acero inoxidable austenítico y dúplex es al menos tan bueno como el de acero al carbono
- Aplicar las directrices para acero al carbono

Parte 7

Herramientas para ingenieros

Herramientas para ingenieros

- Centro de Información Online
- Casos de estudio
- Guías de diseño
- Ejemplos de diseño
- Software

100
YEARS
OF
STAINLESS
STEEL

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 Información para el uso del acero inoxidable en la construcción

www.stainlessconstruction.com

The screenshot shows the homepage of the website. The header features the title 'ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION' in a light blue box. Below the header is a dark navigation bar with six menu items: 'SPECIFICATION', 'CODES & STANDARDS', 'DESIGN', 'FABRICATION & INSTALLATION', 'CASE STUDIES', and 'RESEARCH'. The main content area is split into two columns. The left column contains the text 'Stainless steel at your fingertips...' followed by a paragraph: 'This website will lead you to essential technical information about the use of stainless steel in construction.' Below this is a 'Featured Resource' section for 'Thames Gateway Water Treatment' and a search bar with the placeholder 'Enter search query' and a 'GO' button. The right column features a large image of a circular, ribbed stainless steel structure, possibly a water treatment component, set against a blue sky.

12 casos de estudio de aplicaciones estructurales

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 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.

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. 1.4535 (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.

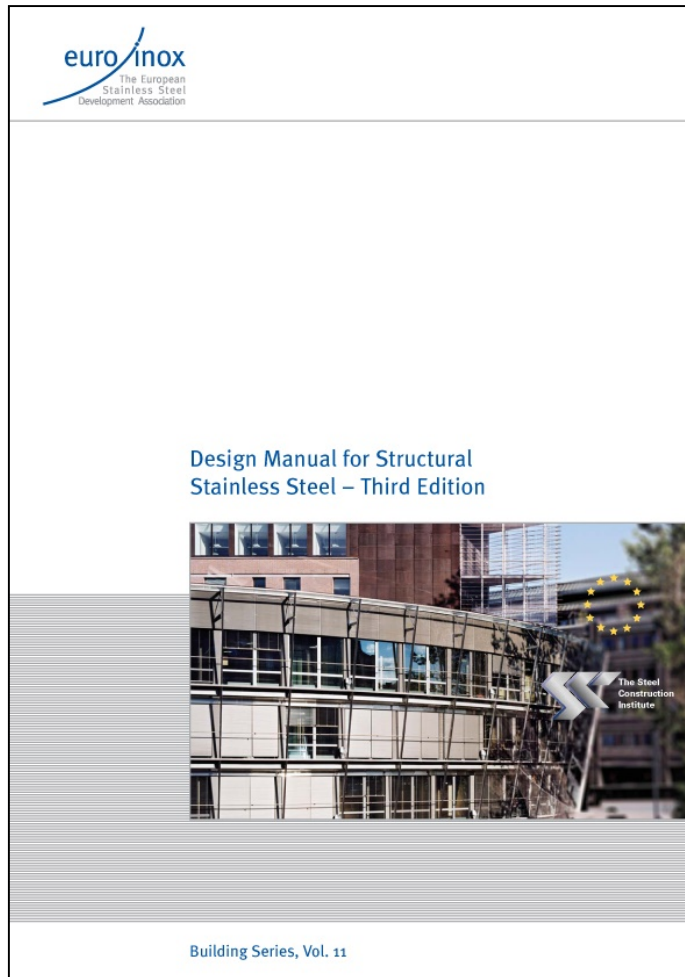


Figure 2: Mono tower and stay cables

A polished 1K finish (as defined in EN 10088 Part 2 [1]) was specified for all exposed surfaces, with an average surface roughness R_a of 0.5 μ m. 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.



Manual de diseño para Eurocódigo



www.steel-stainless.org/designmanual

- Guía
- Comentarios
- Ejemplos de diseño

Software de diseño online:

www.steel-stainless.org/software

Resumen

- Comportamiento estructural: similar al del acero al carbono, aunque requiere algunas modificaciones debidas a la curva tenso-deformacional no lineal
- Se han desarrollado normativas de diseño
- Recursos gratuitos (manuales de diseño, estudio de casos, ejemplos, software) disponibles!

Referencias

- 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

¡Muchas gracias!

Barbara Rossi – barbara.rossi@kuleuven.be
Maarten Fortan – maarten.fortan@kuleuven.be