

Presentazione di supporto per i docenti  
di Architettura/Ingegneria civile

## **Capitolo 07A:**

# **Applicazioni strutturali di rebar in acciaio inossidabile**

Vedere anche: [stainlesssteelrebar.org](http://stainlesssteelrebar.org)

La scelta sbagliata del materiale  
può provocare grossi problemi







## Un tipico caso di studio: corrosione dello svincolo autostradale di Turcot a Montreal<sup>1,2</sup>

- Uno svincolo fondamentale tra le autostrade Decarie (Nord-Sud) e Ville Marie (Est-Ovest), costruito nel 1966.
- Oltre 300.000 veicoli al giorno
- Costruito in cemento armato, fortemente corroso oggi dal sale antighiaccio

# Dovrà essere sostituito

- Nonostante i continui interventi di supervisione e riparazione, dovrà essere rimosso o parzialmente sostituito,
  - Costo stimato finora 3000M dollari canadesi.
  - Inoltre, dovranno essere spesi 254M di dollari canadesi per garantire la sicurezza fino alla sostituzione nel 2018
- La durata della struttura sarà di soli 50 anni!



In che modo il cemento armato può essere danneggiato dalla corrosione

# Diffusione di ioni aggressivi (solitamente cloruri) nel cemento:

Fasi<sup>3</sup>:

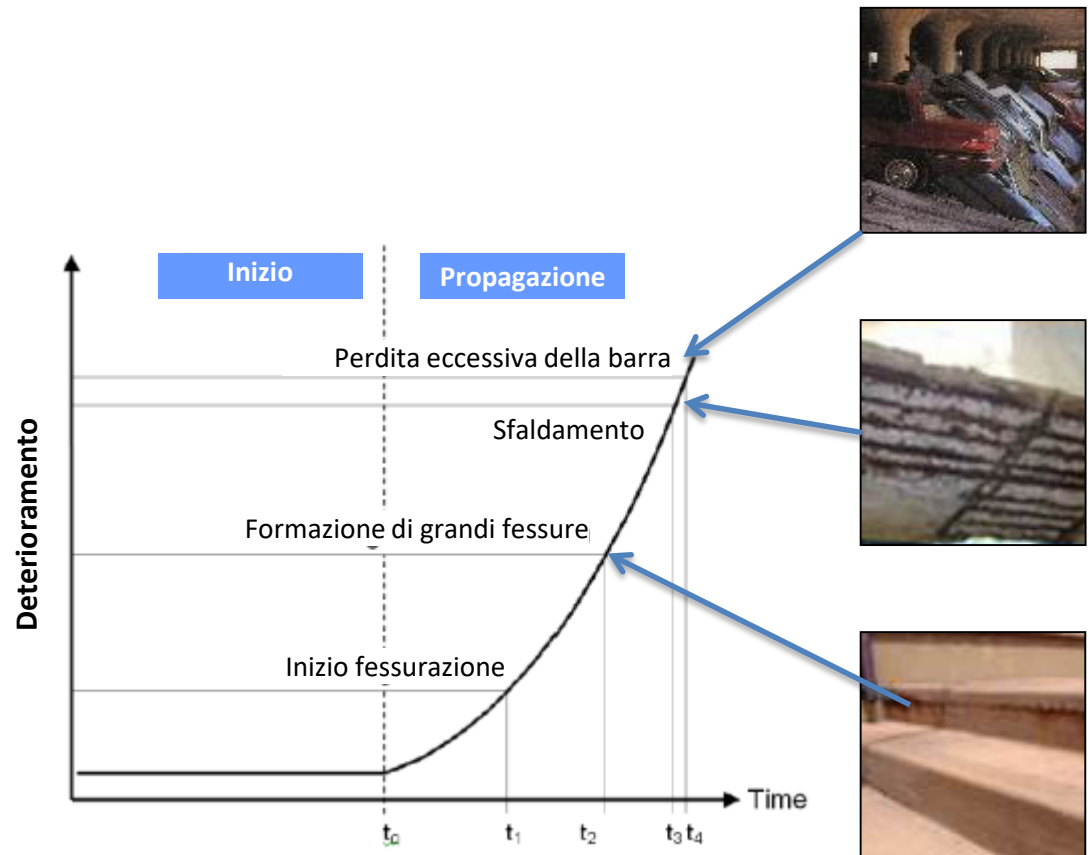
1. Una volta che gli ioni aggressivi raggiungono il rebar in acciaio al carbonio ( $t_0$ ), comincia la corrosione

2. I prodotti di corrosione, che occupano un volume maggiore rispetto all'acciaio, esercitano una pressione verso l'esterno

3. Si verifica una fessurazione nel cemento ( $t_1$ ), facilitando l'accesso ai cloruri

4. Il cemento si sfalda ( $t_3$ ), esponendo l'armatura

5. Se la corrosione viene trascurata, questa continuerà fino a quando l'armatura non potrà più sostenere le sollecitazioni portando al crollo della struttura ( $t_4$ )



# Le fessurazioni nel cemento accelerano la corrosione

Il cemento presenta spesso delle fessurazioni, attraverso le quali gli ioni corrosivi raggiungono velocemente l'acciaio.

Ecco alcune cause di formazione di fessurazioni (rif. 4).

Notare che le fessurazioni non si verificano immediatamente e si presenteranno anche in aree nascoste, dove non potranno essere riparate.

	Forma della fessurazione	Causa principale	Tempo di comparsa
Assestamento plastico	Nella parte superiore e allineata con il rinforzo in acciaio	Tipo di fessurazione	10 minuti - tre ore
Ritiro plastico	Diagonale o casuale	Eccessiva evaporazione precoce	30 minuti - sei ore
Espansione e contrazione termica	Trasversale (esempio: nella pavimentazione)	Generazione di calore o gradienti di temperatura eccessivi	Un giorno - due/tre giorni
Ritiro per essiccazione	Trasversale o in rete	Presenza eccessiva di acqua nell'impasto; cattivo posizionamento dei giunti; giunti troppo distanti tra loro	Settimane - mesi
Congelamento e scongelamento	Parallelo alla superficie del cemento	Aerazione inadeguata; inerte grossolano non durevole	Dopo uno o due inverni
Corrosione dell'armatura di rinforzo	Sopra l'armatura di rinforzo	Rivestimento inadeguato del cemento; ingresso di umidità o cloruro	Più di due anni
Reazione alcali-aggregato	La rete si incrina; fessurazioni parallele ai giunti o ai bordi	Aggregato reattivo più umidità	Normalmente nel corso di cinque anni, ma può capitare molto prima con aggregati altamente reattivi
Attacco solfatico	La rete si incrina	Solfati esterni o interni che favoriscono la formazione di ettringite	Uno - cinque anni



La scelta corretta dei materiali è un buon investimento a lungo termine

## Il pontile di Progreso (1/3)<sup>5,6</sup>



A Progreso, in Messico, è stato costruito un pontile nel 1970.

L'ambiente marino ha corrosa l'armatura in acciaio al carbonio – la struttura è crollata.

## Il pontile di Progreso (2/3)



Il pontile vicino è stato eretto nel 1937 – 1941 usando rebar in acciaio inossidabile.

## Il pontile di Progreso (3/3)



Da allora, non sono stati necessari interventi di manutenzione ed è rimasto intatto.

Oggi, le strutture di ingegneria civile  
di maggior rilievo  
devono durare oltre 100 anni



# Haynes Inlet Slough Bridge, Oregon, USA 2004<sup>7,8</sup>

Un insolito ponte su archi con 400 tonnellate di barre per cemento armato in acciaio inossidabile sul piano stradale.

Per il collegamento per Haynes Inlet Slough, lungo 230 m, si prevede una durata di 120 anni senza interventi di manutenzione.

Anche se l'acciaio inossidabile ha un costo maggiore rispetto a quello dell'acciaio, il costo del ciclo di vita del ponte sarà notevolmente ridotto.





## **Ponte Hong Kong- Zhuhai- Macau <sup>9</sup> (la costruzione iniziò nel 2009, completata nel 2018)**

Il prestigioso progetto della strada rialzata sull'acqua Hong Kong- Zhuhai- Macau è uno dei progetti di ponte più grande al mondo. Il requisito di durata è pari a 120 anni senza manutenzione. Pertanto nelle aree critiche della struttura sono state previste armature di rinforzo in acciaio inossidabile, soprattutto nelle zone degli spruzzi. Alla fine saranno utilizzati 15000TM di acciaio inossidabile.



## **Broadmeadow Bridge, Dublino, Irlanda (2003)<sup>10</sup>**

Una nuova costruzione sull'estuario con 105TM di armatura di rinforzo in acciaio inossidabile nelle colonne e nei parapetti.



# Riparazione della diga Bayonne, Francia

La diga fu costruita negli anni 1960 per proteggere l'ingresso al porto

Il lato dell'oceano è più alto e protetto da blocchi da 40T che devono essere sostituiti quando usurati dalle tempeste

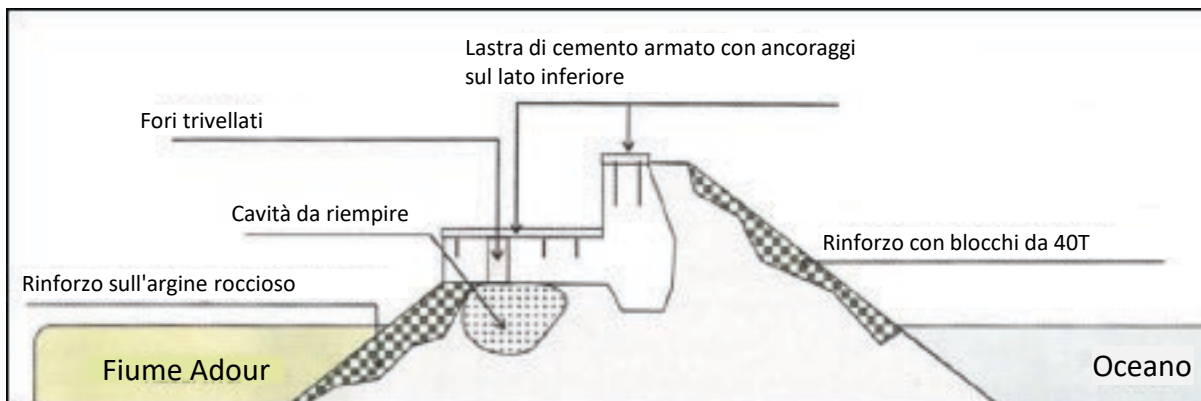
Sul lato del fiume una piattaforma larga 7m consente alle gru di grande portata di sollevare i blocchi

Vista aerea

Fessurazioni sul piano stradale e sul muro hanno reso necessari gli interventi di riparazione



## Sezione del muro sul mare



## Riparazione del muro sul mare

### Bayonne, Francia

La piattaforma e il muro sul mare sono stati rinforzati con acciaio inossidabile lean duplex (EN 1.4362)<sup>11</sup>

## Riparazione del muro sul mare in corso



## Burrasca sulla diga all'inizio del 2014







## Stonecutters Bridge, Hong Kong<sup>12,13</sup>

Il secondo ponte strallato più lungo del mondo, con un interasse principale di 1.018m

Le torri sono alte 298m con 1.600 tonnellate di acciaio inossidabile strutturale nella zona di ancoraggio dello strallo e 2800 tonnellate di rebar inox nella parte inferiore delle torri.



## **Belt Parkway Bridge, Brooklyn, USA (2004)<sup>14</sup>**

Per garantire una durata a lungo termine (100 anni) e una resistenza all'attacco corrosivo dell'ambiente marino e del sale sulla strada, le unità del ponte e le barriere dei parapetti sono state rinforzate con rebar in acciaio inossidabile di grado 2205.

# Quando si può considerare l'impiego di rebar in acciaio

inossidabile <sup>15-20</sup>:

- Negli ambienti corrosivi:
- Acqua marina e ancora di più nei climi caldi
  - Ponti
  - Pontili
  - Moli
  - Ancoraggi per lampioni, binari...
  - Muri flangiflutti
  - .....
- Sale antighiaccio
  - Ponti
  - Cavalcavia per il traffico e interscambi
  - Parcheggi coperti
- Cisterne per il trattamento delle acque reflue
- Impianti di dissalazione
- In strutture con una vita molto lunga
  - Riparazioni di strutture storiche
  - Stoccaggio di scorie nucleari
- In ambienti sconosciuti nei quali
  - l'ispezione è impossibile,
  - le riparazioni sono pressoché impossibili o molto costose

# Confronto tra rebar in acciaio inossidabile e soluzioni alternative<sup>15-20</sup>

	Vantaggi	Svantaggi
Rivestimento epossidico	Costi iniziali inferiori	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ non può essere curvato senza rottura</li> <li>▪ richiede attenzione nella manipolazione per evitare di danneggiarlo durante l'installazione</li> </ul>
Zincatura	Costi iniziali inferiori	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lo strato zincato non può essere curvato senza rottura</li> <li>▪ perde efficacia quando il rivestimento zincato è stato corroso</li> </ul>
Polimeri fibrorinforzati	Costi iniziali inferiori	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ non possono essere curvati senza rottura</li> <li>▪ Nessuna resistenza al calore e scarsa resistenza all'urto negli inverni rigidi</li> <li>▪ Rigidità inferiore rispetto all'acciaio</li> <li>▪ Non sono riciclabili</li> </ul>
ACCIAIO INOSSIDABILE	<p>Basso costo del ciclo di vita:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Design simile agli acciai al carbonio</li> <li>• Miste – armature in acciaio al carbonio e inossidabile funzionano bene</li> <li>• Installazione semplice, poco dipendente dalla qualità di esecuzione</li> <li>• Nessuna manutenzione</li> <li>• Nessun limite di durata</li> <li>• Consente una copertura in cemento più sottile</li> <li>• Migliore resistenza al fuoco</li> <li>• Acciaio inossidabile « premium » 100% riciclato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Costo iniziale elevato, ma non più di tanto se: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ l'acciaio inossidabile viene selezionato per le aree critiche</li> <li>✓ Sono stati scelti lean duplex</li> </ul> </li> </ul>

# Confronto tra rebar in acciaio inossidabile e soluzioni alternative<sup>15-20</sup>

	Vantaggi	Svantaggi
Protezione catodica	Costi iniziali inferiori? Utilizzata spesso per le riparazioni	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Richiede un attento design per la protezione complessiva</li><li>▪ Richiede un'attenta installazione per mantenere contatti elettrici adeguati</li><li>▪ Richiede una fonte permanente di corrente (che deve essere monitorata e mantenuta) o anodi sacrificali che richiedono monitoraggio e sostituzione</li></ul>
Membrane/ sigillanti	Costi iniziali inferiori?	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Richiedono un'attenta installazione (bolle)</li><li>▪ L'installazione dipende dalle condizioni meteorologiche</li><li>▪ Prestazioni discutibili nel tempo</li><li>▪ Limitati alle superfici orizzontali</li></ul>



# Riferimenti

1. <http://www.lapresse.ca/actualites/montreal/201111/25/01-4471833-echangeur-turcot-254-millions-pour-lentretien-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](http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref07_The_use_of_predictive_models_in_specifying_selective_use_of_stainless_steel_reinforcement.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. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education\\_references/Ref08\\_Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf](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](http://www.arup.com/Projects/Stonecutters_Bridge.aspx) (stonecutters' bridge)
13. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Stonecutters\\_Bridge\\_Case\\_Study-2.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Stonecutters_Bridge_Case_Study-2.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](http://www.ukcares.com/downloads/guides/PART7.pdf)
18. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education\\_references/Ref19\\_Case\\_study\\_of\\_progreso\\_pier.pdf](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](http://americanarminox.com/Purdue_University_Report_-_Stainless_Steel_Life_Cycle_Costing.pdf) (advantages of using ss rebar)
21. <http://www.stainlesssteelrebar.org>

# Riferimenti sull'accoppiamento galvanico

NEW!

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/>

Presentazione di supporto per i  
docenti di Architettura/Ingegneria  
civile

## **Capitolo 07B**

**Applicazioni strutturali di  
prodotti piatti in acciaio  
inossidabile**

# Acciaio inossidabile strutturale

## La progettazione con l'acciaio inossidabile

Barbara Rossi, Maarten Fortan  
Dipartimento di ingegneria civile,  
KU Leuven, Belgio

Basato su una versione precedente preparata da Nancy Baddoo  
Steel Construction Institute, Ascot, Regno Unito

# Sintesi

- Esempi di applicazioni strutturali
- Caratteristiche meccaniche dei materiali
- Progettazione conforme a Eurocodice 3
- Metodi alternativi
- Deflessioni
- Informazioni aggiuntive
- Risorse per ingegneri



# Sezione 1

Esempi di applicazioni strutturali



Stazione Sint Pieters, Ghent (BE)

Arch.: Wefirna

Uff. ing.: THV Van Laere-Braekel Aero



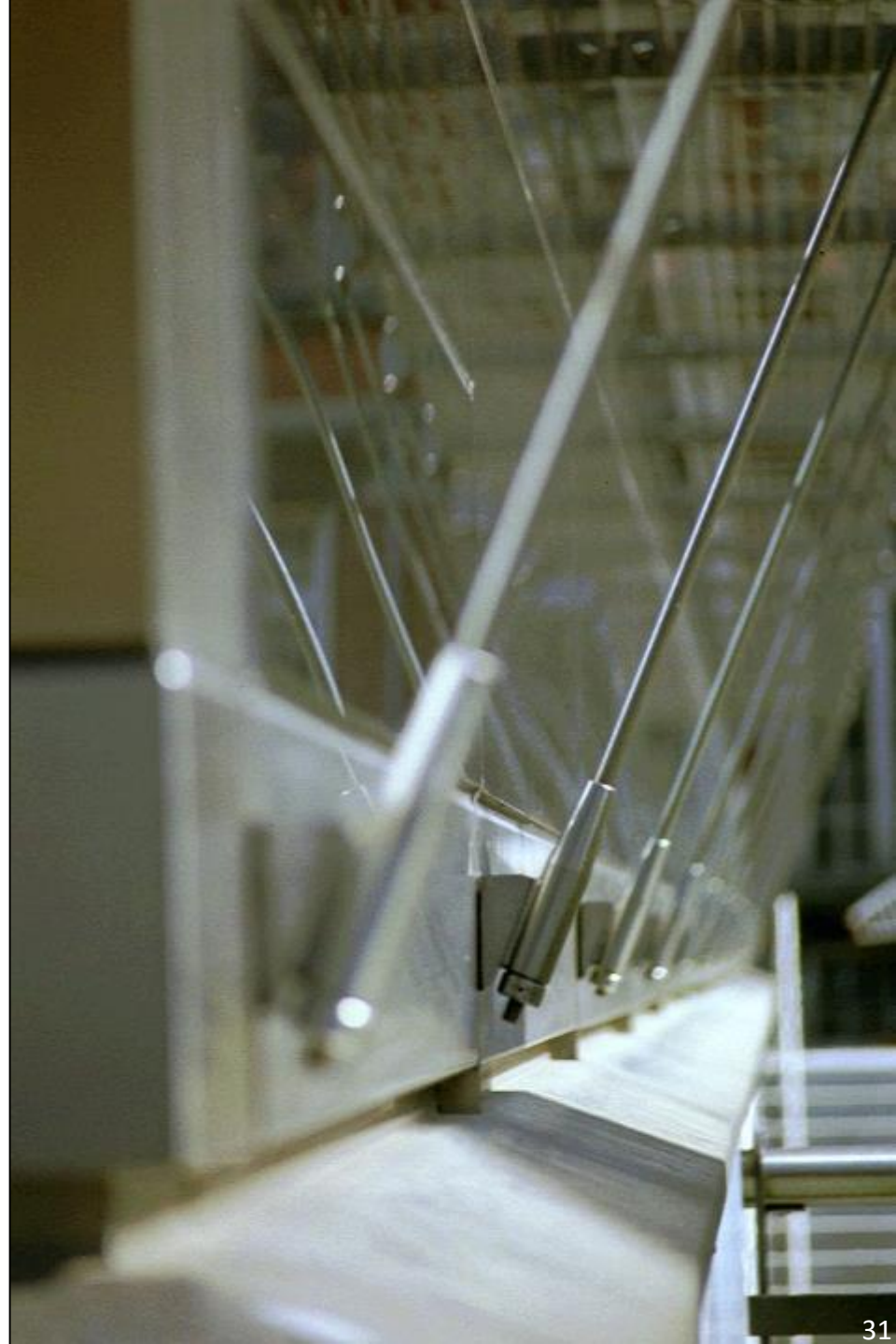
Scuola militare  
di Bruxelles

Arch.: AR.TE

Uff. ing.:

Tractebel

Development







La Grande Arche, Parigi  
Arch.: Johan Otto von  
Spreckelsen  
Uff. ing.: Paul Andreu





Villa Inox (FIN)

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

Arch.: Arte  
Charpentiers &  
Associés

Uff. ing.: Mitsu  
Edwards





## Stazione di Porto (Portogallo)





Torno Internazionale S.P.A. Sede centrale di Milano, (IT),  
acciaio inossidabile grado: EN 1.4404 (AISI 316L)

Architetto: Dante O. BENINI & Partners



Fotografia: Toni Nicolino / Nicola Giacomini

Telai in acciaio  
inossidabile nella  
centrale nucleare



Fotografia: Elementi strutturali in acciaio inossidabile LCC

Supporti per  
facciata in acciaio  
inossidabile  
Tampa, (USA)



Fotografia: TriPyramid Structures, Inc.

