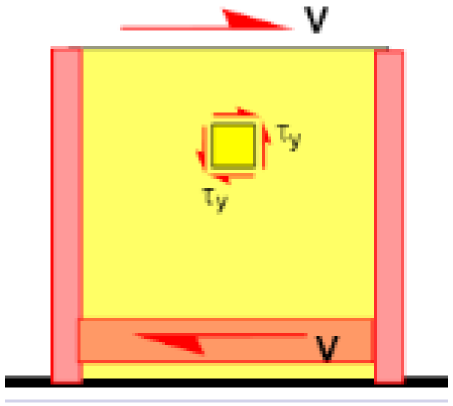
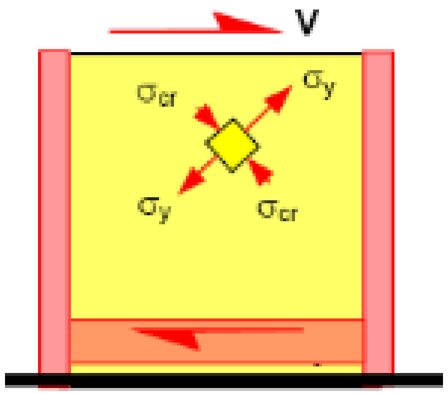
Costruzioni in Acciaio

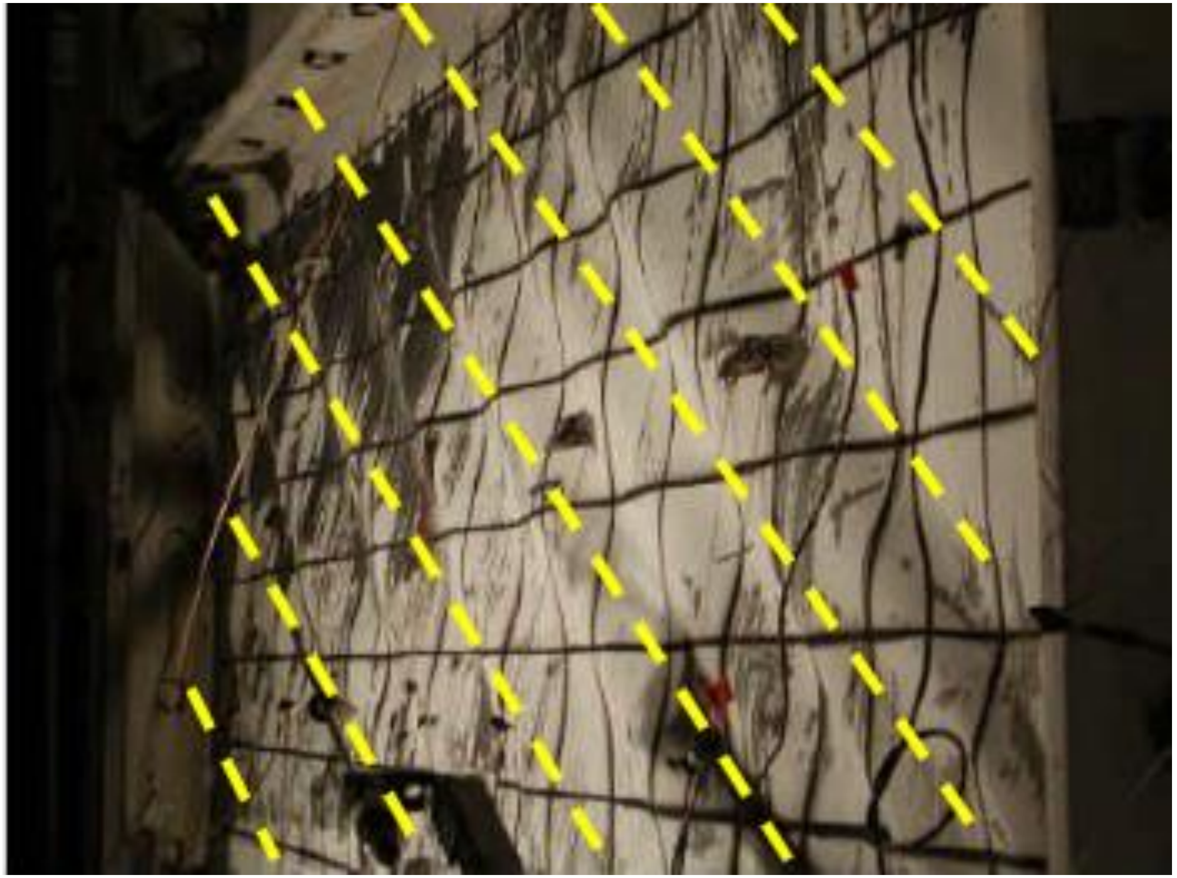
Instabilità locale vs. globale di lastre piane