Travi a I in acciaio inossidabile,  
Thames Gateway Water Treatment Works, (UK)



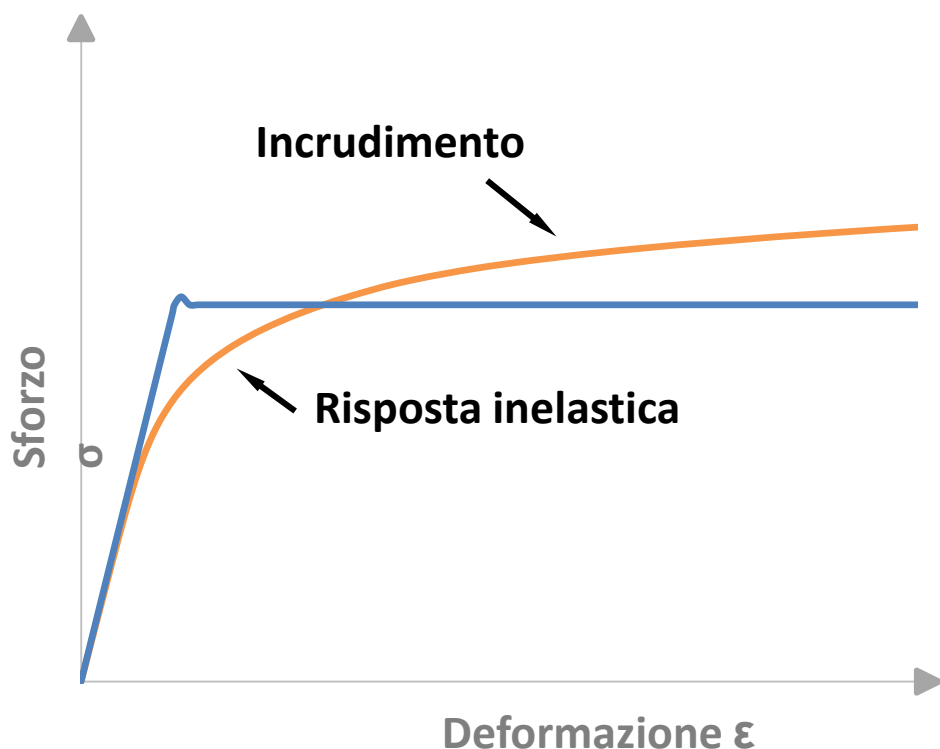
Fotografia: Interserve

# Sezione 2

Caratteristiche meccaniche dei  
materiali

# Caratteristiche sforzo-deformazione: Acciaio al carbonio vs. acciaio inossidabile

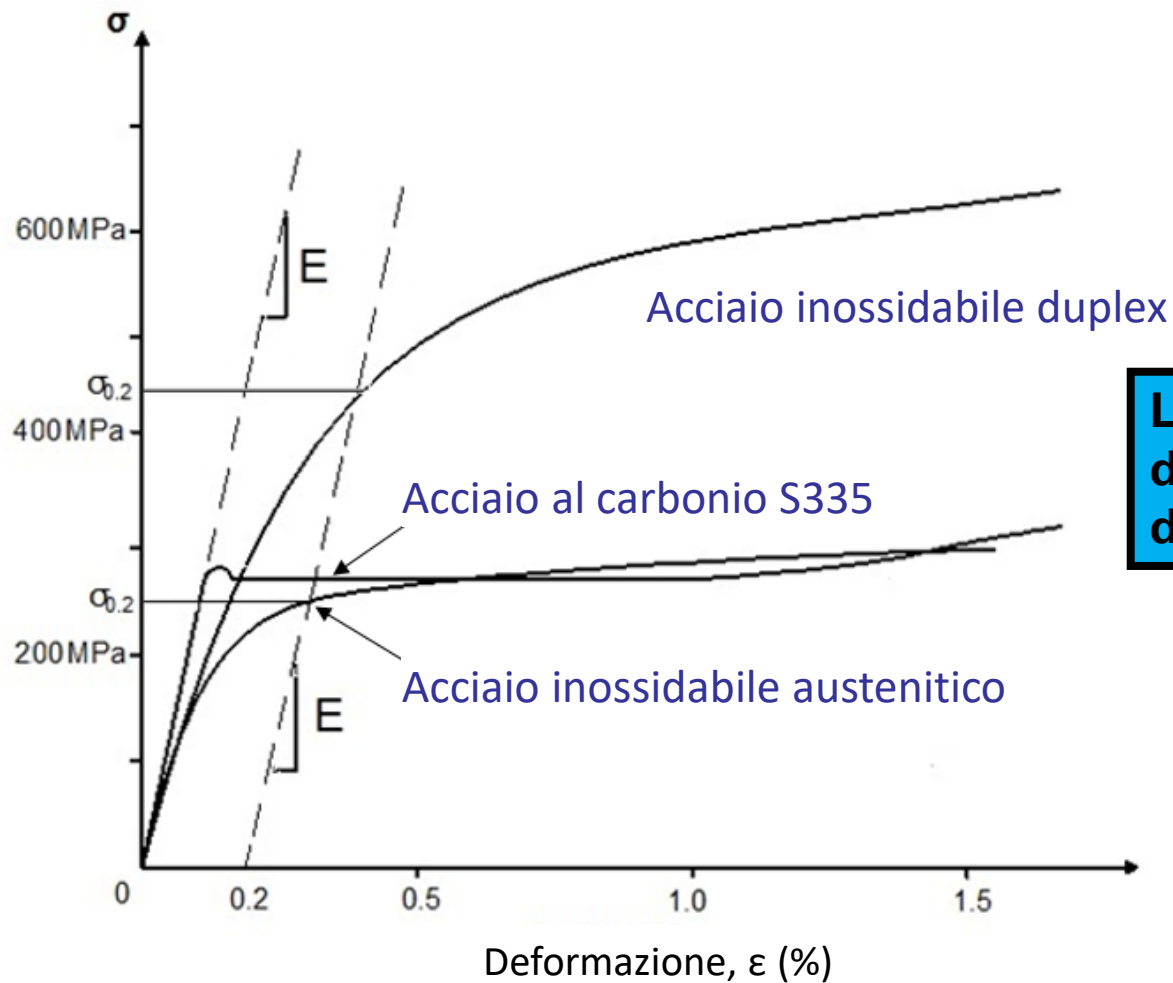
L'acciaio inossidabile presenta un comportamento  $\sigma$ - $\epsilon$  sostanzialmente diverso dall'acciaio al carbonio.



L'acciaio al carbonio ha un punto di snervamento ben definito con un plateau di snervamento plastico.

L'acciaio inossidabile presenta un comportamento gradualmente cedevole, con elevato incrudimento.

# Caratteristiche sforzo-deformazione - bassa deformazione



**La risposta sforzo-deformazione dipende dalla famiglia.**

# Resistenza di progetto dell'acciaio inossidabile

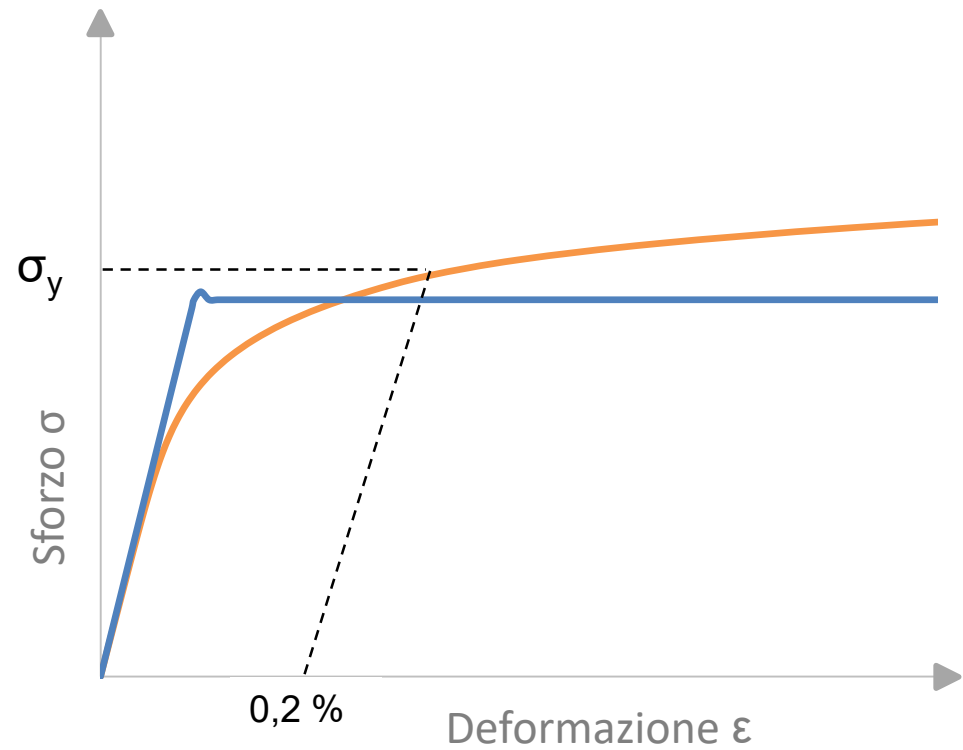
La resistenza di prova minima specificata 0,2% è indicata in EN 10088-4 e -5

**Austenitici:**  $f_y = 220-350$  MPa

**Duplex:**  $f_y = 400-480$  Mpa

**Ferritici:**  $f_y = 210-280$  MPa

**Modulo di Young:**  $E =$  da 200.000 a 220.000 MPa





# Resistenza di progetto dell'acciaio inossidabile

Grado	Famiglia	Carico di snervamento (N/mm <sup>2</sup> ) Resistenza di prova 0,2%	Carico di rottura (N/mm <sup>2</sup> )	Modulo di Young (N/mm <sup>2</sup> )	Deformazione di frattura (%)
1.4301 (304)	Austenitico	210	520	200000	45
1.4401 (316)	Austenitico	220	520	200000	40
1.4062	Duplex	450	650	200000	
1.4462	Duplex	460	640	200000	
1.4003	Ferritico	250	450	220000	

# Incrudimento

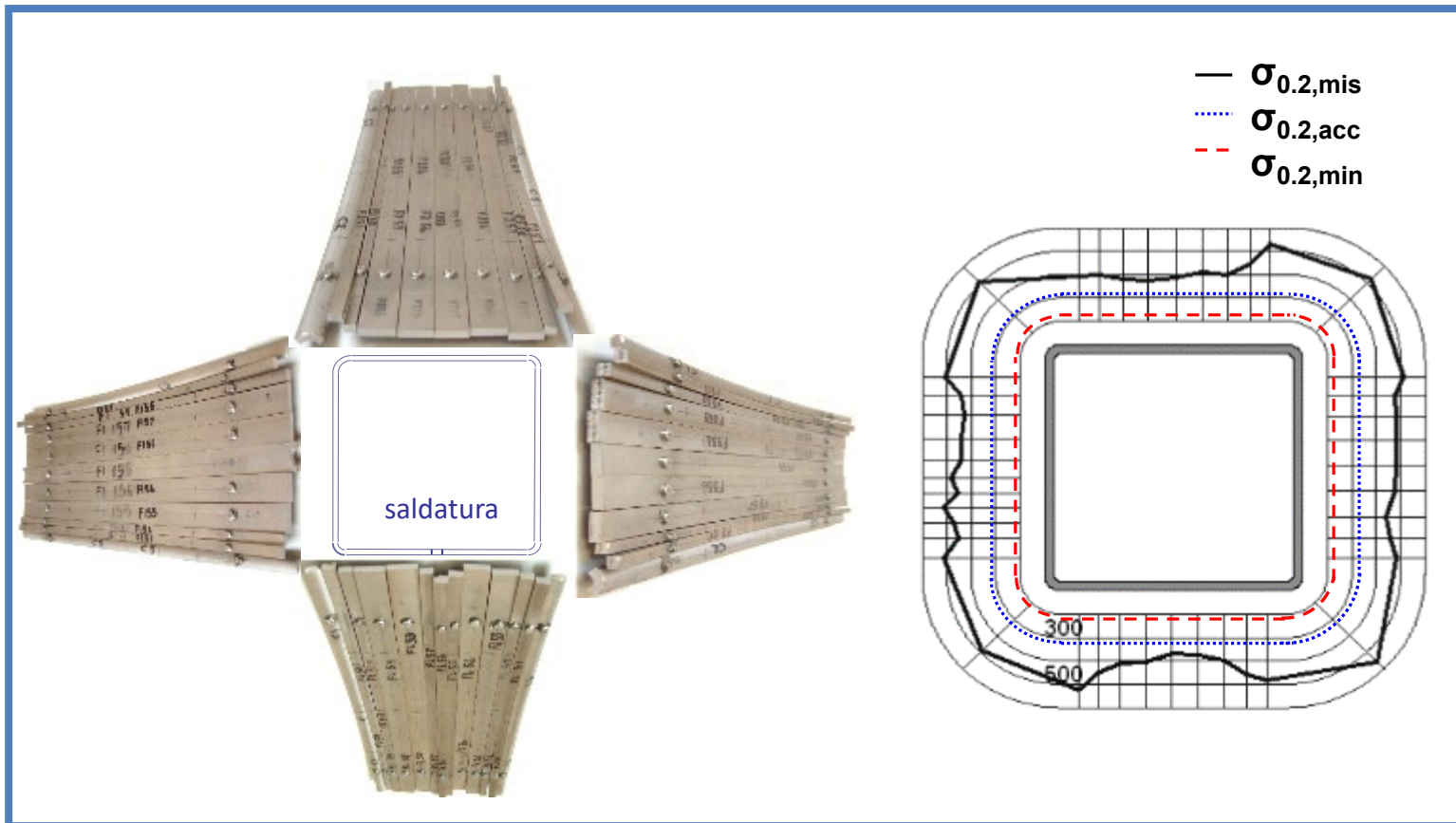
## (incrudimento da lavorazione a freddo)

- Resistenza aumentata per deformazione plastica
- Provocata dalla formatura a freddo, durante le operazioni di produzione dell'acciaio in acciaieria oppure durante i processi di fabbricazione

Durante la fabbricazione di un profilo cavo rettangolare, la resistenza di prova  $0,2\%$  aumenta di circa il  $50\%$  negli angoli formati a freddo dei profili trasversali!

# Incrudimento (incrudimento da lavorazione o lavorazione a freddo)

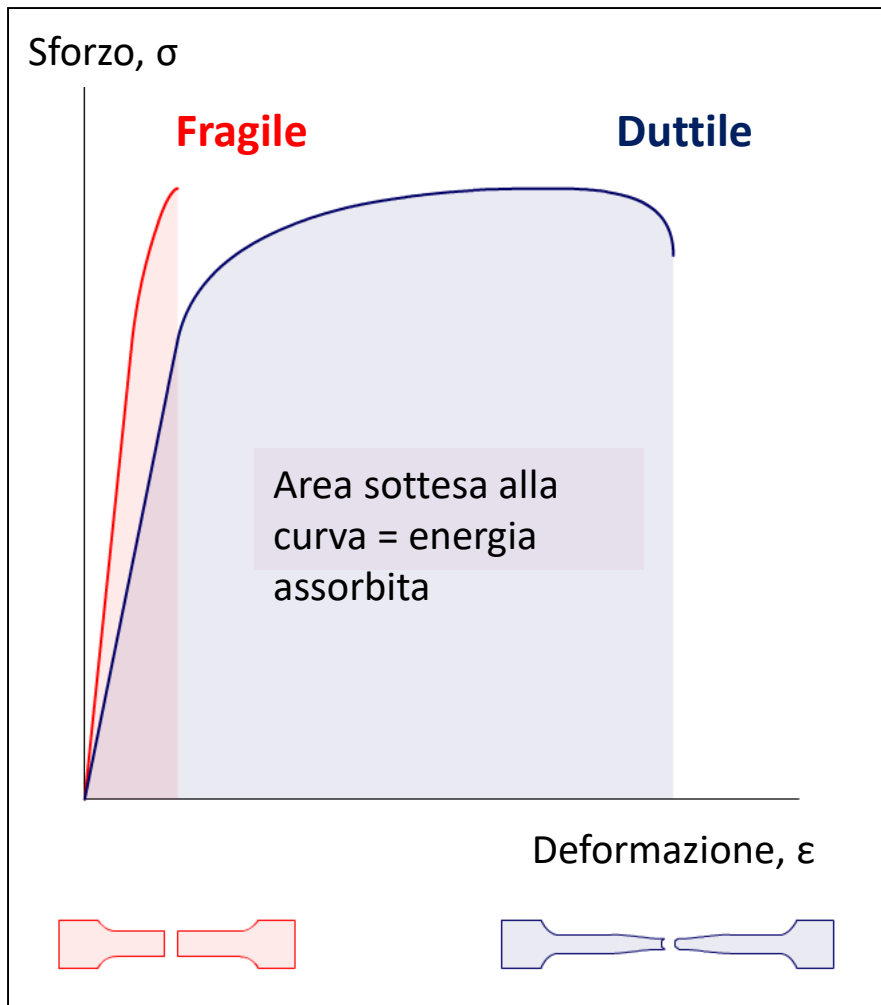
- Miglioramento della resistenza durante la formatura



# Incrudimento - non sempre utile

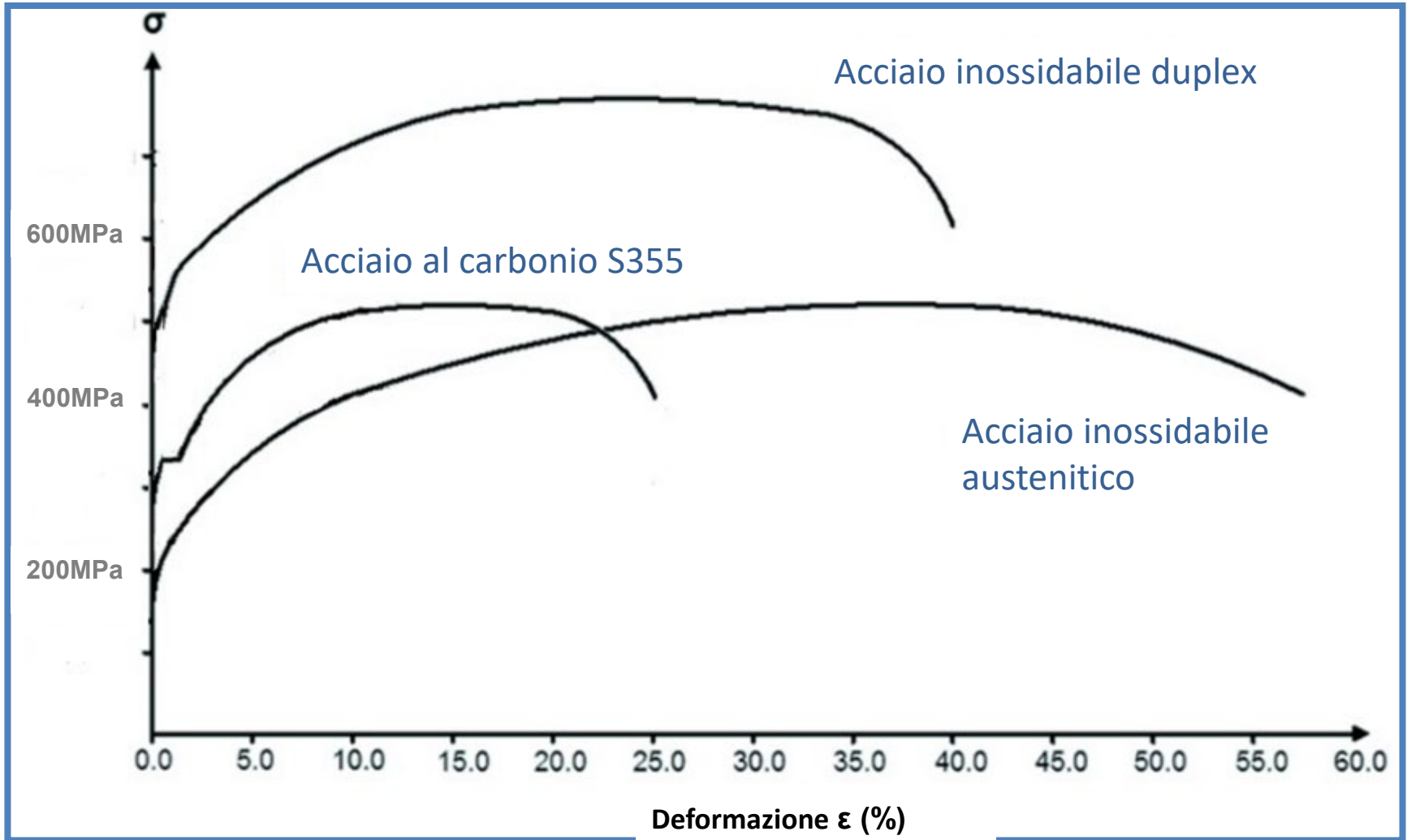
- Attrezzatura di fabbricazione più potente e più pesante
- Sono necessarie più forze
- Duttilità ridotta (la duttilità iniziale è comunque alta, in particolare per gli austenitici)
- Possono verificarsi sollecitazioni residue non desiderate

# Duttilità e tenacità



- **Duttilità** - capacità di allungarsi senza rompersi
- **Tenacità** - capacità di assorbire energia e di subire deformazioni a livello plastico senza rompersi

# Caratteristiche sforzo-deformazione / alta deformazione





# Strutture resistenti a urti/scoppi



Palo di  
sicurezza



Fabbricazione di una parete trapezoidale  
resistente agli scoppi per i lati superiori di una  
piattaforma offshore

# Caratteristiche sforzo-deformazione

## **La non linearità.....porta a**

- limiti diversi nei rapporti larghezza-spessore per buckling locale
- diverso comportamento di buckling nella compressione e piegatura
- deflessioni maggiori

# Impatto sulle prestazioni di buckling

- **Bassa snellezza**

le colonne raggiungono/superano il carico di schiacciamento

⇒ **vantaggi** dell'incrudimento, apparentemente l'acciaio inox si comporta **bene quanto** l'acciaio al carbonio

- **Alta snellezza**

bassa resistenza assiale, sollecitazioni basse e nella regione lineare

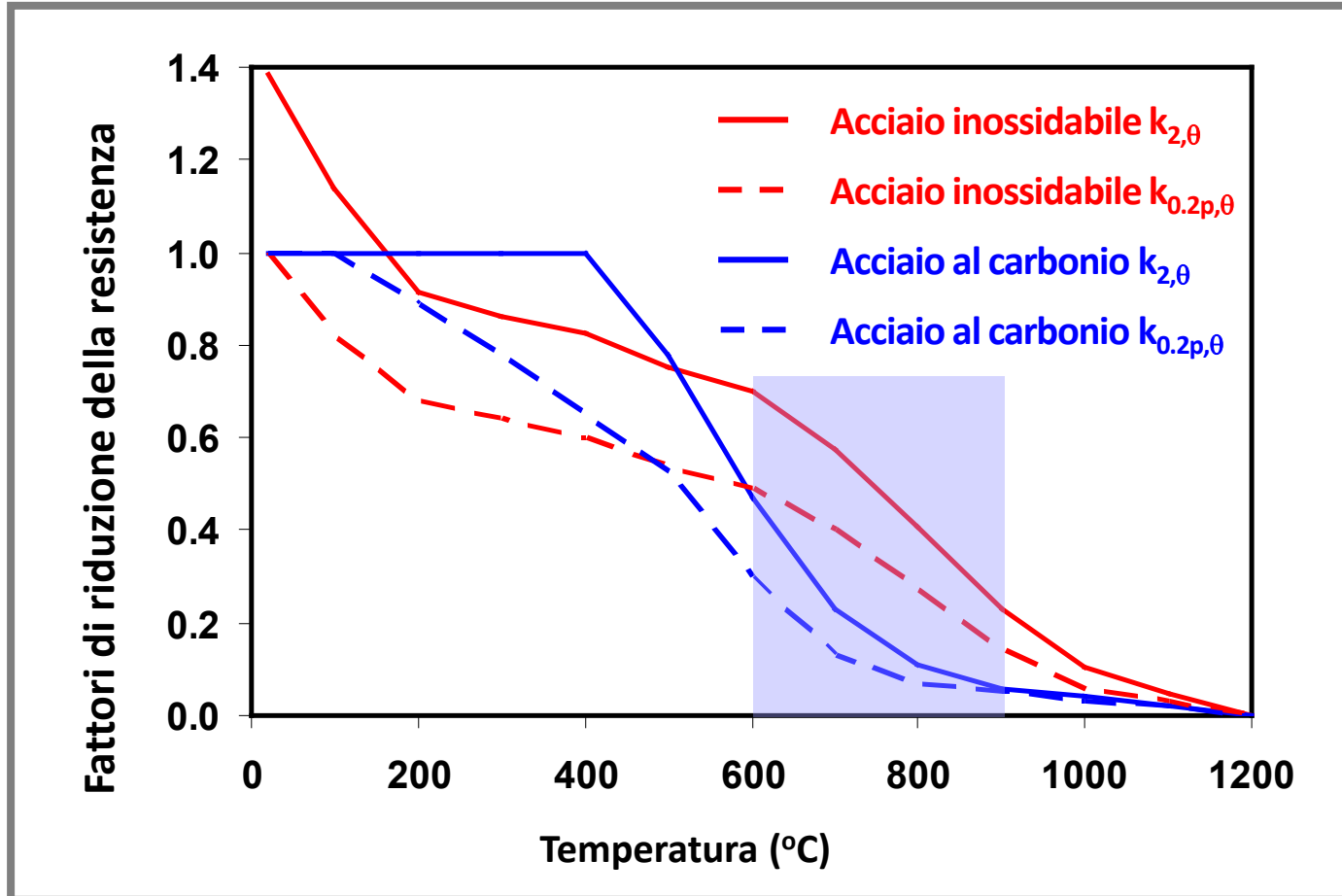
⇒ l'acciaio inossidabile si comporta **analogamente** all'acciaio al carbonio, fornendo sollecitazioni geometriche e residue simili

# Impatto sulle prestazioni di buckling

- **Snellezza intermedia**

la sollecitazione media nella colonna si colloca tra il limite di proporzionalità e la deformazione permanente 0,2%,  
la colonna di acciaio inox è **meno resistente** di quella dell'acciaio al carbonio

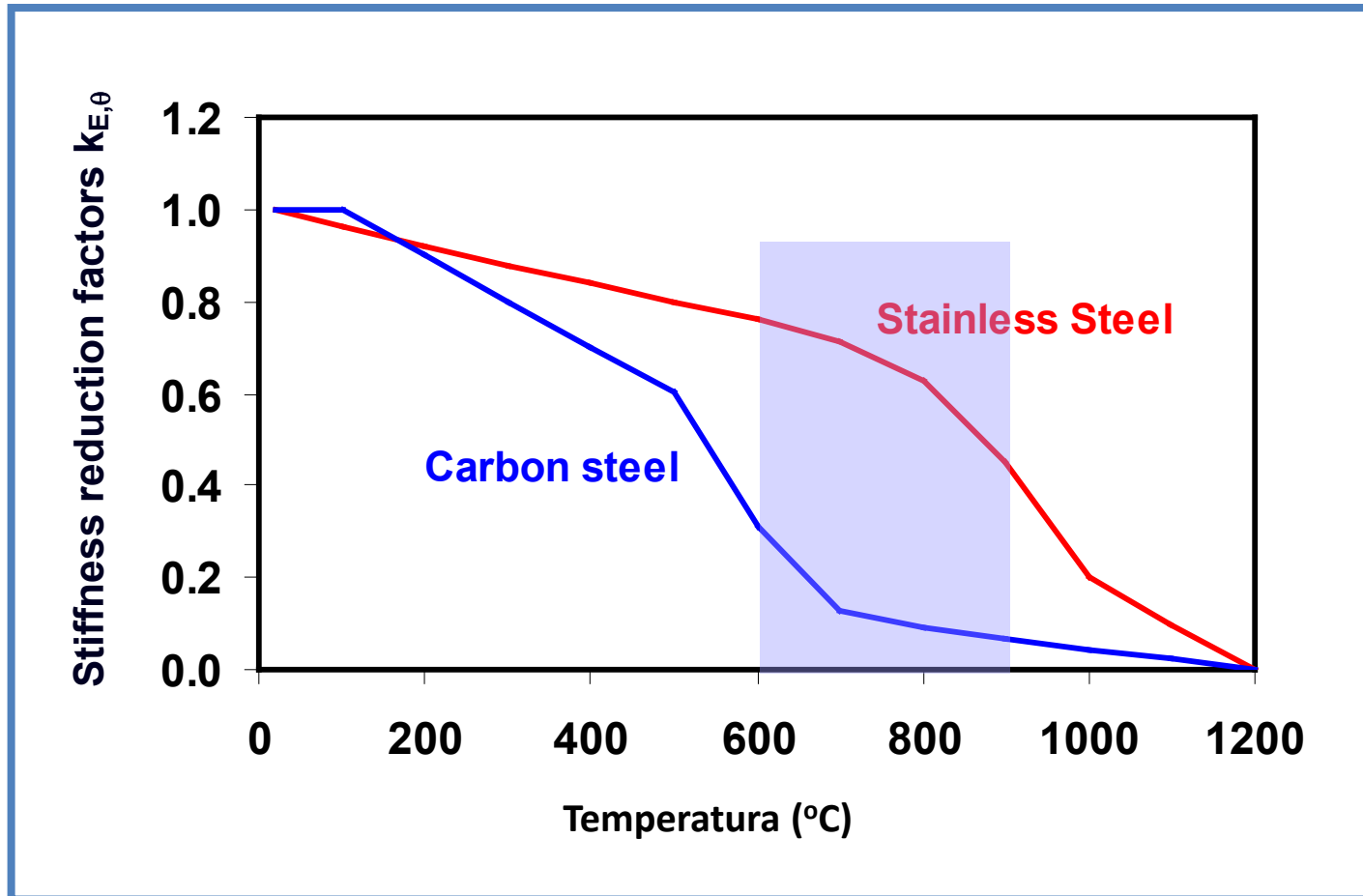
# Materiale a temperature elevate



$k_{0.2p,q}$  = fattore di riduzione della resistenza con sollecitazione di prova 0,2%

$k_{2,q}$  = fattore di riduzione della resistenza con sollecitazione totale 2%

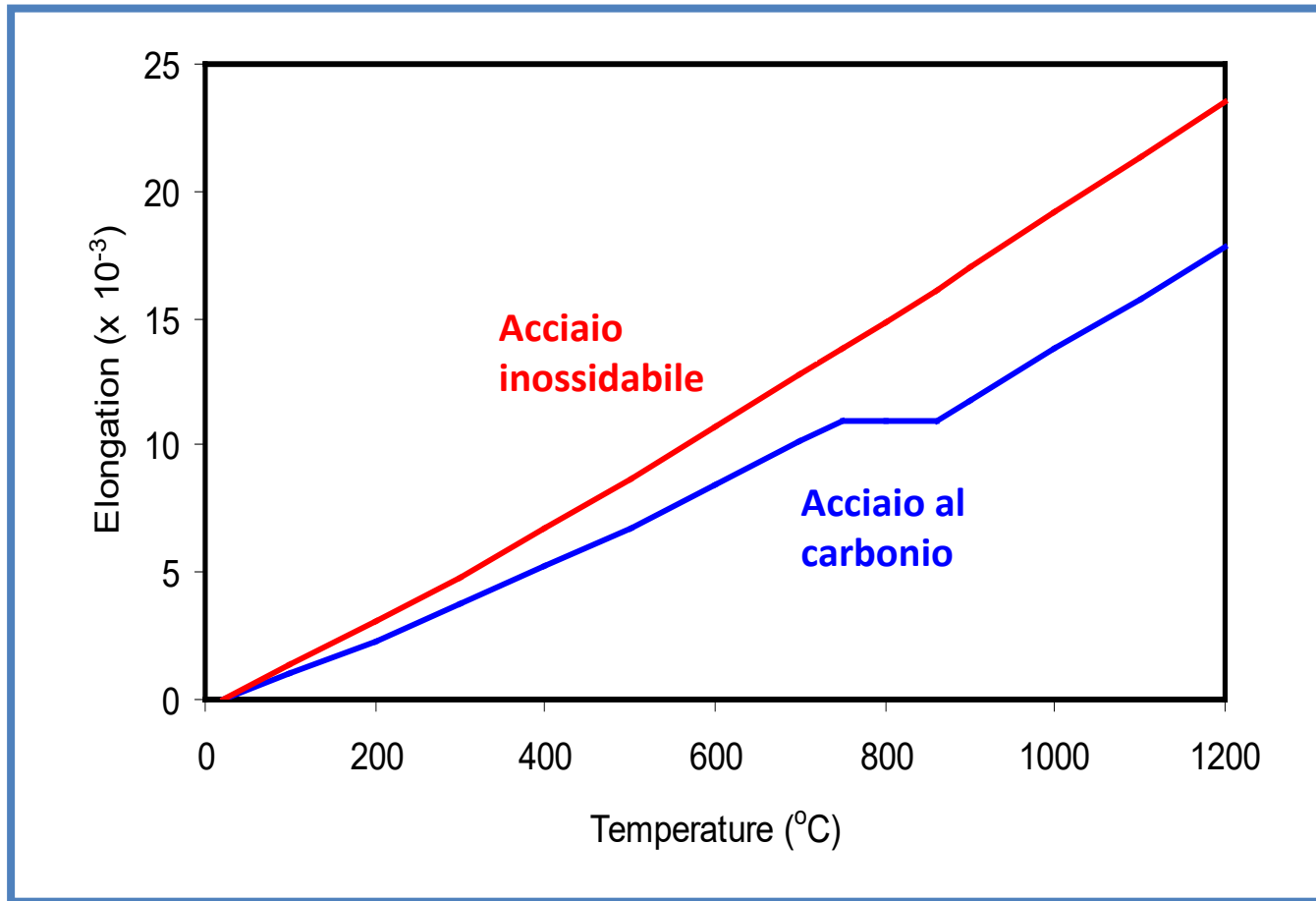
# Materiale a temperature elevate



Fattore di rigidità



# Materiale a temperature elevate



**Dilatazione termica**

# Sezione 4

Progettazione conforme a Eurocodice 3

# Norme di progettazione internazionali

Quali norme di progettazione sono disponibili per l'acciaio inossidabile strutturale?



Hamilton Island Yacht Club, Australia

## EN 1990

Sicurezza strutturale, utilizzabilità e durata

## EN 1991

Azioni sulle strutture

EN 1992

EN 1993

EN 1994

EN 1995

EN 1996

EN 1999

Progettazione e descrizione dettagliata

EN 1997

Disegno geotecnico

EN 1998

Disegno sismico

Gli Eurocodici sono una serie integrata di codici per la progettazione strutturale che si occupano di tutti i comuni materiali per l'edilizia.

Collegamenti tra gli Eurocodici

# Eurocodice 3: Parte 1 (EN 1993-1)

EN 1993-1-1 Regole generali e regole per gli edifici.

EN 1993-1-2 Progettazione strutturale contro l'incendio.

EN 1993-1-3 Profilati e lamiere sottili piegati a freddo.

EN 1993-1-4 Acciai inossidabili.

EN 1993-1-5 Elementi strutturali a lastra.

EN 1993-1-6 Resistenza e stabilità delle strutture a guscio.

EN 1993-1-7 Strutture a lastra ortotropa caricate al di fuori  
del piano.

EN 1993-1-8 Progettazione dei collegamenti.

EN 1993-1-9 Resistenza a fatica delle strutture in acciaio.

EN 1993-1-10 Scelta dell'acciaio in base alla resilienza del materiale e alle proprietà attraverso lo spessore.

EN 1993-1-11 Progettazione di strutture con elementi tesi

EN 1993-1-12 Regole aggiuntive per gli acciai ad alta resistenza

# Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio, Parte 1.4 Regole aggiuntive per gli acciai inossidabili

BRITISH STANDARD

BS EN  
1993-1-4:2006

## 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

BSI  
309 90 04 00 01 00 00 00

**BSi**  
British Standards

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

Progettazione di strutture di acciaio.  
Regole aggiuntive per gli acciai  
inossidabili (2006)

- Modifica e integra le regole per l'acciaio al carbonio fornite in altre parti dell'Eurocodice 3, laddove necessario
- Si applica a edifici, ponti, cisterne ecc.



## Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio, Parte 1.4 Regole aggiuntive per gli acciai inossidabili

- Seguire lo stesso approccio dell'acciaio al carbonio
- Usare le stesse regole dell'acciaio al carbonio per gli elementi sottoposti a tensione e le travi vincolate
- Alcune differenze delle curve relative a limiti di classificazione della sezione, buckling locale e buckling dell'elemento si applicano a causa di:
  - curva sforzo-deformazione non lineare
  - caratteristiche di incrudimento
  - diversi livelli di sollecitazioni residue

# Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio, Parte 1.4 Regole aggiuntive per gli acciai inossidabili

## Tipi di elementi

- Laminato a caldo e saldato
- Formato a freddo
- Barra

## Numero di gradi

Famiglia	EC3-1-4	Revisione futura
Ferritico	3	3
Austenitico	16	16
Duplex	2	<b>6</b>

## Scopo

- Elementi e collegamenti
- Fuoco (*con riferimento a EN 1993-1-2*)
- Fatica (*con riferimento a EN 1993-1-9*)

# Altre norme di progettazione

- **Giappone** – due norme: una per gli elementi in acciaio inossidabile formati a freddo e una per quelli saldati
- **Sudafrica, Australia, Nuova Zelanda** - norme per gli elementi in acciaio inossidabile formati a freddo
- **Cina** - norma allo studio
- **USA** - specifica ASCE per gli elementi formati a freddo e Guida di progettazione AISC per acciaio inossidabile strutturale laminato a caldo e saldato

# Eurocodice 3: Progettazione delle strutture di acciaio, Parte 1.4 Regole aggiuntive per gli acciai inossidabili

Quali sono le regole di progettazione per l'acciaio inossidabile fornite dalla EN 1993-1-4 e le principali differenze con le regole equivalenti per l'acciaio al carbonio?



Colonne resistenti allo scoppio nella tettoia d'ingresso,  
Seven World Trade Centre, New York

# Sezione classificazione ed espressioni buckling locale nella EN 1993-1-4

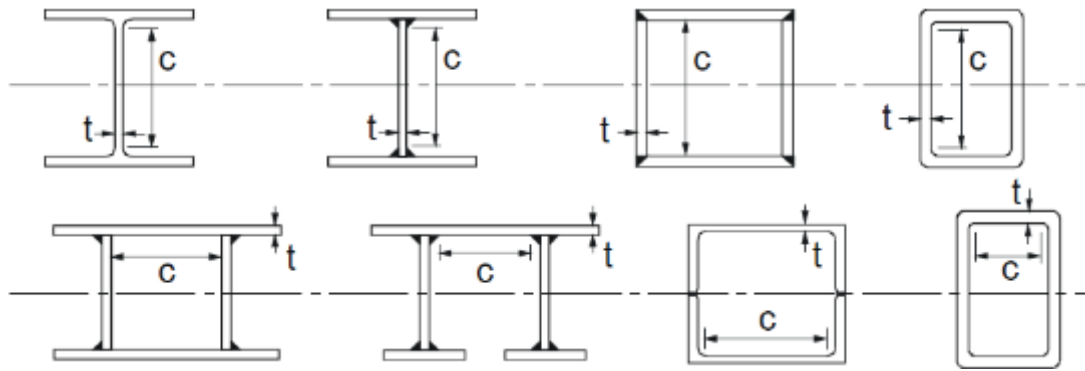
- Rapporto larghezza-spessore con limite inferiore rispetto all'acciaio al carbonio
- Espressioni leggermente diverse per calcolare le larghezze effettive degli elementi snelli

Comunque...

La prossima versione di EN 1993-1-4 conterrà meno limiti ed espressioni di larghezza effettiva conservativi.

# Sezione classificazione ed espressioni buckling locale nella EN 1993-1-4

## ■ Parti di compressione interne



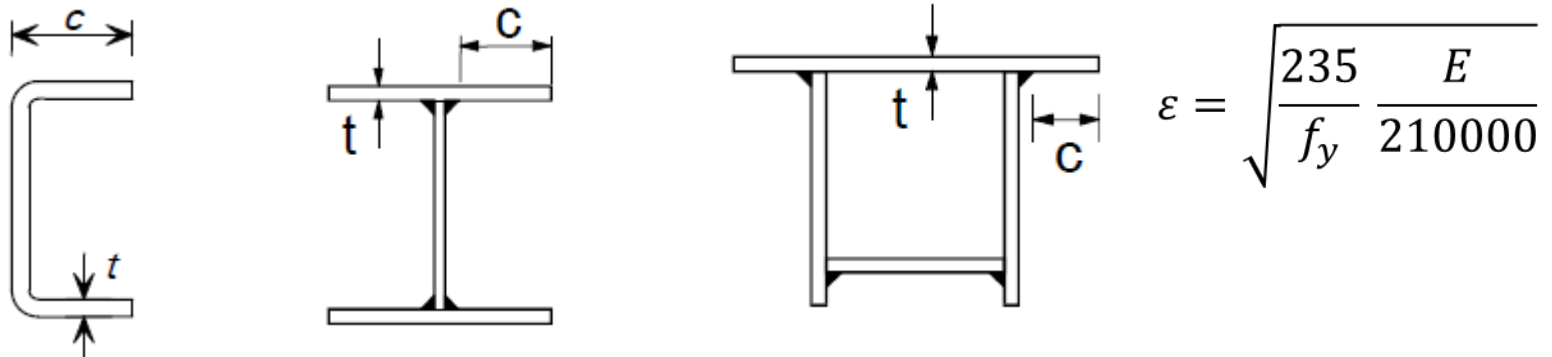
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

Classe	EC3-1-1: acciaio al carbonio		EC3-1-4: acciaio inossidabile		EC3-1-4: Revisione futura	
	Piegatura	Compressione	Piegatura	Compressione	Piegatura	Compressione
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	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$



# Sezione classificazione ed espressioni buckling locale nella EN 1993-1-4

## ■ Parti di compressione esterne



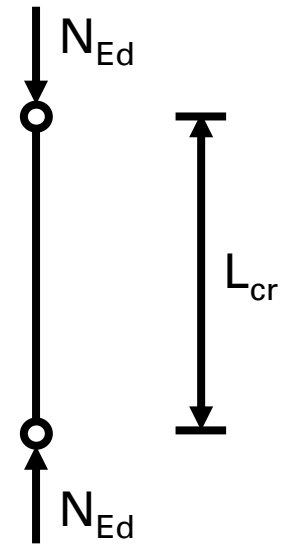
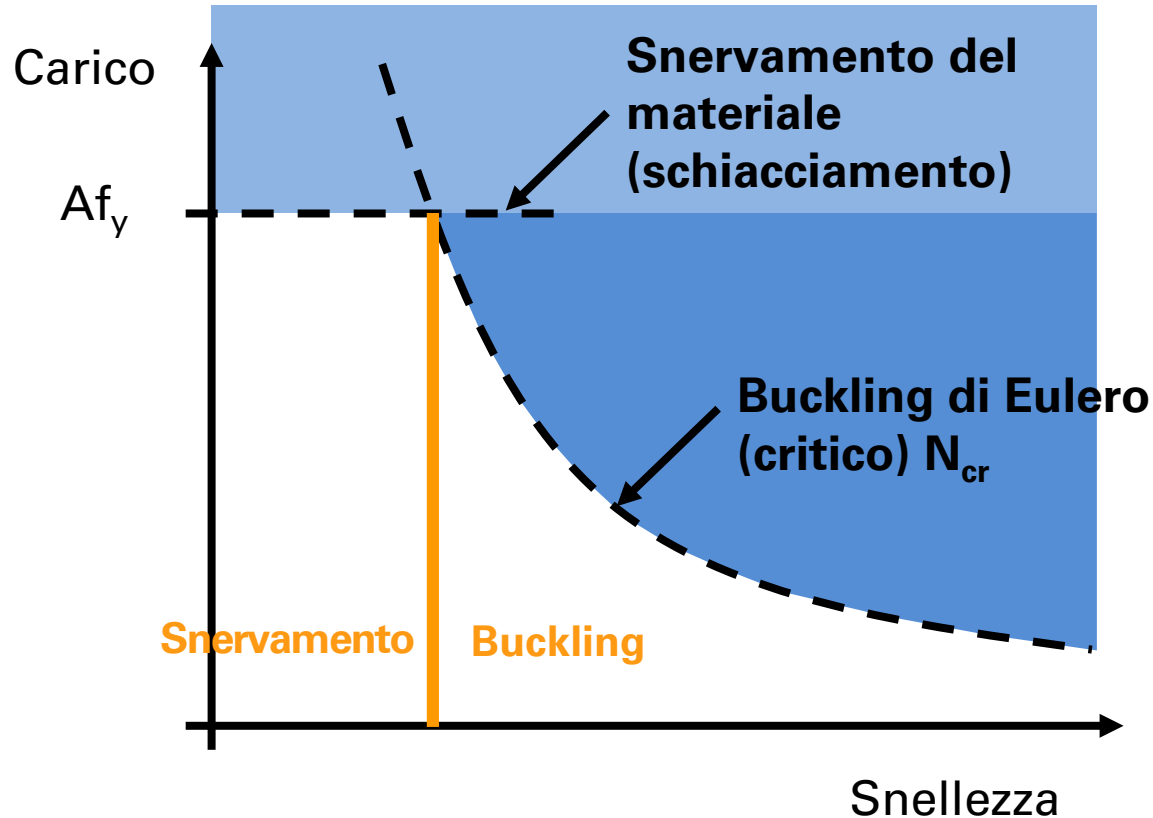
	EC3-1-1: acciaio al carbonio	EC3-1-4: acciaio inossidabile		EC3-1-4: revisione futura
Classe	Compressione	Compressione Saldato	Compressione Formato a freddo	Compressione
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq 9\epsilon$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq 9,4\epsilon$	$c/t \leq 10,4\epsilon$	$c/t \leq 10\epsilon$
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 11\epsilon$	$c/t \leq 11,9\epsilon$	$c/t \leq 14\epsilon$