Introduzione

Introduzione



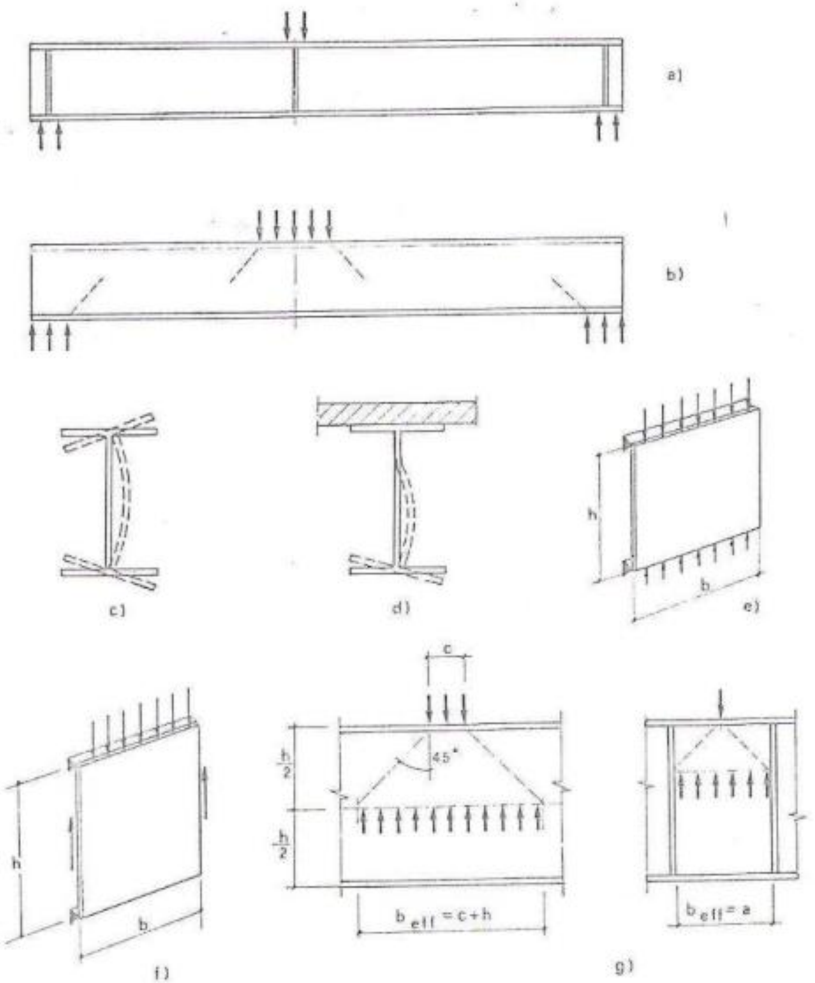




Introduzione

Effetti dei carichi concentrati

Diffusione a 45° dei carichi concentrati che vanno a caricare direttamente l'anima
→ VERIFICA DI RESISTENZA +
VERIFICA ALL'IMBOZZAMENTO