# Progettazione di colonne e travi

- In generale usare lo stesso approccio dell'acciaio al carbonio
- Ma usare curve di buckling diverse per buckling di colonne e travi non vincolate (LTB)
- Verificare di usare il valore  $f_y$  corretto per il grado (i valori minimi specificati sono indicati nella EN 10088-4 e -5)

# Comportamento "perfetto" della colonna

Due limiti: Snervamento e buckling:



# Buckling della colonna

Resistenza al buckling di compressione  $N_{b,Rd}$ :

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

per Classe 1, 2 e 3

Fattore di riduzione

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

per Classe 4  
(simmetrica)

# Buckling della colonna

Snellezza non dimensionale:  $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{per profilati trasversali di Classe 1, 2 e 3}$$

$$= \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr}}} \quad \bar{\lambda} \quad \text{per profilati trasversali di Classe 4}$$

$N_{cr}$  è il carico di buckling critico elastico per il modo di buckling rilevante basato su grandi proprietà del profilato trasversale

# Buckling della colonna

Fattore di riduzione:  $\chi$

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

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

Fattore di  
imperfezione

Lunghezza plateau



# Buckling della colonna

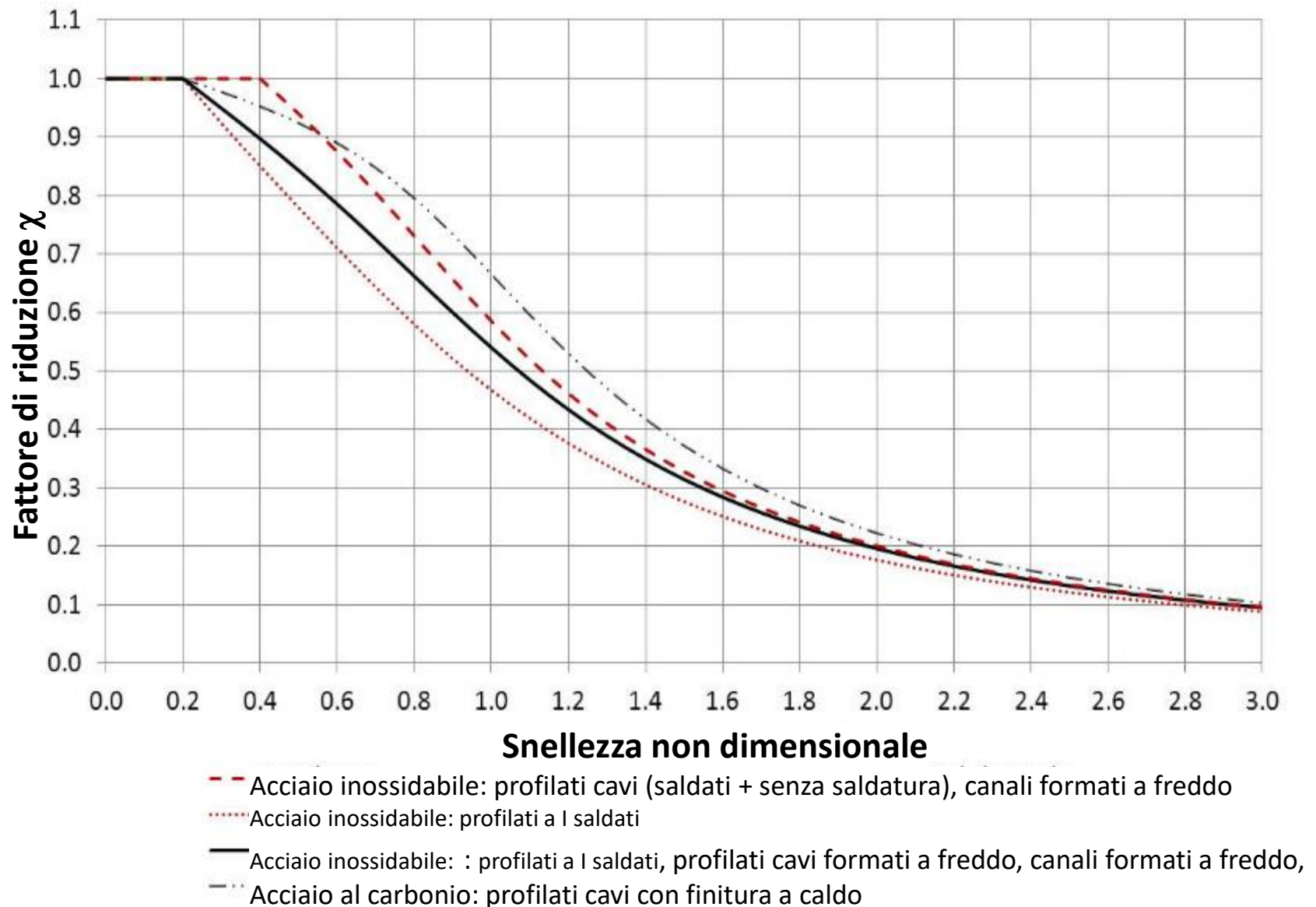
- La scelta della curva di buckling dipende dal profilato trasversale, dal percorso e dall'asse di fabbricazione

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

Buckling mode	Type of member	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
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

Estratto da EN 1993-1-4

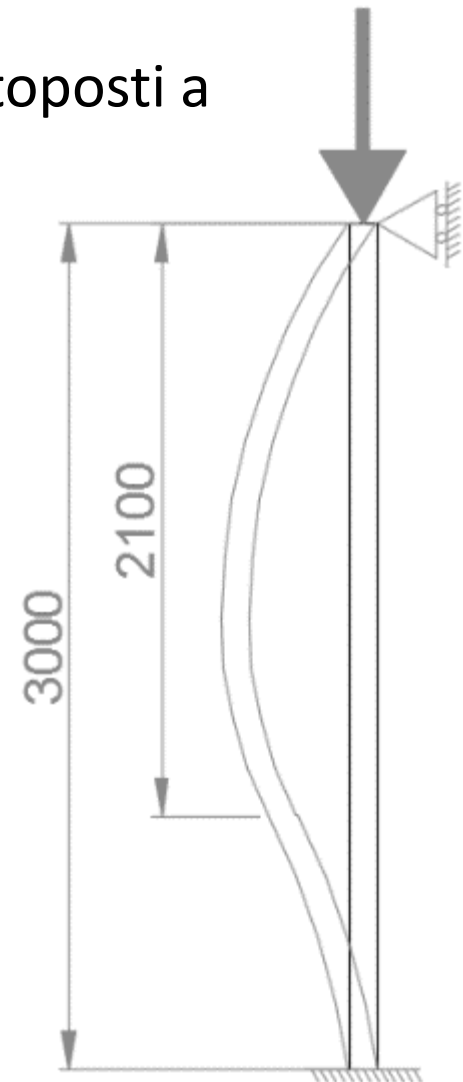
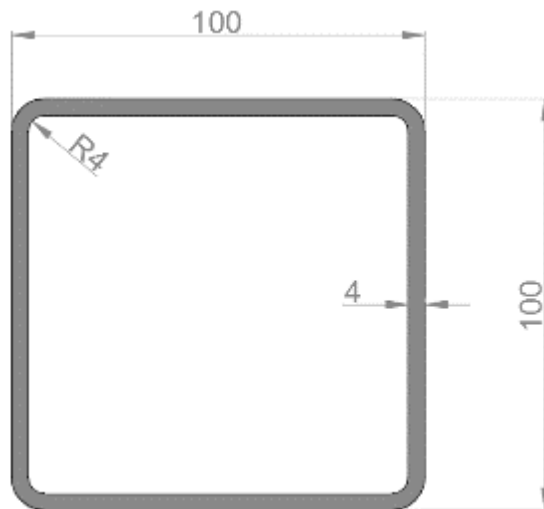
# Eurocodice 3 Curve di buckling a flessione



# Eurocodice 3 Esempio di buckling a flessione

- Profili cavi rettangolari formati a freddo sottoposti a compressione concentrica

	Acciaio al carbonio	Acciaio inossidabile austenitico
Materiale	S235	EN 1.4301
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	235	230
E [N/mm <sup>2</sup> ]	210000	200000



# Eurocodice 3 Esempio di buckling a flessione

## EC 3-1-1: S235

- Classificazione

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

- Tutte le parti interne

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

Classe 1

Profilato trasversale = classe 1

## EC 3-1-4: Austenitico

- Classification

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

- All internal parts

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

Class 1

Cross-section = class 1

# Eurocodice 3 Esempio di buckling a flessione

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Duplex
A [mm <sup>2</sup> ]	1495	1495
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>235</b>	<b>230</b>
$\gamma_{M0}$ [-]	<b>1</b>	<b>1,1</b>
$N_{c,Rd}$ [kN]	<b>351</b>	<b>313</b>
$L_{cr}$ [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
$\gamma_{M1}$ [-]	<b>1</b>	<b>1,1</b>
$N_{b,Rd}$ [kN]	<b>281</b>	<b>277</b>

# Eurocodice 3 Esempio di buckling flessurale

## ■ Confronto

	EC 3-1-1: S235	EC 3-1-4: Austenitico
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	235	230
$\gamma_{M0}$ [-]	1,0	1,1
$\gamma_{M1}$ [-]	1,0	1,1
Profilato trasversale	351	313
$N_{c,Rd}$ [kN]		
Stabilità $N_{b,Rd}$ [kN]	281	277

- In questo esempio, l'acciaio al carbonio e l'acciaio inossidabile presentano una resistenza simile al buckling flessurale  
⇒ **vantaggi** dell'incrudimento non evidenti  
EC3 1-4 non tiene debitamente conto dell'incrudimento



# Buckling torsionale laterale

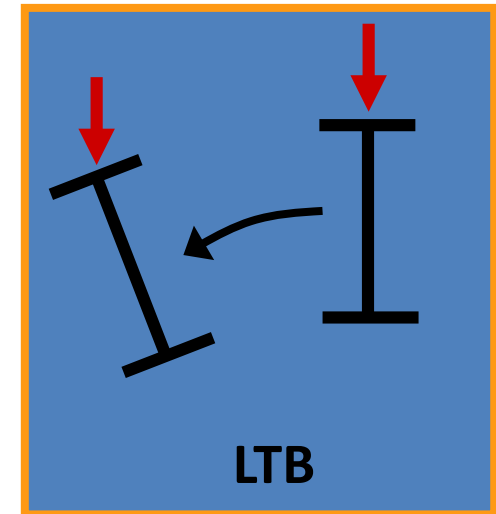
- Può essere ignorato se:

- Piegatura dell'asse minore

- Barra quadra, circolare, CHS, SHS

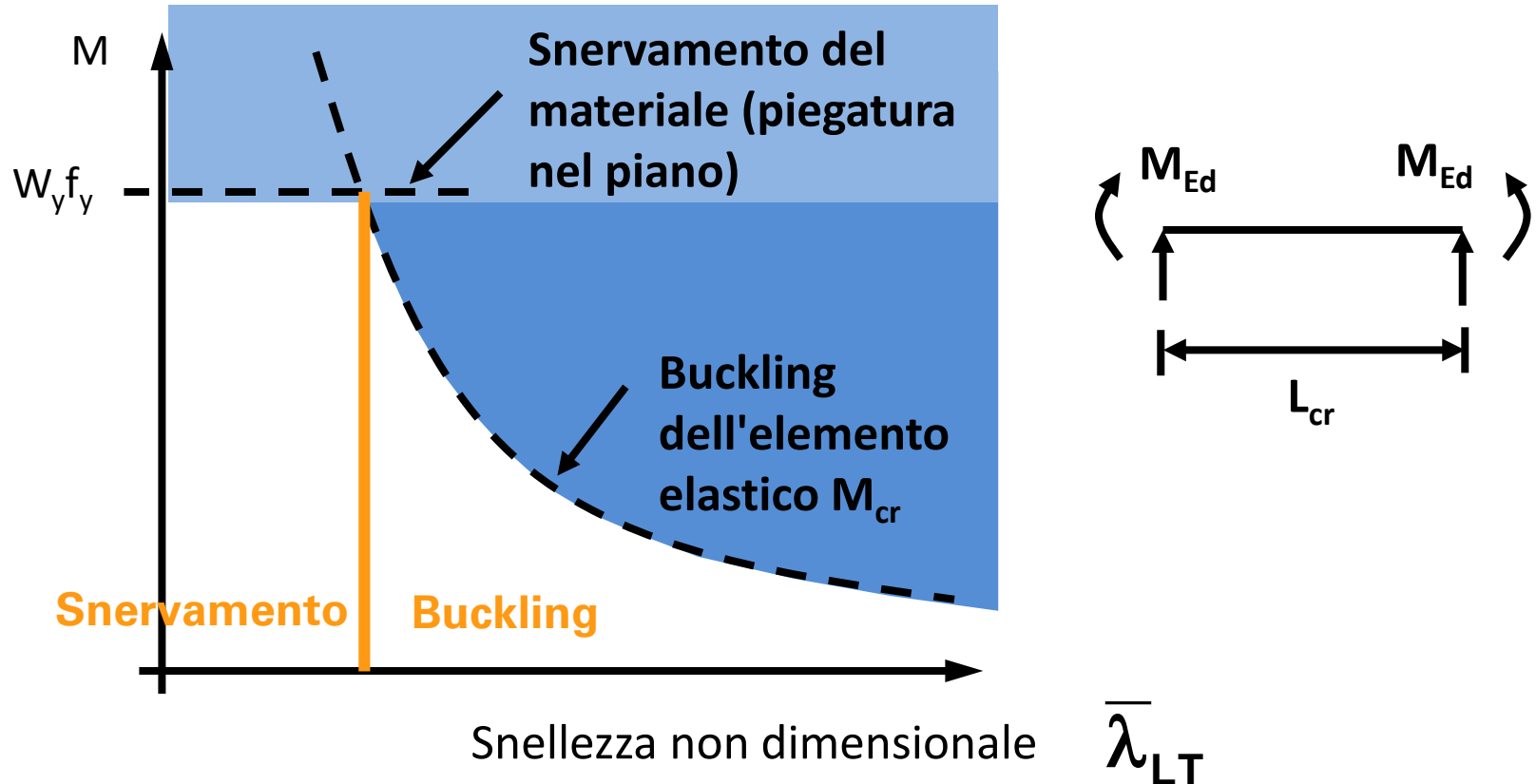
- Travi completamente vincolate lateralmente

- $\bar{\lambda}_{LT} < 0.4$



# Buckling torsionale laterale

- L'approccio di progettazione per il buckling torsionale laterale è analogo al trattamento del buckling della colonna.



# Buckling torsionale laterale

- La resistenza del buckling di progettazione  $M_{b,Rd}$  di una trave non vincolata lateralmente (o profilo di una trave) dovrebbe essere considerata come:

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

Fattore di riduzione per LTB

# Buckling torsionale laterale

- Le curve di buckling torsionale laterale sono indicate sotto:

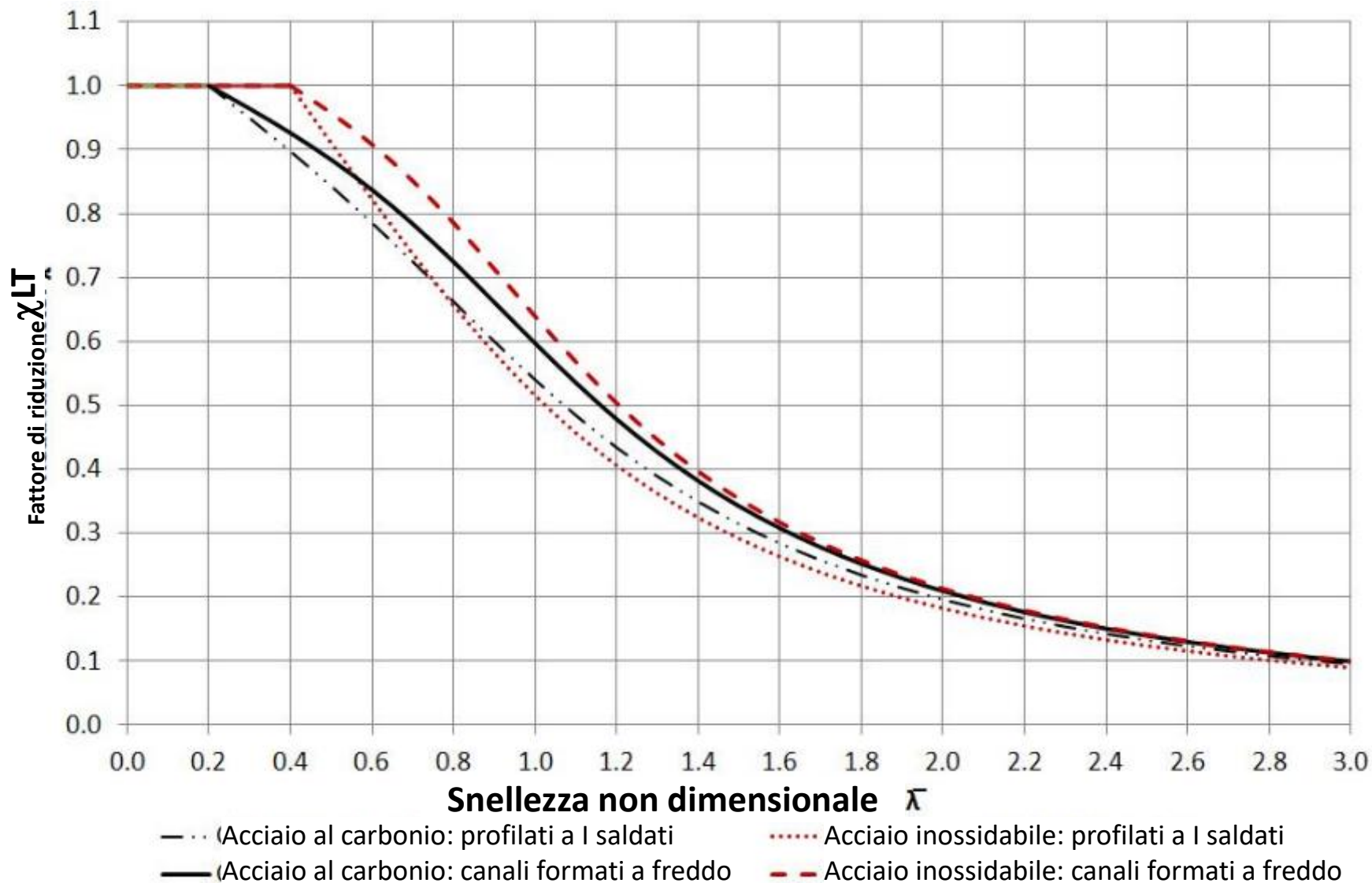
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{but } \chi_{LT} \leq 1.0$$

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

Lunghezza plateau

Fattore di imperfezione

# Eurocodice 3 Curve di buckling torsionale laterale



# Snellezza non dimensionale

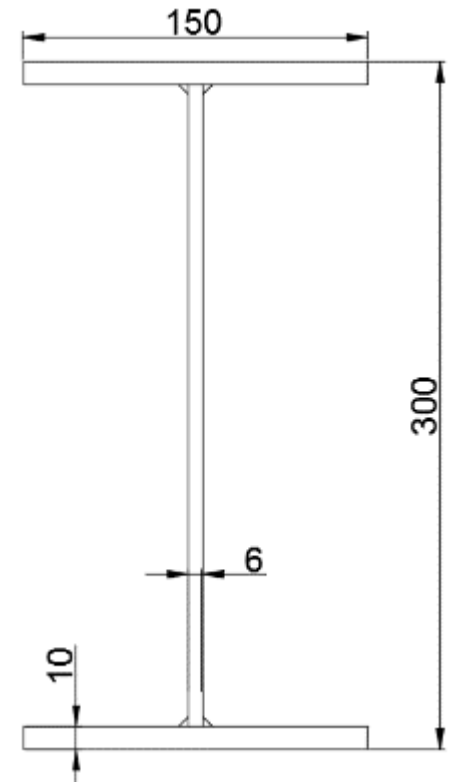
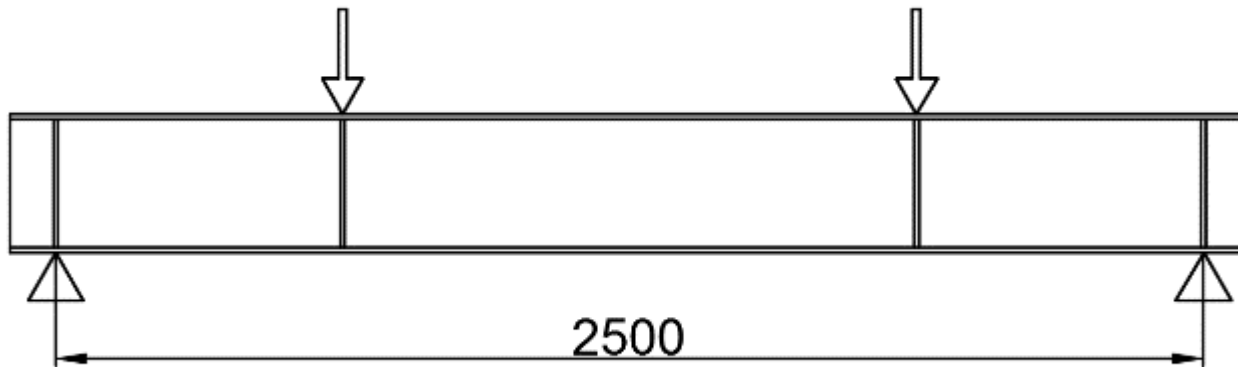
- Snellezza di buckling torsionale laterale:

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

- Curve di buckling come per compressione (eccetto curva  $a_0$ )
- $W_y$  dipende dalla classificazione del profilato
- $M_{cr}$  è il momento LTB critico elastico

# Eurocodice 3 Esempio di buckling torsionale laterale

- Trave a I sottoposta a piegatura



	Acciaio al carbonio	Acciaio inossidabile duplex
Materiale	S355	EN 1.4162
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	355	450
E [N/mm <sup>2</sup> ]	210000	200000



# Eurocodice 3 Esempio di buckling torsionale laterale

## EC 3-1-1: S355

### ■ Classification

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

#### — Flange

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

Class 1

#### — Web

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

Class 1

Cross-section = class 1

## EC 3-1-4: Duplex

### ■ Classification

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

#### — Flange

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

Class 3

#### — Web

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

Class 3

Cross-section = class 3

# Eurocodice 3 Esempio di buckling torsionale laterale

## EC 3-1-1: S355

- Ultimate moment

- Class 1

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

## EC 3-1-4: Duplex

- Ultimate moment

- Class 3

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

## Revision EC 3-1-4:

- Classification limits: closer to carbon steel

- Cross-section = class 2

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

# Eurocodice 3 Esempio di buckling torsionale laterale

**Momento di buckling elastico critico:**

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

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: duplex
$C_1$ [-]	1,04	1,04
$C_2$ [-]	0,42	0,42
$k_z$ [-]	1	1
$k_\omega$ [-]	1	1
$z_g$ [mm]	160	160
$I_z$ [mm <sup>4</sup> ]	5,6·10 <sup>6</sup>	5,6·10 <sup>6</sup>
$I_T$ [mm <sup>4</sup> ]	1,2·10 <sup>5</sup>	1,2·10 <sup>5</sup>
$I_\omega$ [mm <sup>6</sup> ]	1,2·10 <sup>11</sup>	1,2·10 <sup>11</sup>
$E$ [MPa]	210000	200000
$G$ [MPa]	81000	77000
$M_{cr}$ [kNm]	<b>215</b>	<b>205</b>

# Eurocodice 3 Esempio di buckling torsionale laterale

## Resistenza al buckling torsionale laterale

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Duplex	EC 3-1-4: Revisione futura
$W_y$ [mm <sup>3</sup> ]	<b>5,5.10<sup>5</sup></b>	<b>4,9.10<sup>5</sup></b>	<b>5,5.10<sup>5</sup></b>
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	355	450	450
$M_{cr}$ [kNm]	215	205	205
$\bar{\lambda}_{LT}$ [-]	0,96	1,04	1,10
$\alpha_{LT}$ [-]	0,49	0,76	0,76
$\bar{\lambda}_{LT,0}$ [-]	0,2	0,4	0,4
$\phi_{LT}$ [-]	1,14	1,29	1,37
$\chi_{LT}$ [-]	0,57	0,49	0,46
$\gamma_{M1}$ [-]	1,0	1,1	1,1
$M_{b,Rd}$ [kNm]	<b>111</b>	<b>99</b>	<b>103</b>

# Eurocodice 3 Esempio di buckling torsionale laterale

- Confronto

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: Duplex	EC 3-1-4: Revisione futura
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	355	450	450
$\gamma_{M0}$ [-]	1,0	1,1	1,1
$\gamma_{M1}$ [-]	1,0	1,1	1,1
Profilato trasversale $M_{c,Rd}$	196	202	226
Stabilità $M_{b,Rd}$	111	99	103

- In questo esempio, l'acciaio al carbonio e l'acciaio inossidabile presentano una resistenza analoga a LTB
- Tuttavia: prove e casi di letteratura attuali dimostrano che i risultati EC3-1-4 devono essere adattati per essere più vicini alla realtà  
⇒ **troppo conservativi**  
(saranno mostrati nell'esempio sui metodi degli elementi finiti)

# Sezione 4

Metodi alternativi

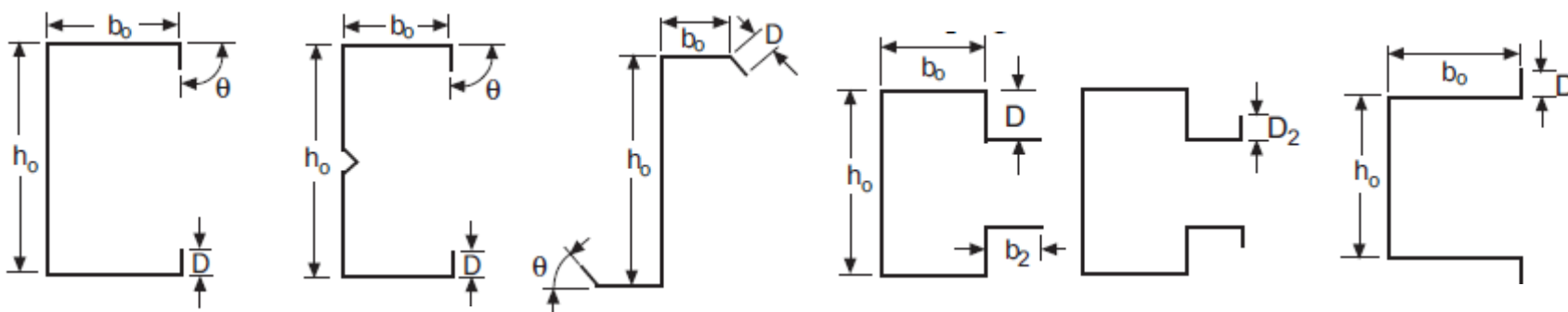
# Metodi alternativi

- Metodo della resistenza diretta (DSM)
  - Parte del codice americano
  - Per profili a parete sottile
- Metodo della resistenza continua (CSM)
  - Comprende gli effetti benefici dell'incrudimento
- Metodi degli elementi finiti
  - Più noioso
  - Può comprendere tutte le specificità del modello



# Metodo della resistenza diretta

- AISI Appendice 1
- Metodo molto semplice e diretto
- Usato per i profilati a parete sottile

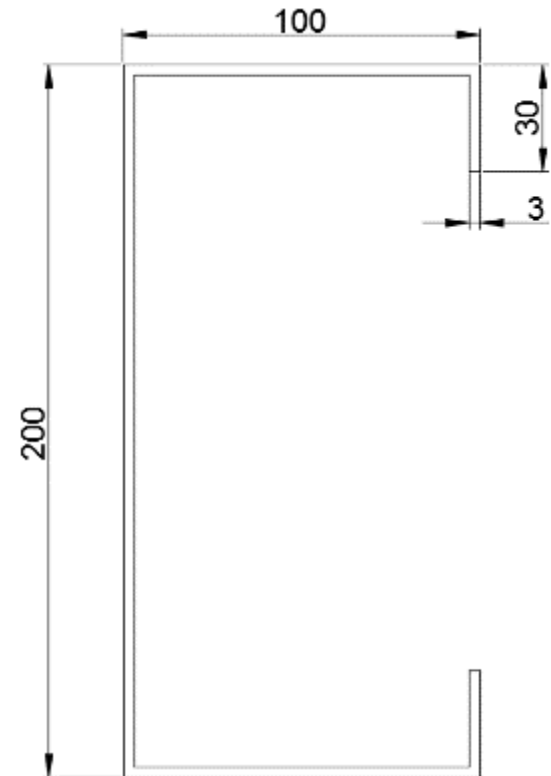


- Ma richiede una "analisi del buckling elastico"
  - Metodo teorico fornito in letteratura
  - Metodo delle strisce finite (ad esempio CUFSM)
- Maggiori informazioni: <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

# Metodo della resistenza diretta - esempio

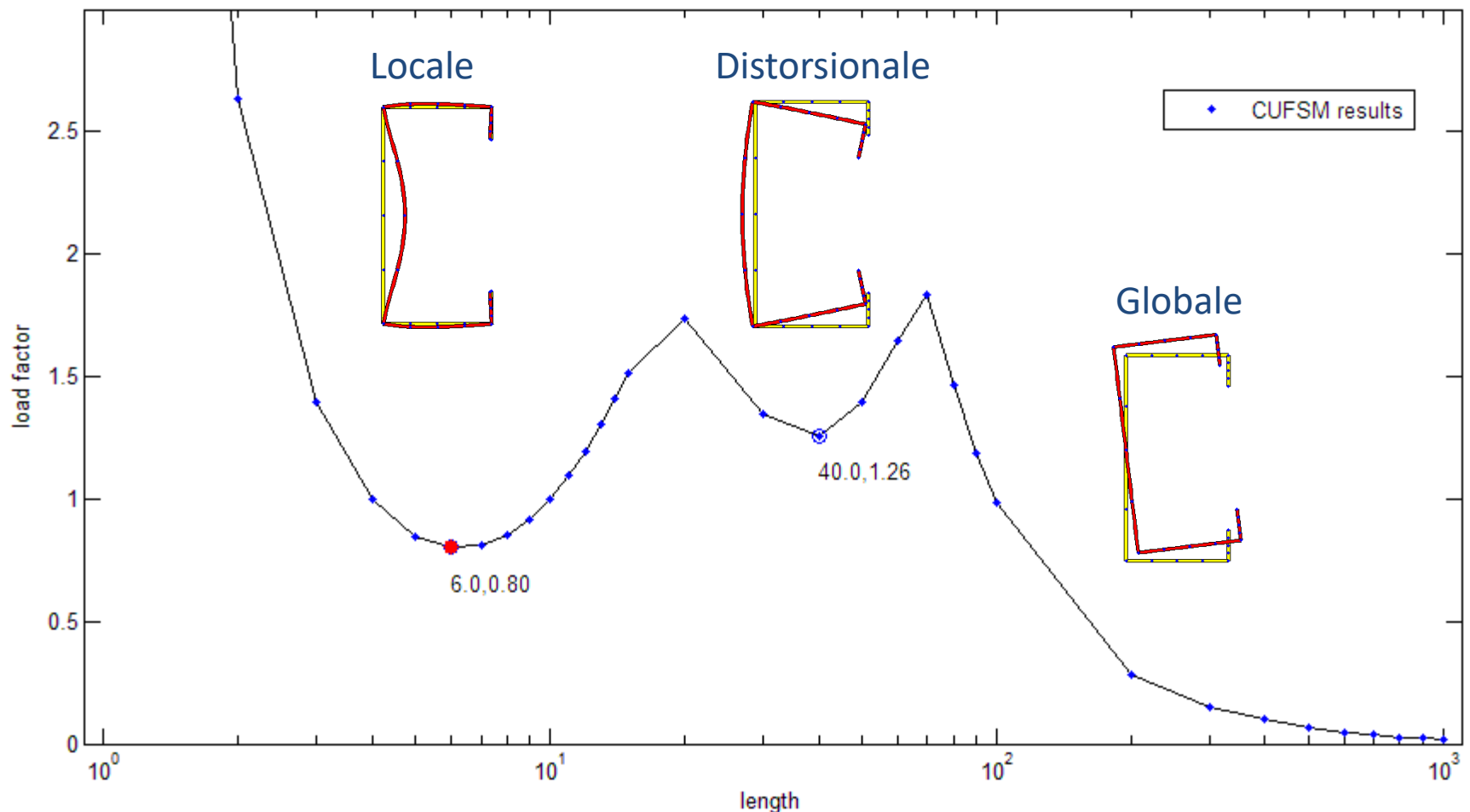
- Canale a C con labbro sottoposto a compressione
  - Colonna con supporto semplice
  - Lunghezza colonna: 5m

	Acciaio inossidabile ferritico
Materiale	EN 1.4003
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	280
$f_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]	450
E [N/mm <sup>2</sup> ]	220000



# Metodo della resistenza diretta - esempio

- Primo passo: Analisi del buckling elastico



# Metodo della resistenza diretta - esempio

- Produzione dell'analisi = “Carico di buckling critico elastico”
  - Nell'esempio, il fattore di carico dall'analisi del buckling elastico equivale a:
    - Per buckling locale: 0,80
    - Per buckling distorsionale: 1,26
    - Per buckling globale: 0,28
  
- Secondo passo: Calcolo delle resistenze nominali per
  - Buckling locale  $\Rightarrow$  un'equazione
  - Buckling distorsionale  $\Rightarrow$  un'equazione
  - Buckling globale  $\Rightarrow$  un'equazione

# Metodo della resistenza diretta - esempio

- Nominal global buckling strength  $P_{ne}$

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

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

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

For  $\lambda_c \leq 1,5$   $P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y$

For  $\lambda_c > 1,5$   $P_{ne} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) P_y$

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

# Metodo della resistenza diretta - esempio

- Nominal local buckling strength  $P_{nl}$

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

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

For  $\lambda_l \leq 0,776$

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

For  $\lambda_l > 0,776$

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

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

# Metodo della resistenza diretta - esempio

- Nominal distortional buckling strength  $P_{nd}$

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

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

For  $\lambda_d \leq 0,561$

$$P_{nd} = P_y$$

For  $\lambda_d > 0,561$

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

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



# Metodo della resistenza diretta - esempio

- Terzo passo: La resistenza assiale è "solo" il valore minimo delle tre resistenze nominali
  - Locale:  $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$
  - Distorsionale:  $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$
  - Globale:  $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

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

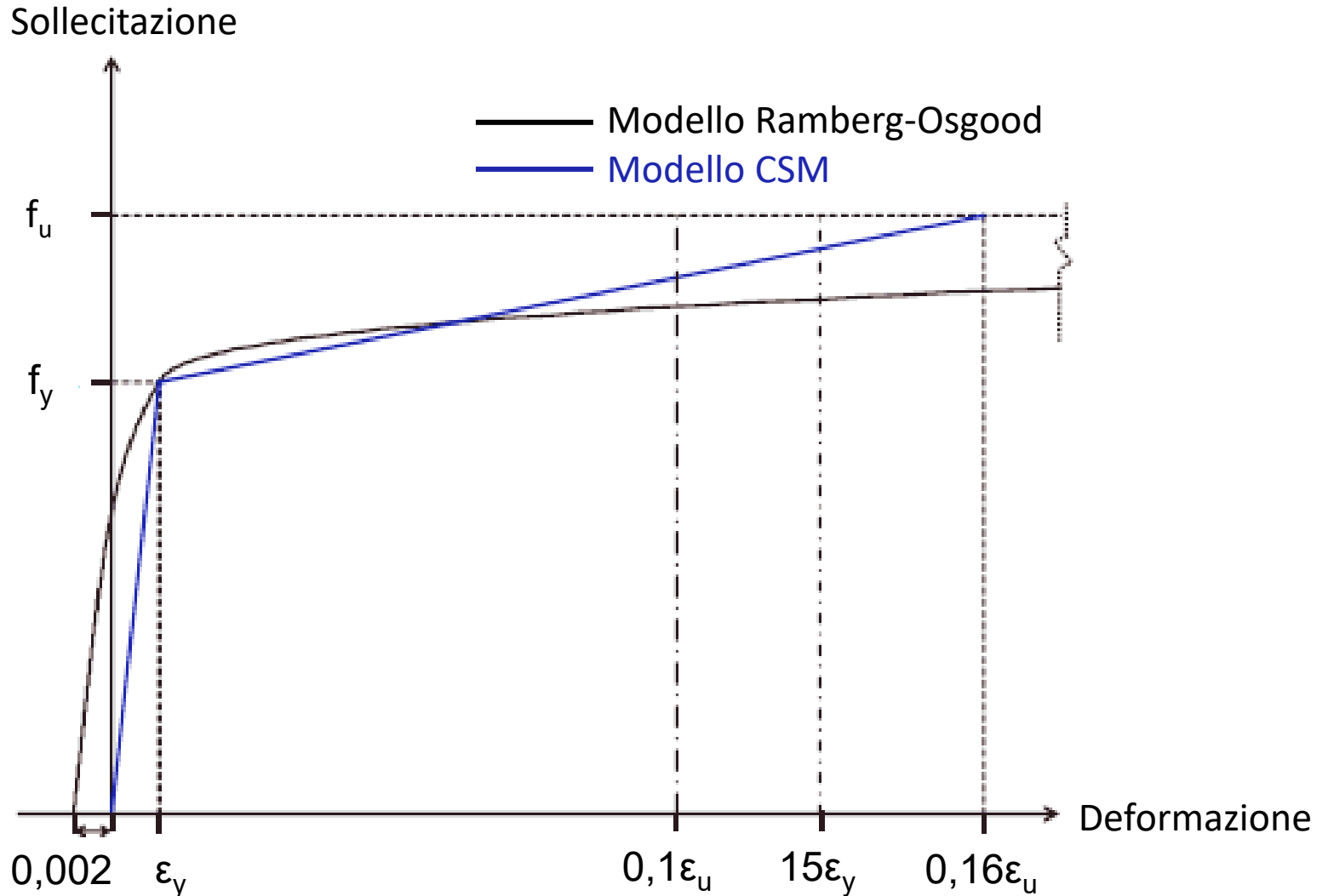
# Metodo della resistenza continua

- Caratteristiche del materiale acciaio inossidabile:
  - Modello del materiale non lineare
  - Indurimento elevato
  - Metodi di progettazione convenzionale non in grado di tener conto del potenziale completo del profilato trasversale

Il metodo della resistenza continua utilizza un modello di materiale che include l'incrudimento

# Metodo della resistenza continua

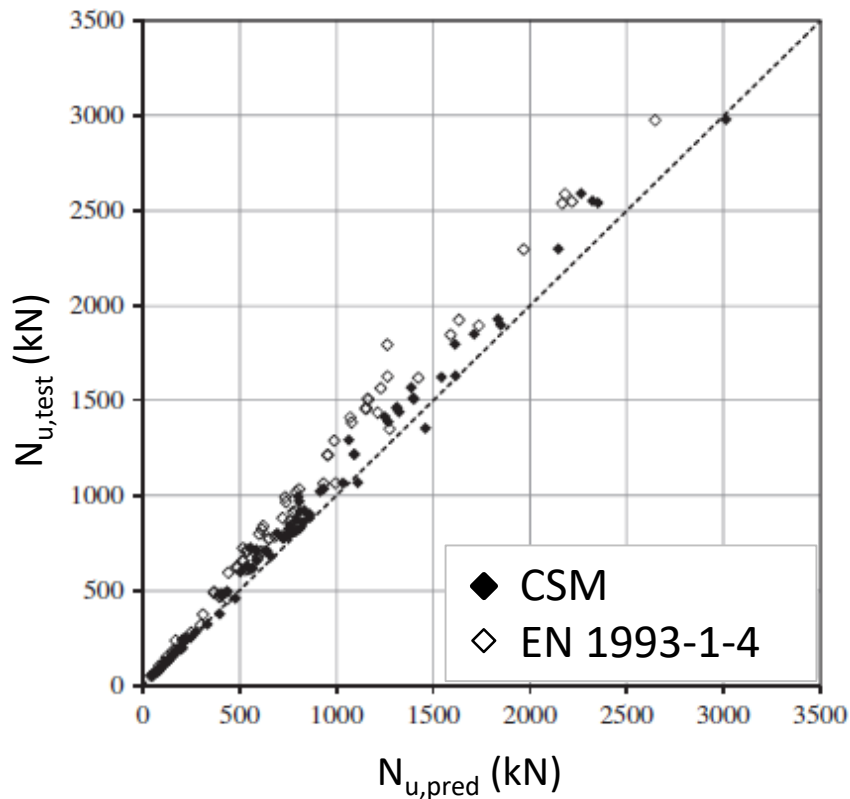
- Modello di materiale considerato nel CSM:



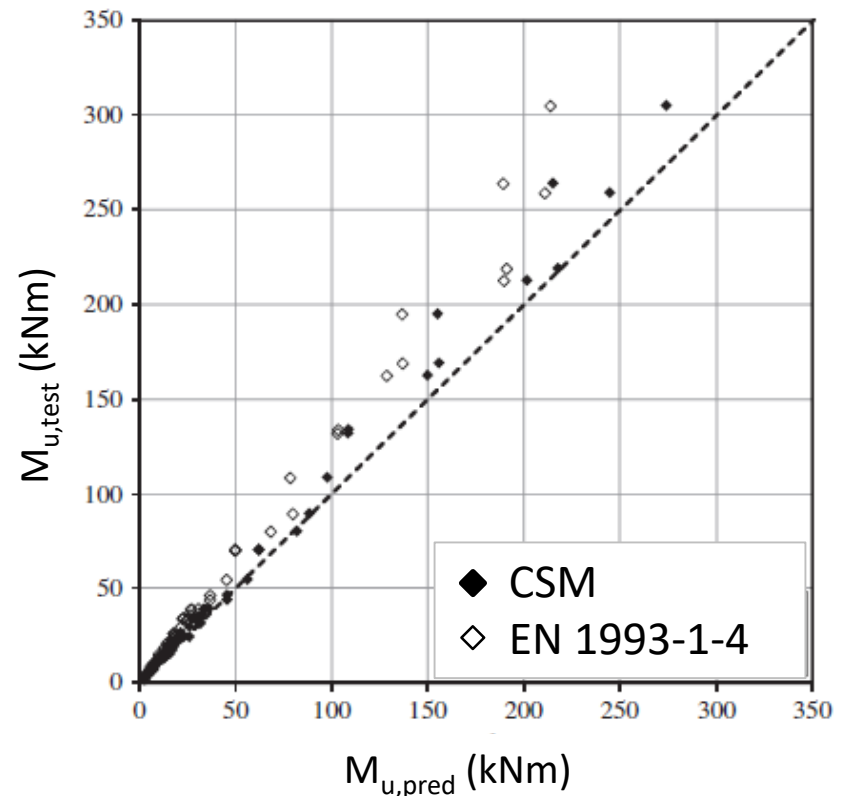
# Metodo della resistenza continua

- Confronto tra previsioni EC3 e CSM versus prove:

## In compressione



## In piegatura

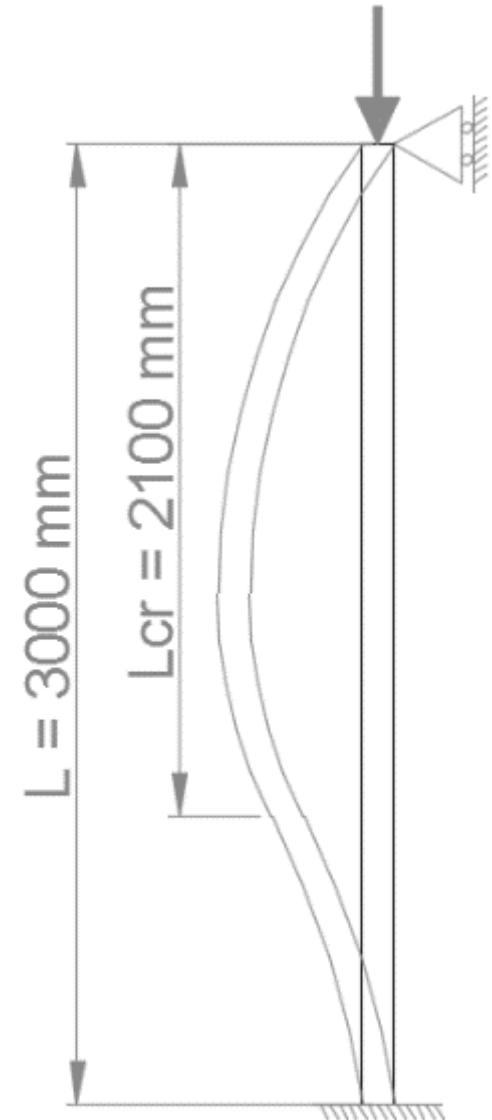
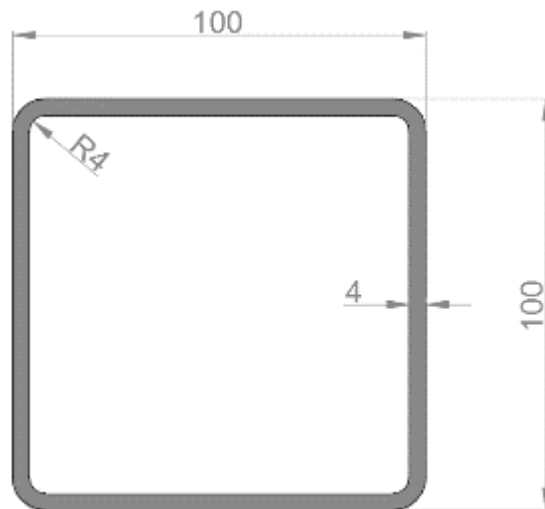


CSM è in grado di descrivere con precisione il comportamento del profilato trasversale

# CSM: Esempio di buckling a flessione

- Profili cavi rettangolari formati a freddo sottoposti a compressione concentrica (esempio della slide 51)

Acciaio inossidabile austenitico	
Materiale	EN 1.4301
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	230
E [N/mm <sup>2</sup> ]	200000



# CSM: esempio di buckling a flessione

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

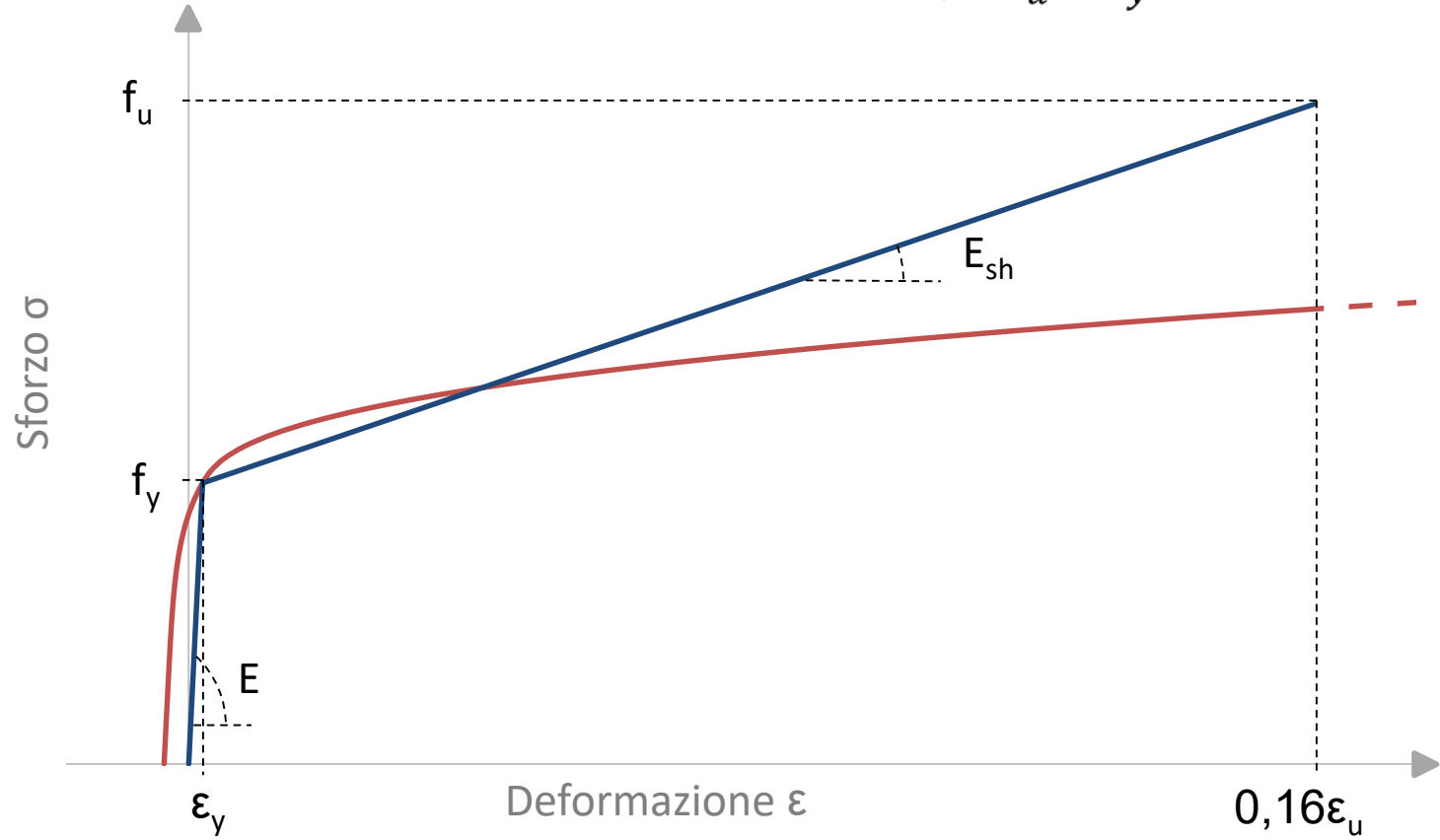
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

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



# CSM: esempio di buckling a flessione

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

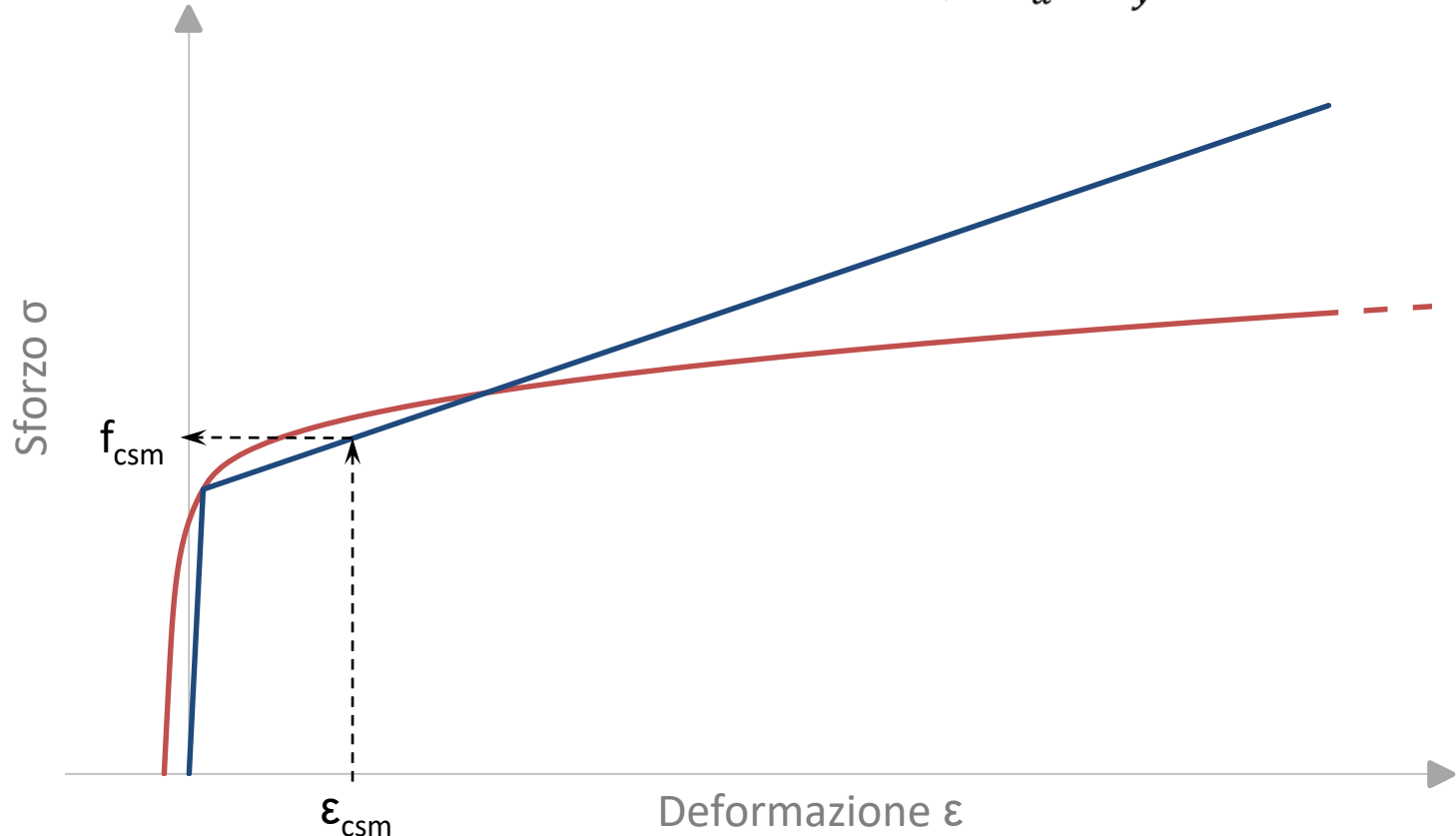
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

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

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

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

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



# CSM: esempio di buckling a flessione

- $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} = 0,60$ 
  - $\sigma_{cr,cs}$  = elastic buckling stress of the full cross-section allowing for element interaction
- $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} = 5,27$
- $f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 247 \text{ N/mm}^2$
- $N_{c,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} = 335 \text{ kN}$



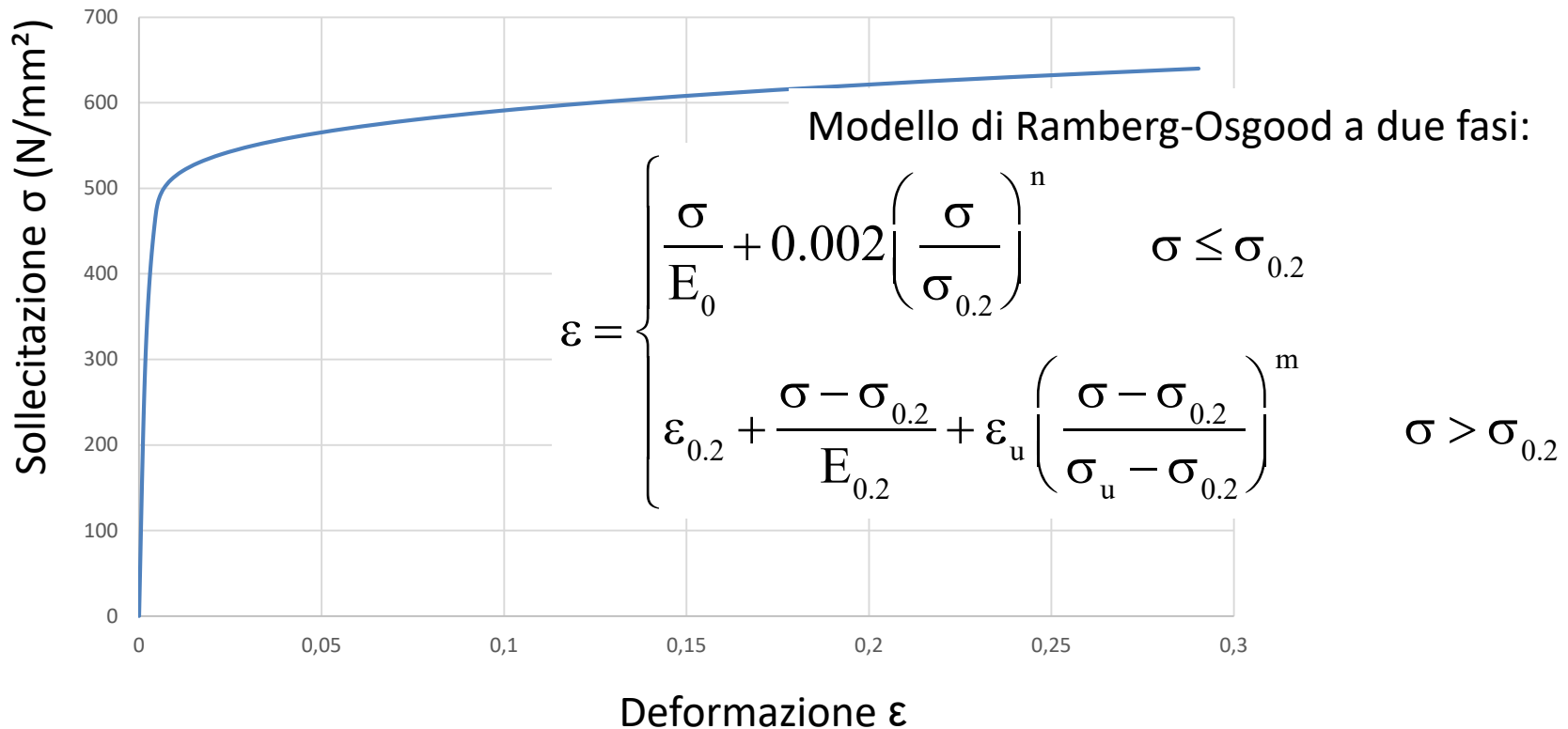
# CSM: esempio di buckling a flessione

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

	EC 3-1-1: S235	CSM: Austenitico	EC 3-1-4: Austenitico
$f_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	235	230	230
$\gamma_{M0}$ [-]	1,0	1,1	1,1
$\gamma_{M1}$ [-]	1,0	1,1	1,1
<b>Profilato trasversale</b>	<b>351</b>	<b>335</b>	<b>313</b>
$N_{c,Rd}$ [kN]			
<b>Stabilità <math>N_{b,Rd}</math> [kN]</b>	<b>281</b>	<b>294</b>	<b>277</b>

# Modello agli elementi finiti

- La curva sforzo-deformazione del materiale può essere modellata con precisione (ad esempio utilizzando la legge di Ramberg-Osgood o i risultati delle prove di trazione misurati)



# Modello agli elementi finiti

- I parametri non lineari sono forniti dalle seguenti espressioni (in base alla revisione di Rasmussen ):

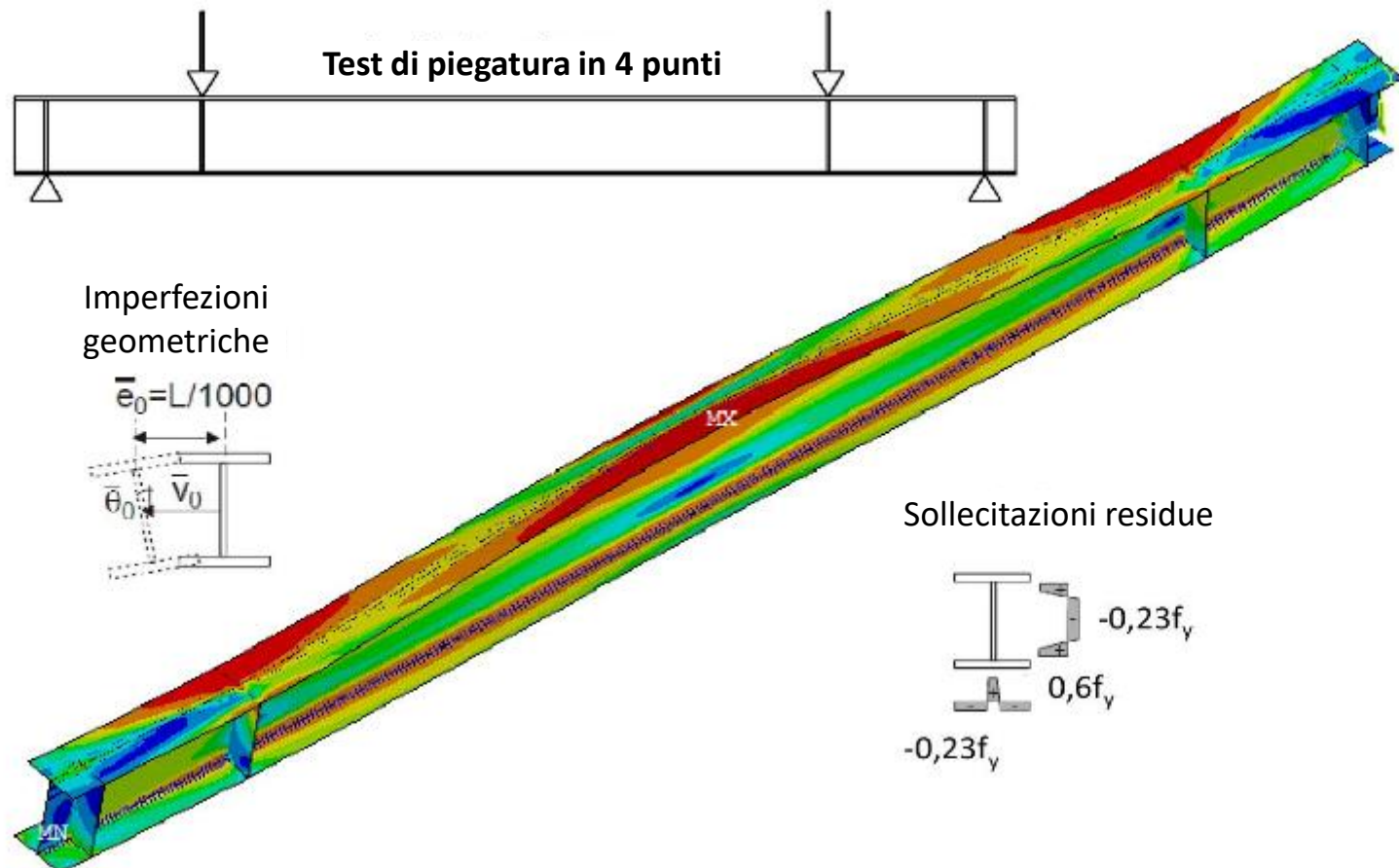
$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n \frac{E_0}{\sigma_{0.2}}}$$

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

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = \begin{cases} 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} & \text{for austenitic and duplex} \\ \frac{0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}}{1 - 0.0375(n - 5)} & \text{for all stainless steel alloys} \end{cases}$$