Introduzione

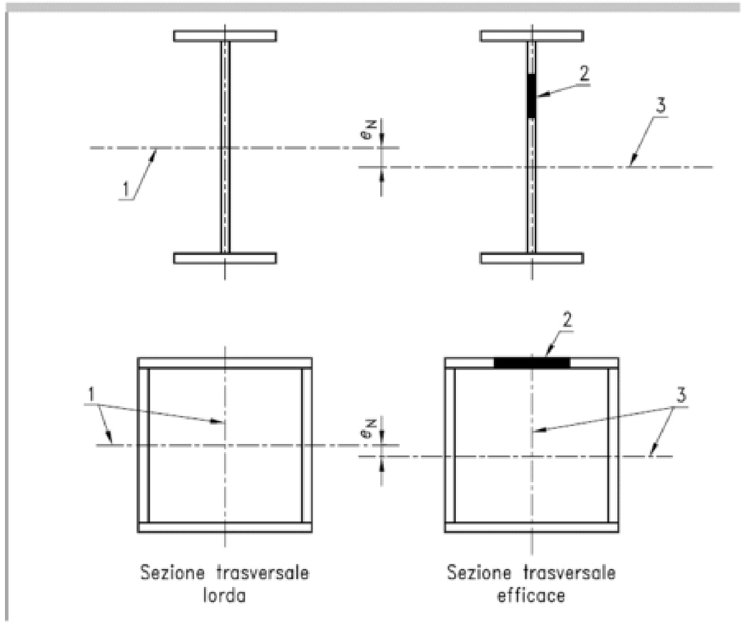
4.2.4.1.3.4 Stabilità dei pannelli

Gli elementi strutturali in parete sottile (di classe 4) presentano problemi complessi d'instabilità locale, per la cui trattazione si deve fare riferimento a normative di comprovata validità.

Riferimento UNI En1993-1-5

figura 2.2 **Sezioni trasversali di classe 4 - momento flettente**

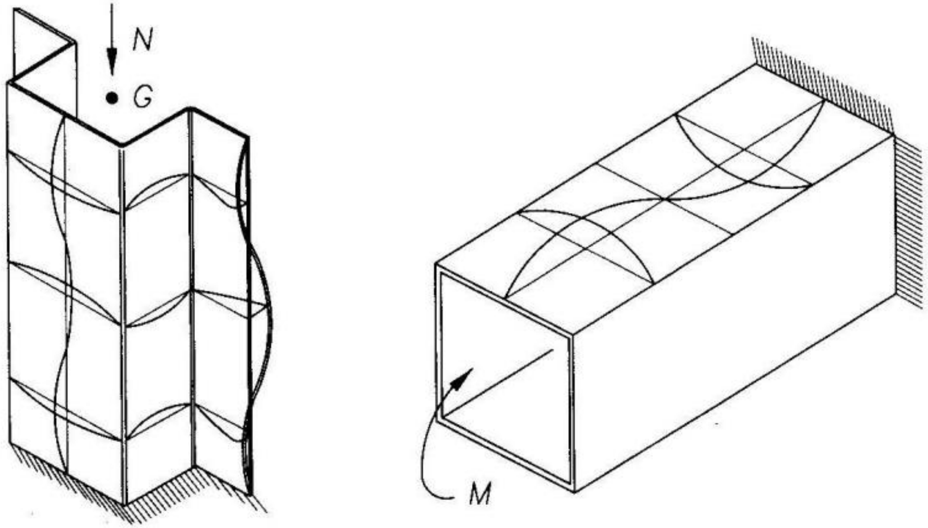
Legenda
1 Asse baricentrico
2 Zona non efficace
3 Asse baricentrico della sezione efficace