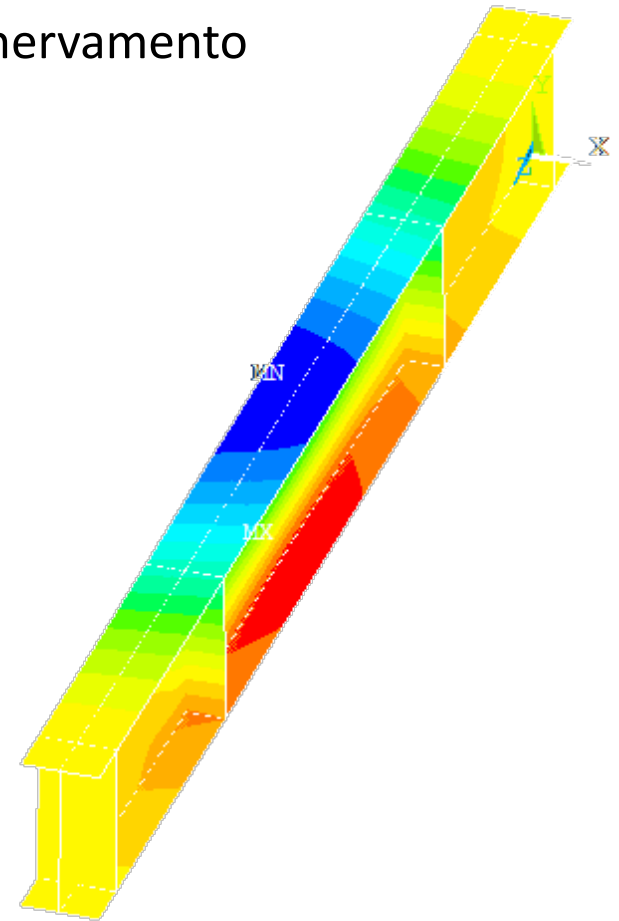
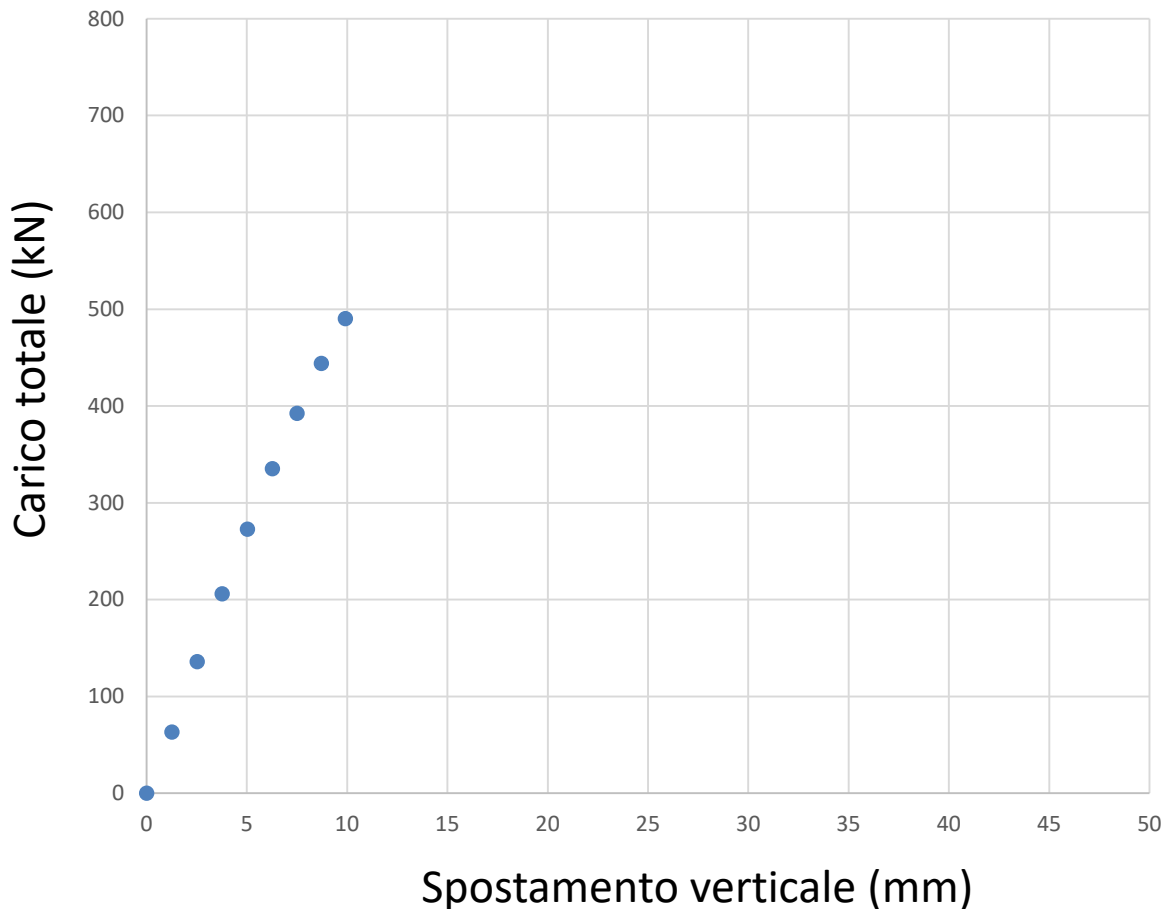
# Modello agli elementi finiti

- Trave a I sottoposta a piegatura che subisce buckling torsionale laterale: tutte le imperfezioni possono essere modellate



# Modello agli elementi finiti

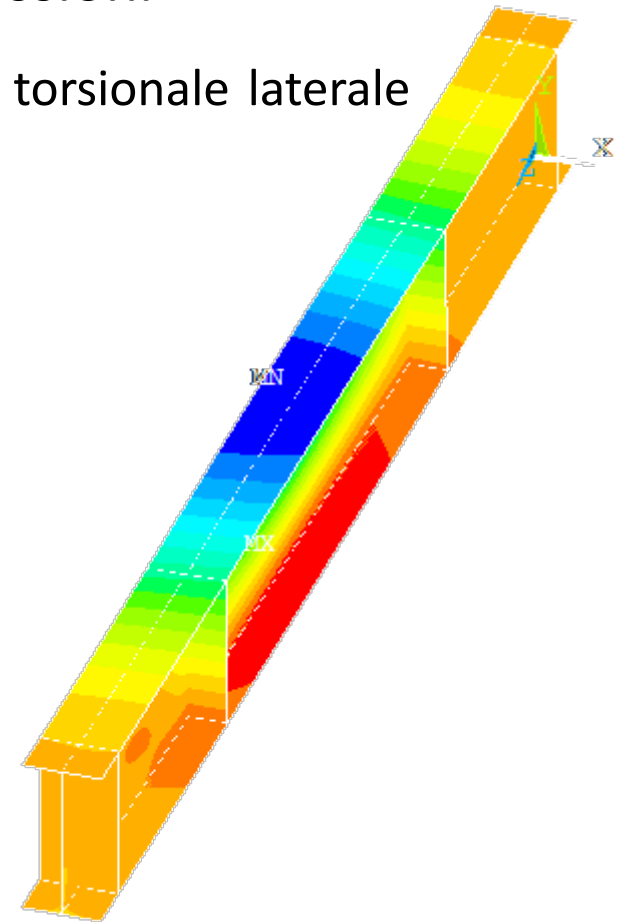
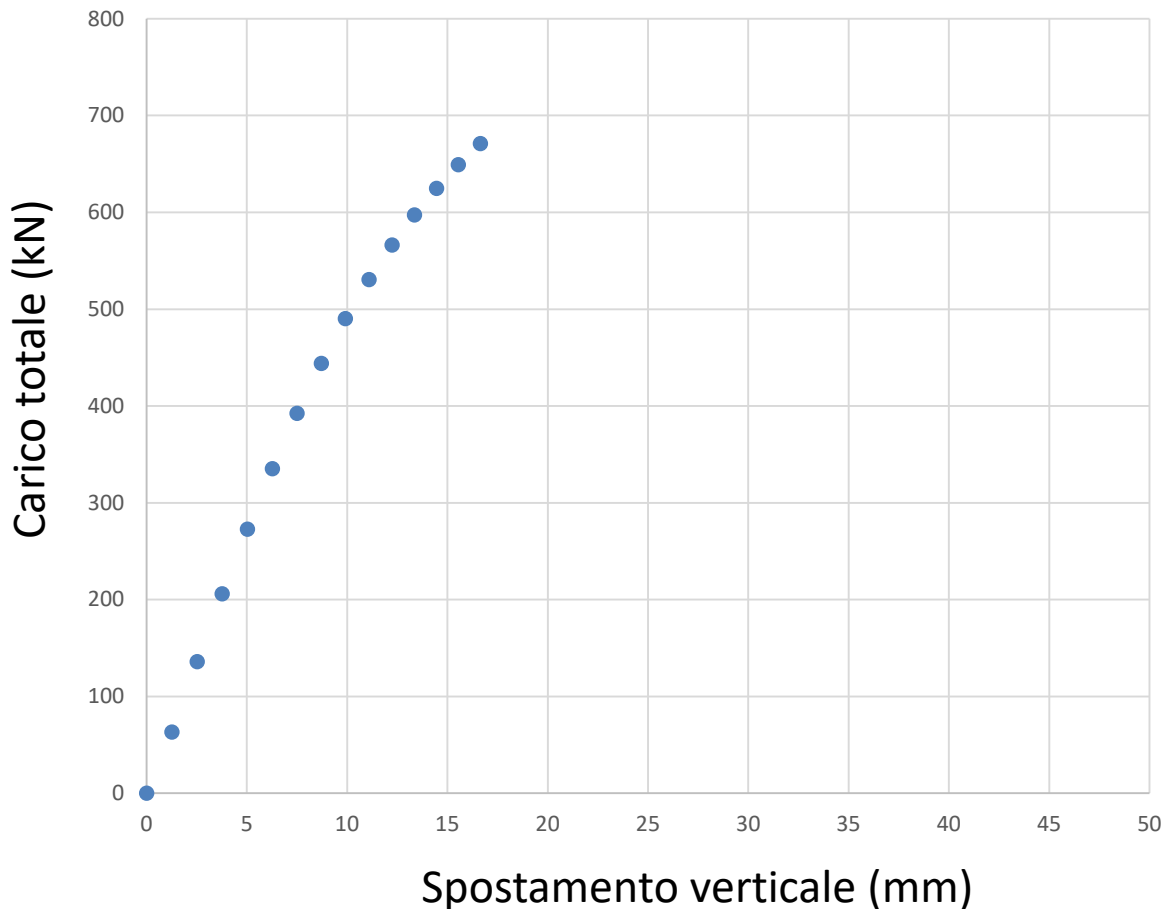
- È possibile calcolare la curva carico-deflessioni
  - Risultati: comportamento elastico e primo snervamento



# Modello agli elementi finiti

- È possibile calcolare la curva carico-deflessioni

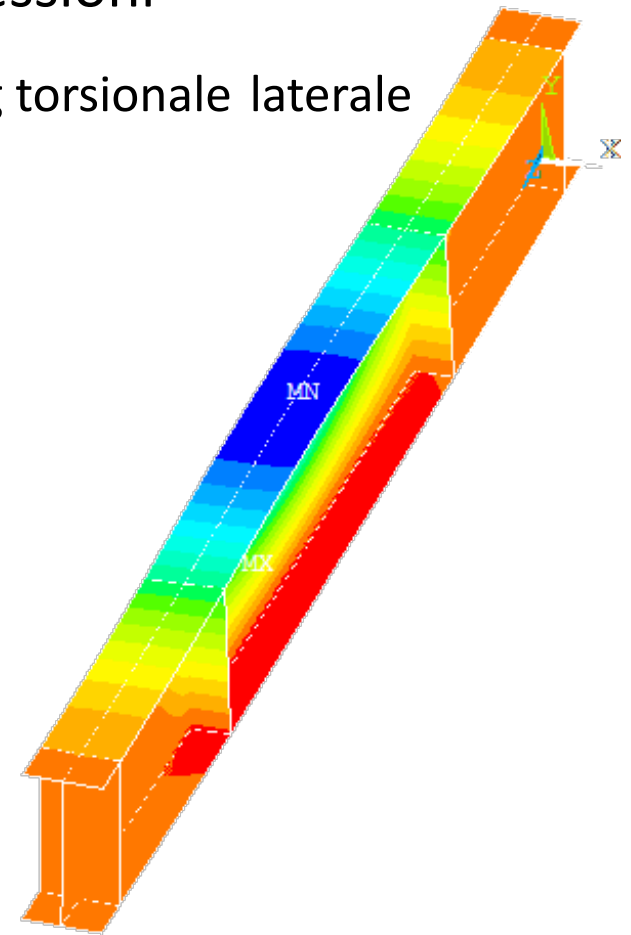
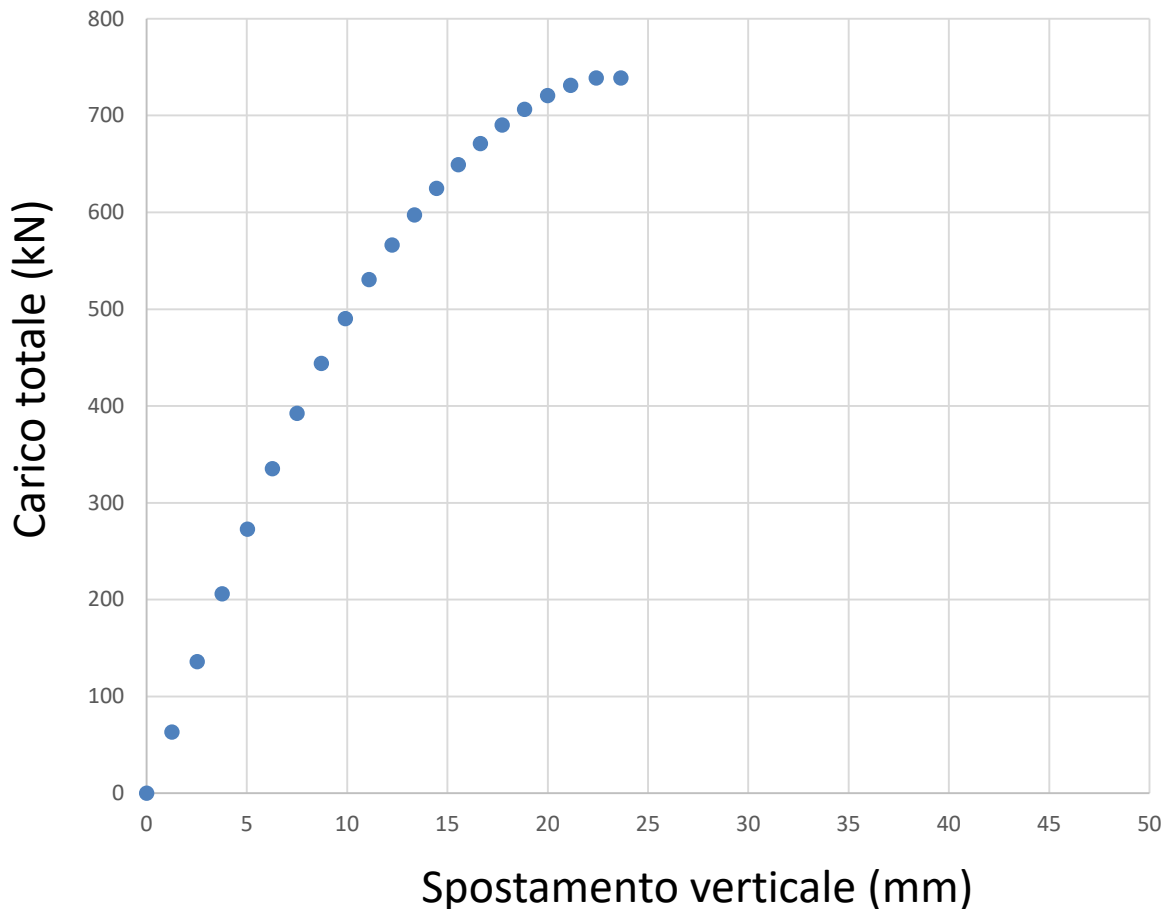
— Risultati: fenomeno di instabilità => buckling torsionale laterale



# Modello agli elementi finiti

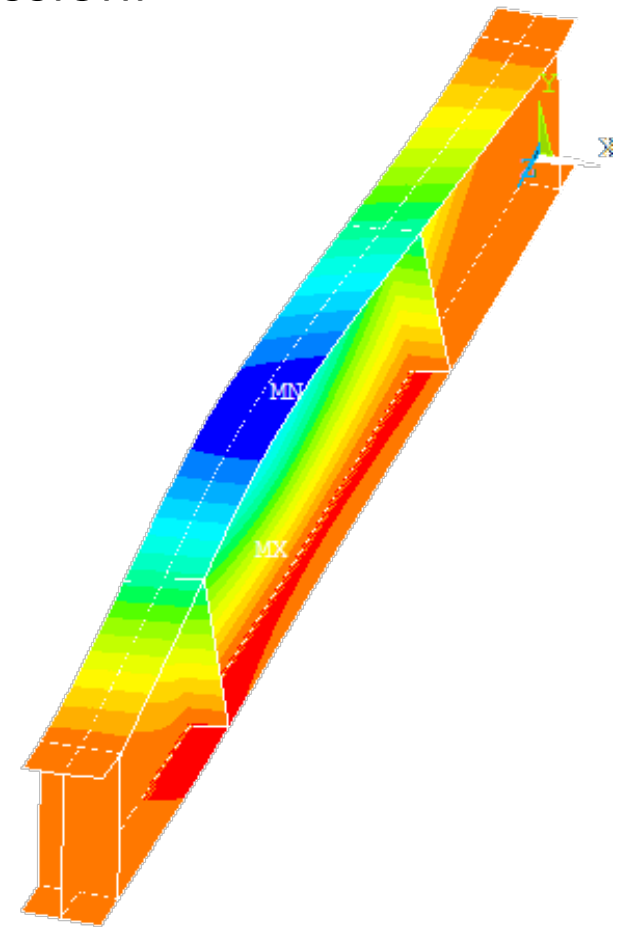
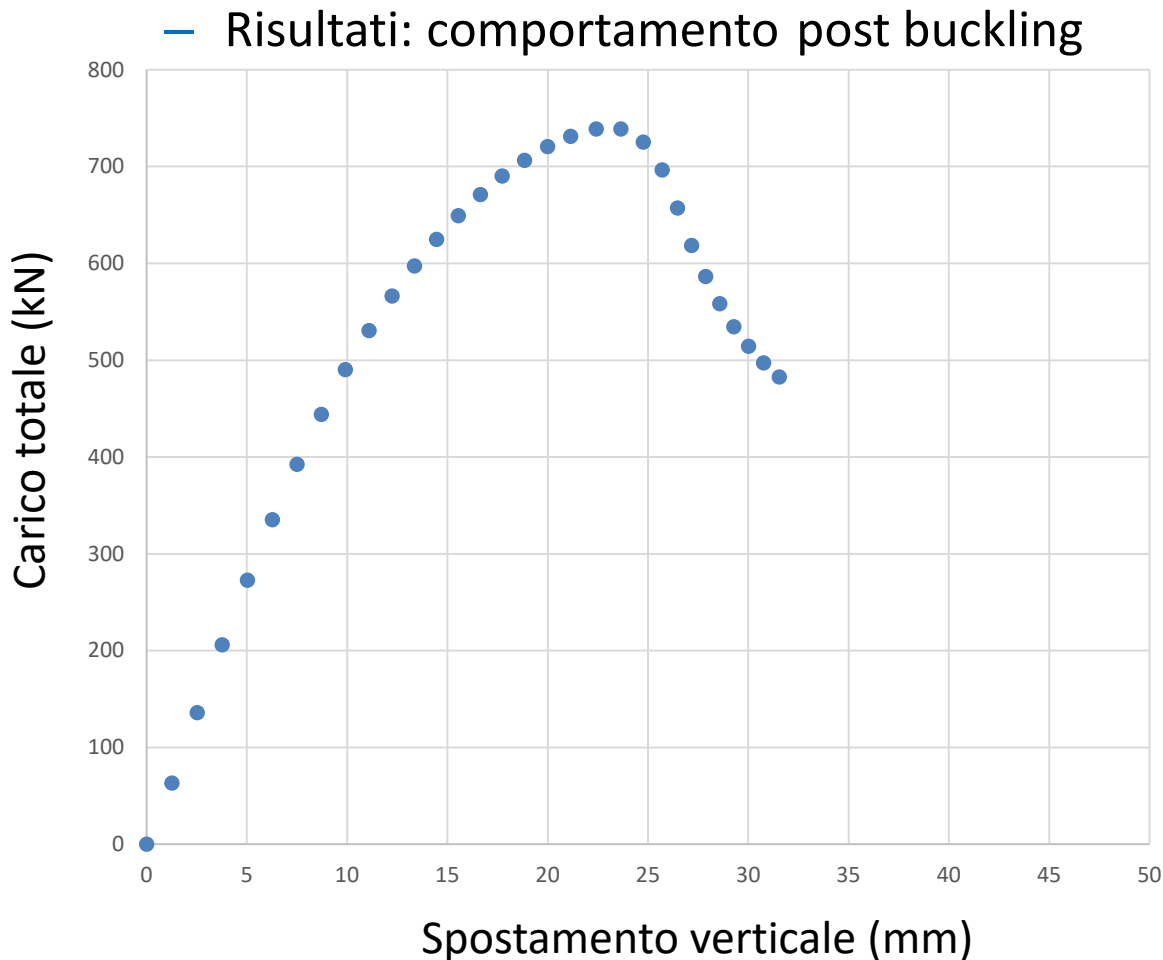
- È possibile calcolare la curva carico-deflessioni