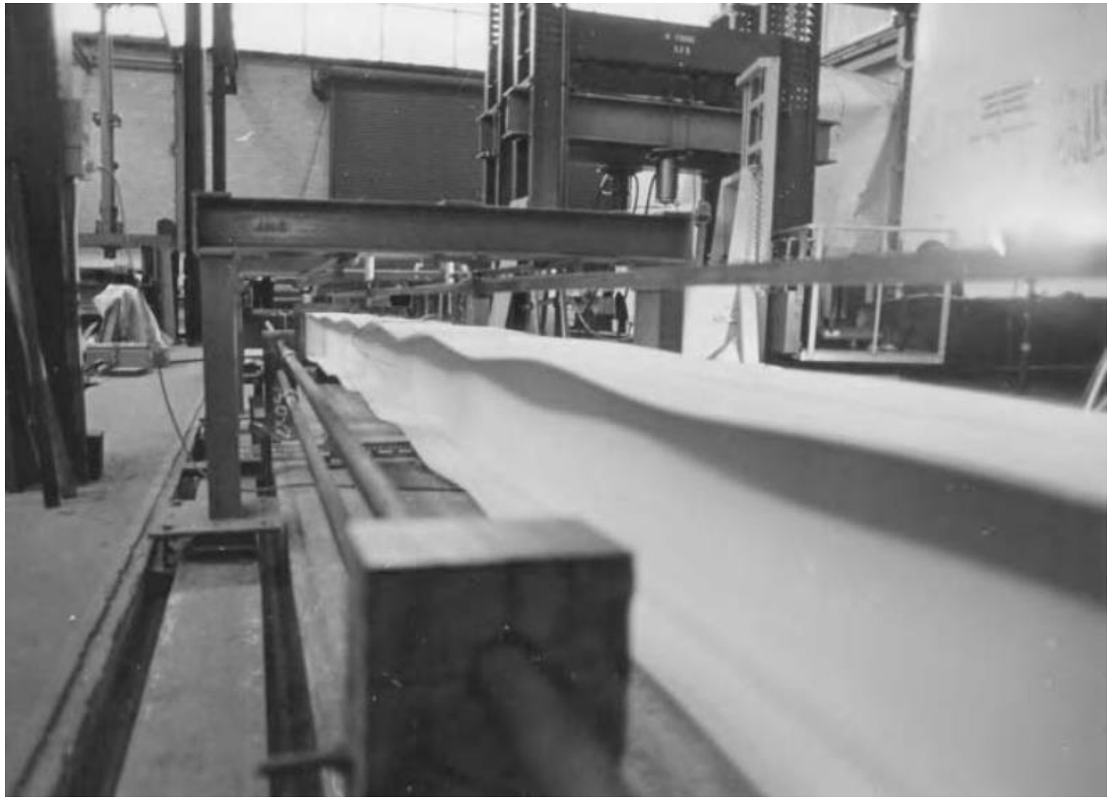


Il modulo W_{eff} viene calcolato escludendo le zone non efficaci per instabilità locale

Introduzione

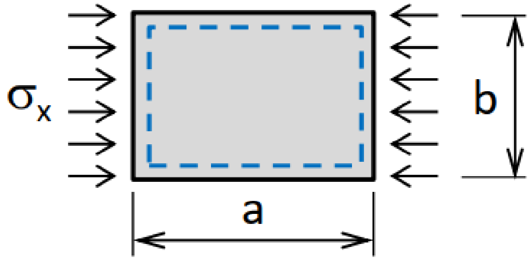
Le parti interessate sono quelle compresse della sezione trasversale dell'elemento





Il problema

Sia data una lastra appoggiata sui bordi e sollecitata da una tensione σ_x costante sui due lati opposti



La deformata della lastra soggetta ad instabilità è legata al carico tramite la relazione :

$$bD\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\,\partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) = -N\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

dove :

N carico applicato nel piano secondo asse x

w spostamento fuori piano

D rigidezza flessionale della lastra $= \dfrac{E\,t^3}{12(1-\nu^2)}$

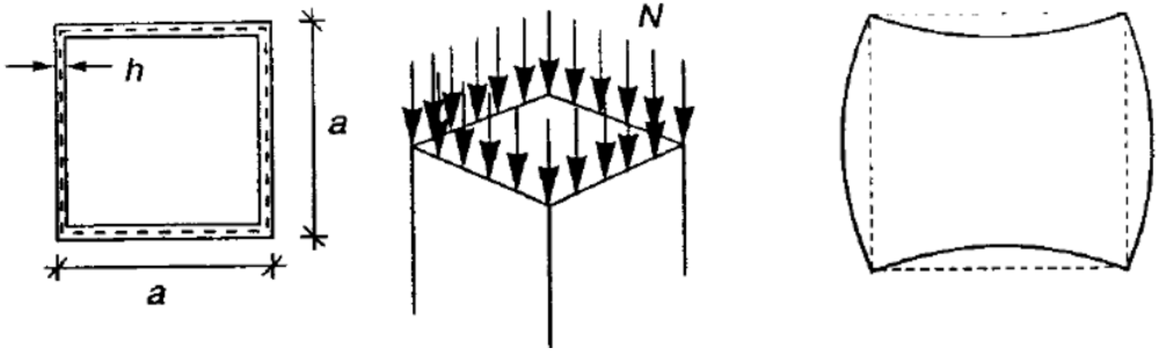
t spessore della lastra

Il problema

- Le pareti di profili chiusi o aperti sono lastre molto allungate e caratterizzate da uno spessore ridotto

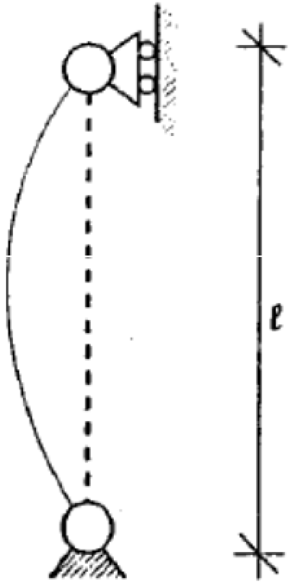
- Quando sottili, queste lastre possono instabilizzarsi dando luogo a imbozzamenti che possono interessare zone più o meno estese

- Si tratta di un’instabilità locale che può precedere l’instabilità globale di elemento, ma anche il raggiungimento del limite elastico del materiale