— Risultati: fenomeno di instabilità => buckling torsionale laterale



# Modello agli elementi finiti

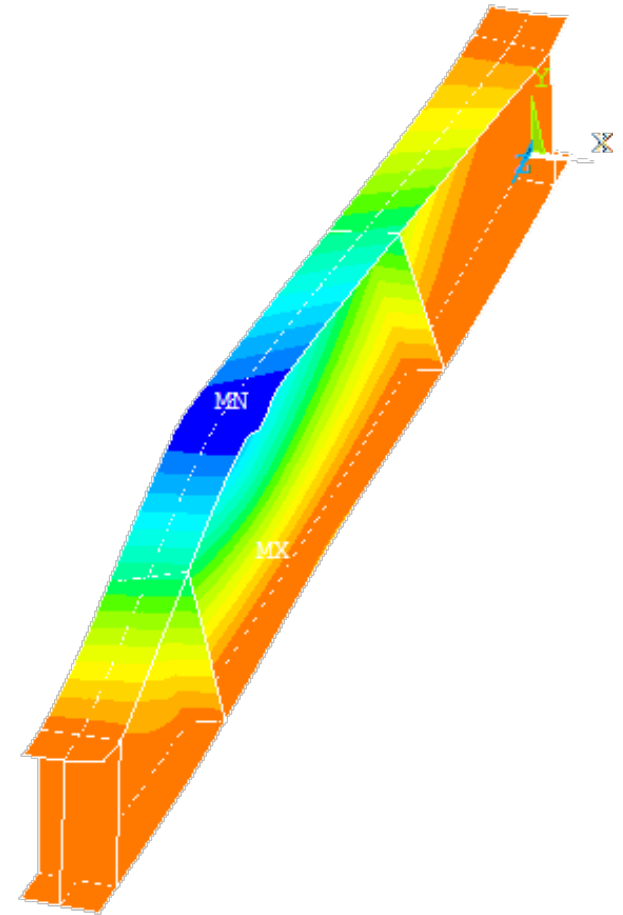
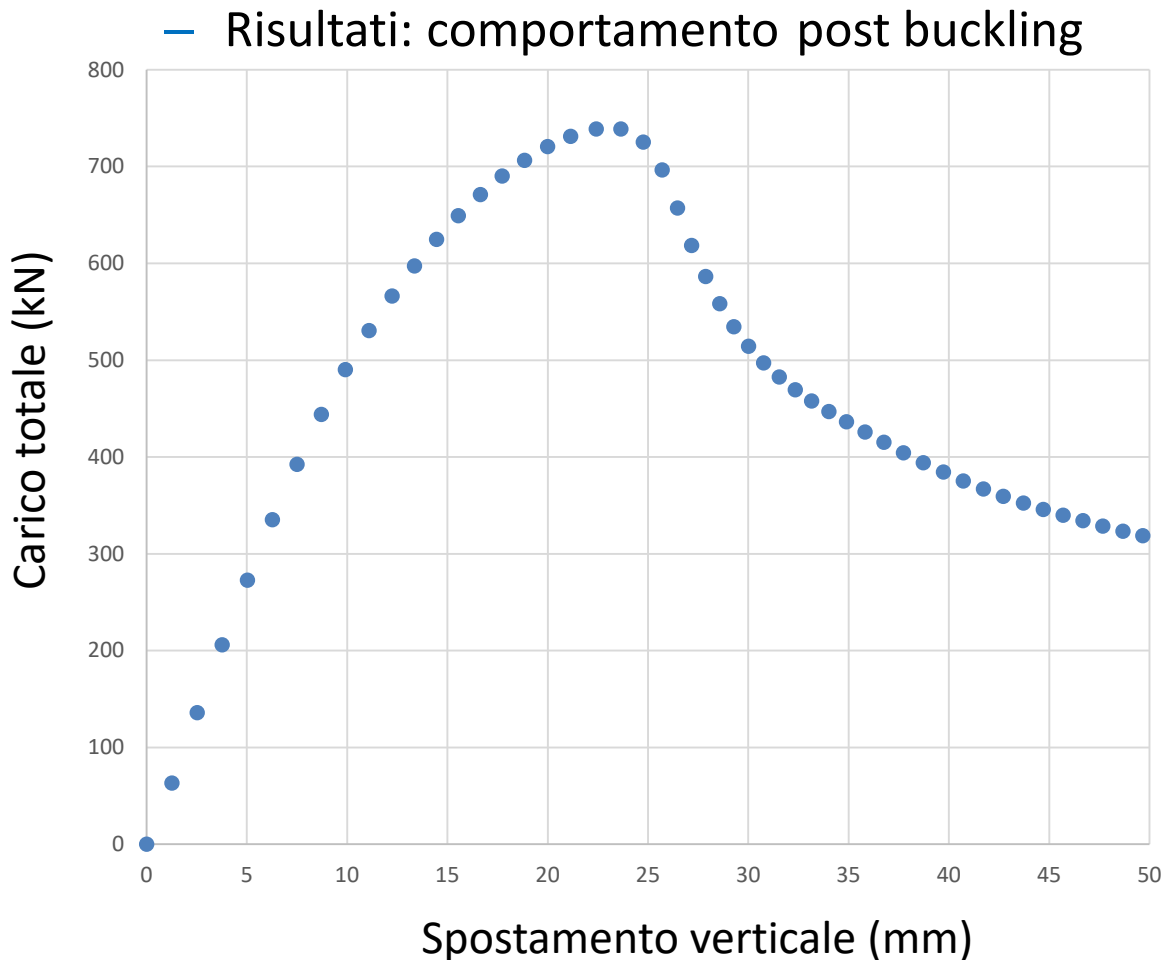
- È possibile calcolare la curva carico-deflessioni



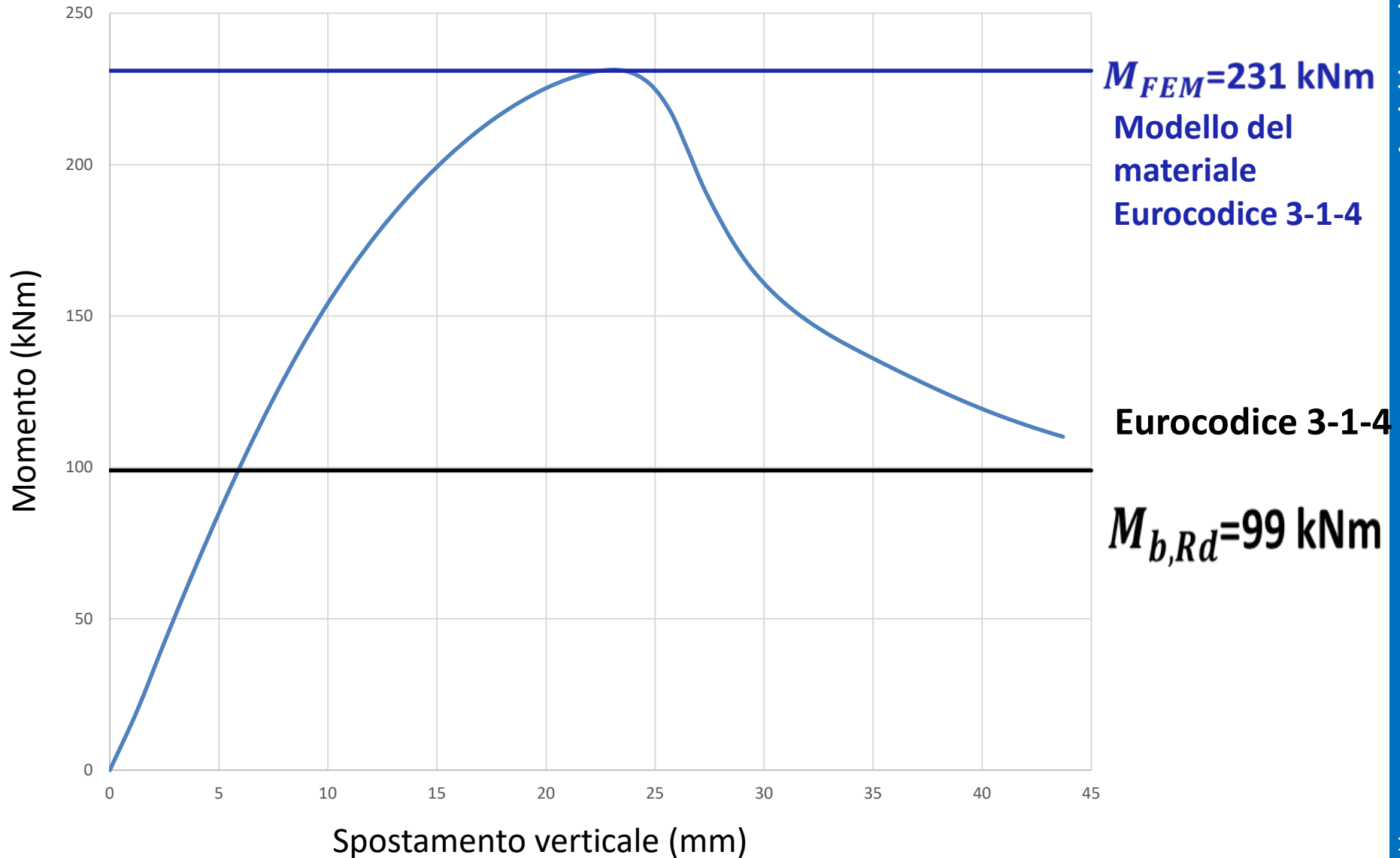


# Modello agli elementi finiti

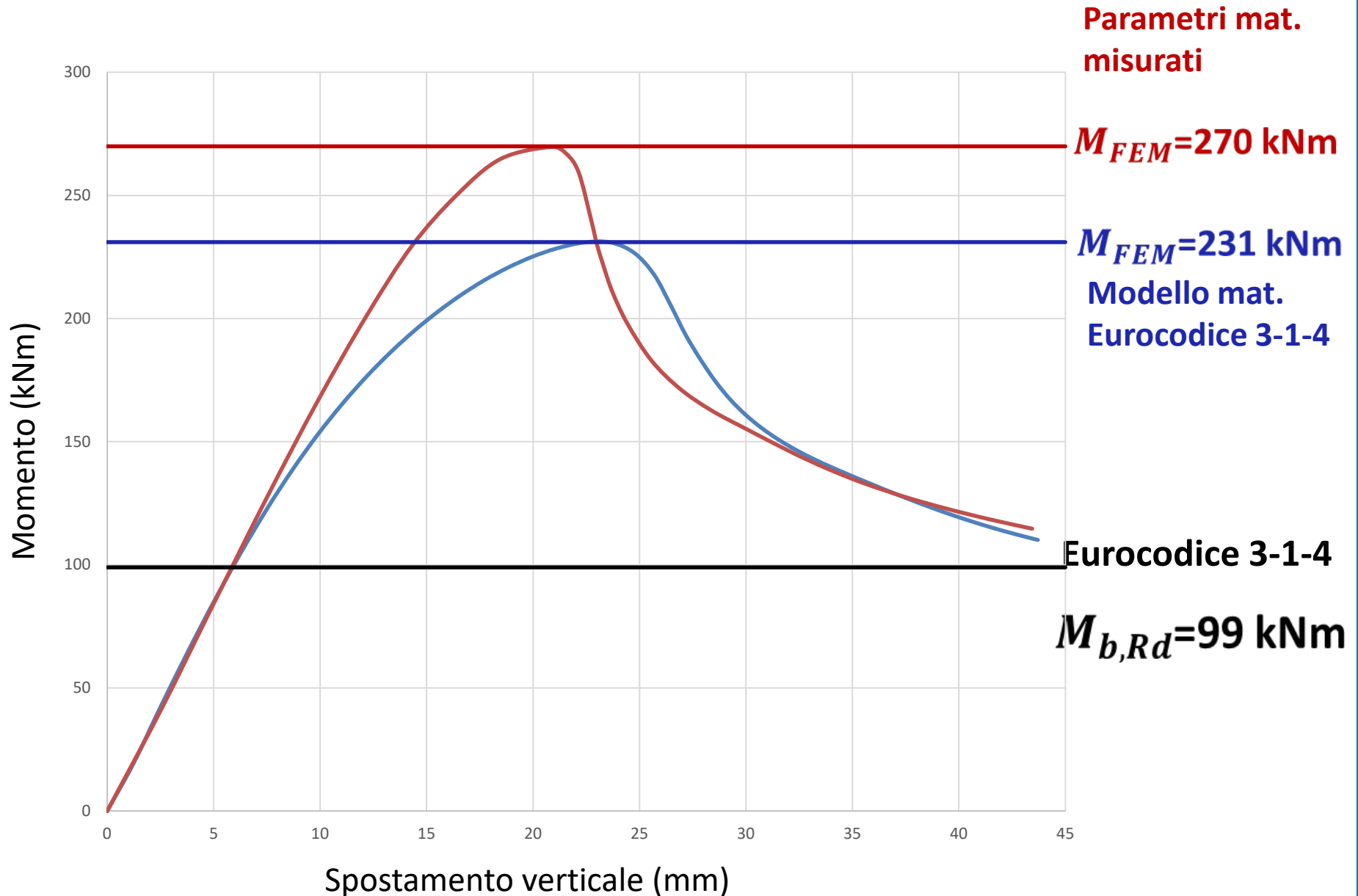
- È possibile calcolare la curva carico-deflessioni



# Modello agli elementi finiti



# Modello agli elementi finiti



# Sezione 5

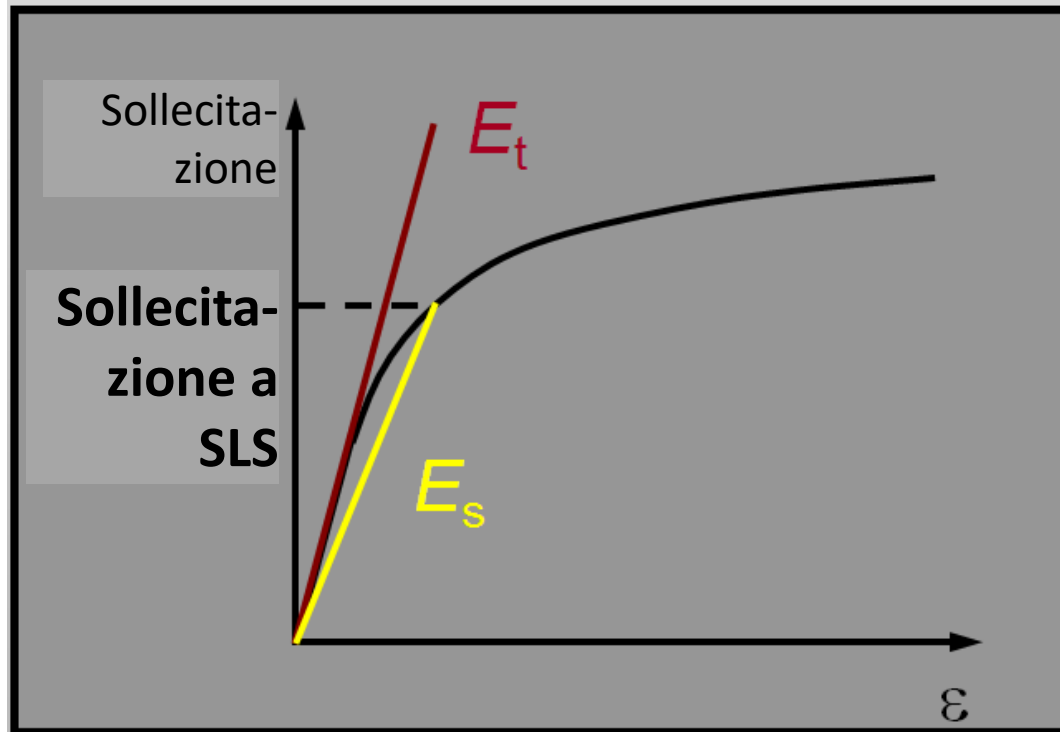
## Scostamenti

# Scostamenti

- La curva sforzo-deformazione non lineare indica la rigidità dell'acciaio inossidabile ↓  
come sollecitazione ↑
- Gli scostamenti sono leggermente maggiori nell'acciaio inossidabile che nell'acciaio al carbonio
- Usare il modulo secante per la sollecitazione nell'elemento con lo stato limite di utilizzabilità (SLS)

# Scostamenti

Modulo secante  $E_s$  per la sollecitazione nell'elemento allo SLS



# Scostamenti

Il modulo secante  $E_S$  determinato dal modello Ramberg-Osgood:

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

$f$  è la sollecitazione allo stato limite di utilizzabilità

$n$  è una costante del materiale

# Gli scostamenti in una trave di acciaio inossidabile austenitico

Rapporto di sollecitazione $f/f_y$	Modulo secante, $E_s$ N/mm <sup>2</sup>	% di aumento della deflessione
0.25	200,000	0
0.5	192,000	4
0.7	158,000	27

$f$  = sollecitazione allo stato limite di utilizzabilità



# Sezione 6

Informazioni aggiuntive

# Risposta al carico sismico

- Maggiore duttilità (acciaio inox austenitico) + sostiene più cicli di carico  
→ maggiore dissipazione di energia isteretica con carico ciclico
- Il maggiore incrudimento da lavorazione  
→ migliora lo sviluppo di zone plastiche grandi e deformabili
- Dipendenza dalla velocità di deformazione più forte –  
→ maggiore resistenza con velocità di deformazione rapida

# Progettazione di collegamenti bullonati

- La forza e la resistenza alla corrosione dei bulloni e del materiale che collegano devono essere simili
- I bulloni di acciaio inossidabile devono essere utilizzati per collegare gli elementi di acciaio inossidabile per evitare la corrosione bimetallica
- I bulloni di acciaio inossidabile possono essere utilizzati anche per collegare l'acciaio zincato e gli elementi di alluminio

# Progettazione di collegamenti bullonati

- Le regole per i bulloni di acciaio al carbonio nei fori passanti sono generalmente applicabili all'acciaio inossidabile (tensione, tranciatura)
- Regole speciali per la resistenza di appoggio richiesta fino alla deformazione limite dovuta all'elevata duttilità dell'acciaio inossidabile

$$f_{u,rid} = 0.5f_y + 0.6f_u < f_u$$

# Bulloni precaricati

Utili in strutture come ponti, torri, pali ecc. quando:

- il collegamento è soggetto a carichi vibratori,
  - bisogna evitare lo slittamento tra le parti unite,
  - il carico applicato cambia frequentemente da un valore positivo a uno negativo
- 
- Non esistono regole di progettazione per i bulloni precaricati di acciaio inossidabile
  - È sempre necessario eseguire dei test

# Progettazione di collegamenti saldati

- Le regole di progettazione dell'acciaio al carbonio sono generalmente applicabili all'acciaio inossidabile
- Usare il materiale di consumo corretto per il grado di acciaio inossidabile
- L'acciaio inossidabile può essere saldato all'acciaio al carbonio, ma occorre una preparazione speciale

# Resistenza a fatica

- Il comportamento a fatica dei giunti saldati è dominato dalla geometria di saldatura
- Le prestazioni dell'acciaio austenitico e duplex sono altrettanto buone di quelle dell'acciaio al carbonio
- Seguire le linee guida per l'acciaio al carbonio

# Sezione 7

Risorse per ingegneri



# Risorse per ingegneri

- Centro di informazioni online
- Casi di studio
- Guide per la progettazione
- Esempi di progettazione
- 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](#)

# L'acciaio inossidabile nel centro informativo per la costruzione [www.stainlessconstruction.com](http://www.stainlessconstruction.com)

The image shows a screenshot of a website. The header features the text "ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION" in a light blue box. Below this 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...", a paragraph about the website's purpose, 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, high-quality photograph of a large, circular, stainless steel structure, possibly a water treatment component, with a view through it.

# 12 casi di studio strutturali

[www.steel-stainless.org/CaseStudies](http://www.steel-stainless.org/CaseStudies)

SCI Steel Knowledge

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 austitic 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 reapplying after an estimated 20-30 years.

**Figure 2: Mono tower and stay cables**

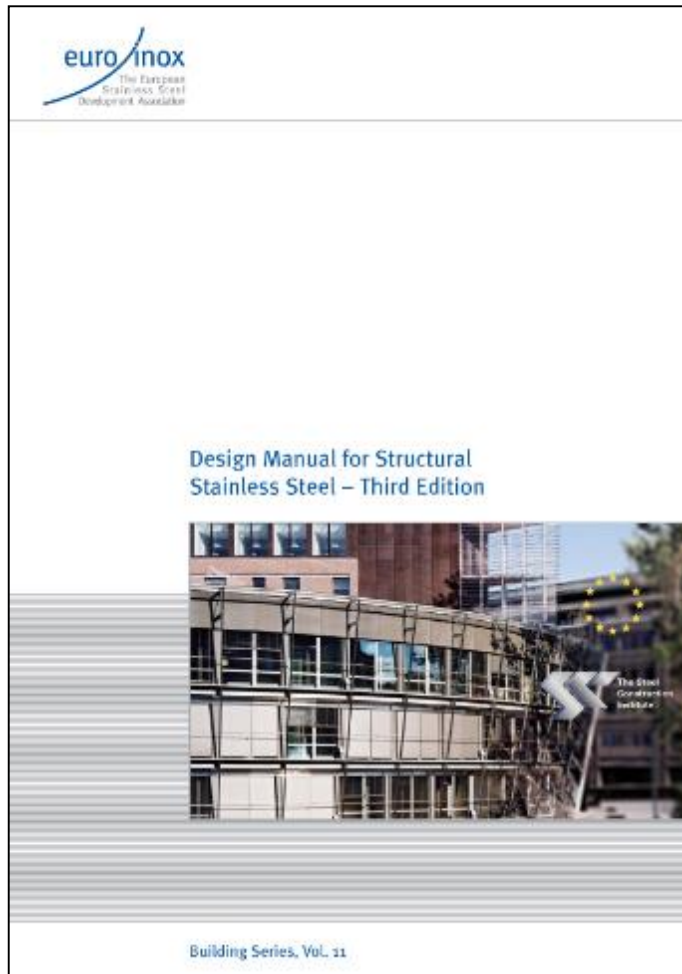
Standard non-austenitic austenitic steel grades were initially considered but discounted because of their relatively low design strength (220 N/mm<sup>2</sup>) and uncertainty regarding corrosion performance, given the roughness of the desired surface finish. Higher alloyed austenitics with better corrosion 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 (462 N/mm<sup>2</sup>) with good corrosion resistance and tolerance of surface finish.

Structural Stainless Steel Case Study 01 Page 1





# Guida di progettazione per gli Eurocodici



[www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)

- Guida
- Commento
- Esempi di progettazione

Software di progettazione online:

[www.steel-stainless.org/software](http://www.steel-stainless.org/software)

# Riassunto

- **Prestazioni strutturali:**  
simili a quelle dell'acciaio al carbonio, ma sono necessarie alcune modifiche a causa della curva sforzo-deformazione non lineare
- Sono state sviluppate regole di progettazione
- Le risorse (guide alla progettazione, casi di studio, esempi elaborati, software) sono disponibili gratuitamente!

# Riferimenti

- 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. Tesi di dottorato. 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

# Grazie

Barbara Rossi – [barbara.rossi@kuleuven.be](mailto:barbara.rossi@kuleuven.be)

Maarten Fortan – [maarten.fortan@kuleuven.be](mailto:maarten.fortan@kuleuven.be)