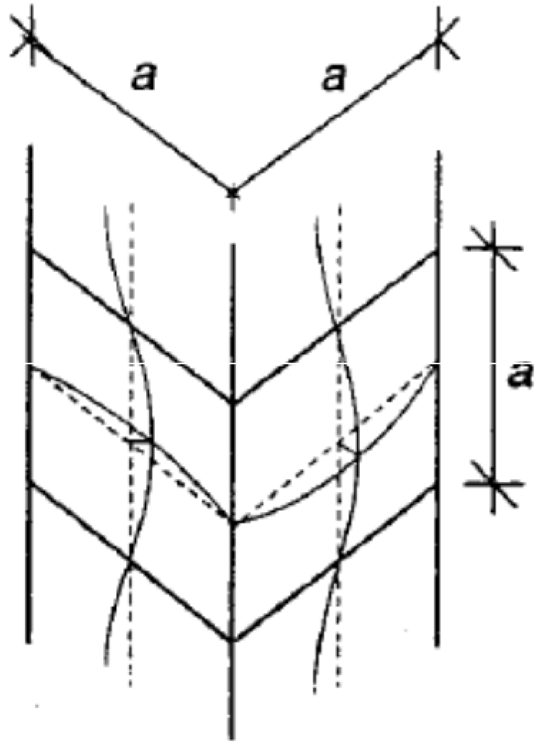
Tipi di instabilità

Globale

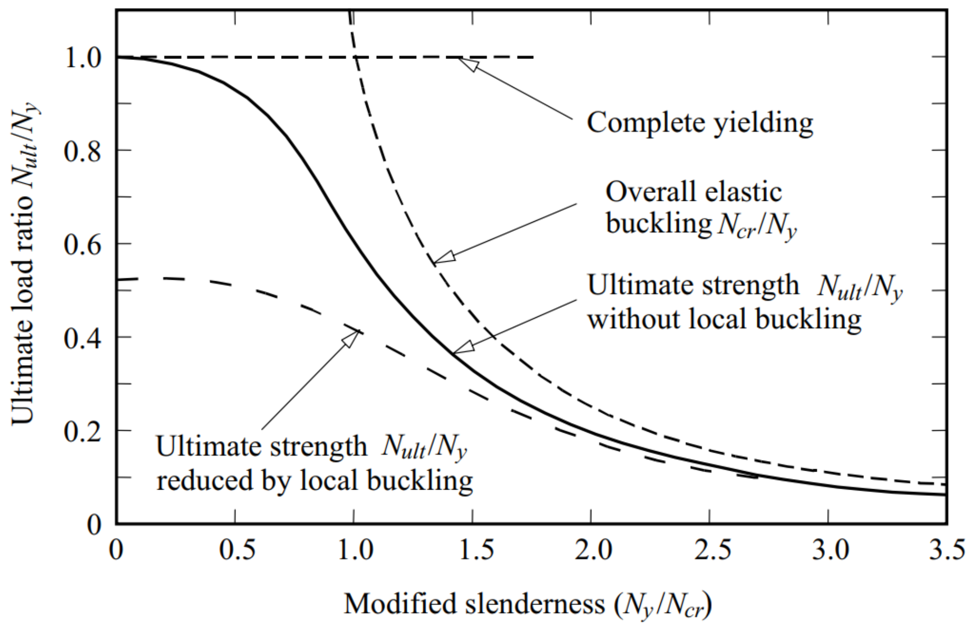


$$\sigma_E^G = \frac{P_E}{A} = \frac{1}{6}\pi^2 E\left(\frac{a}{\ell}\right)^2$$

Locale



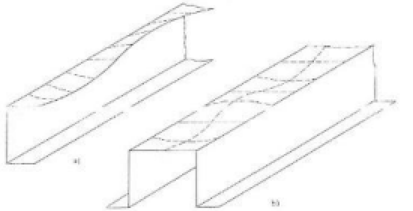
$$\sigma_E^L = \frac{N_E}{h} = \frac{1}{3}\pi^2 \frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{h}{a}\right)^2$$



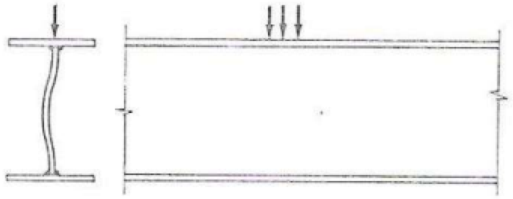
Effects of local buckling on the resistances of compression members.

Il problema – Imbozzamento

Nelle parti di sezioni soggette a compressione si possono avere fenomeni di instabilizzazione locale



Instabilizzazione dell'anima caricata direttamente



ELEMENTO INFLESSO

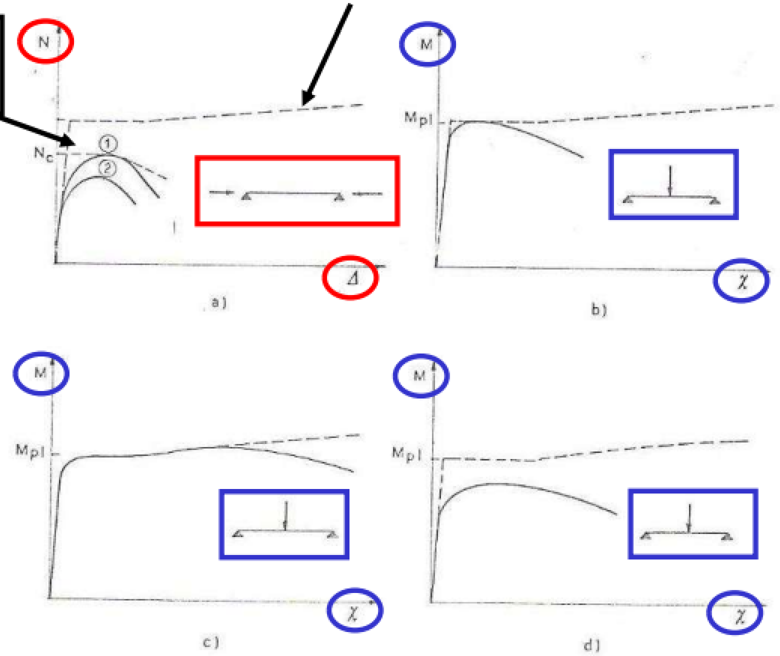
b) Riduzione della duttilità tale da non consentire la ridistribuzione delle sollecitazioni
c) Influenza trascurabile
d) La stabilità locale condiziona la portanza dell'elemento

L'instabilizzazione locale condiziona secondo diverse modalità il comportamento dell'elemento strutturale

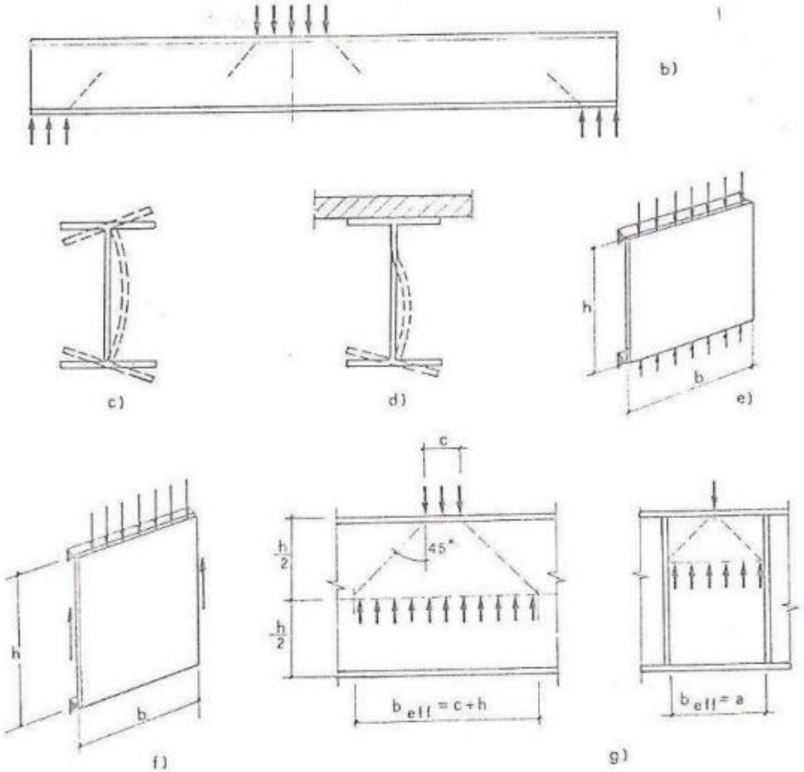
a) ELEMENTO COMPRESSO
1) Comportamento post-critico
2) Carico ultimo

Aste tozze

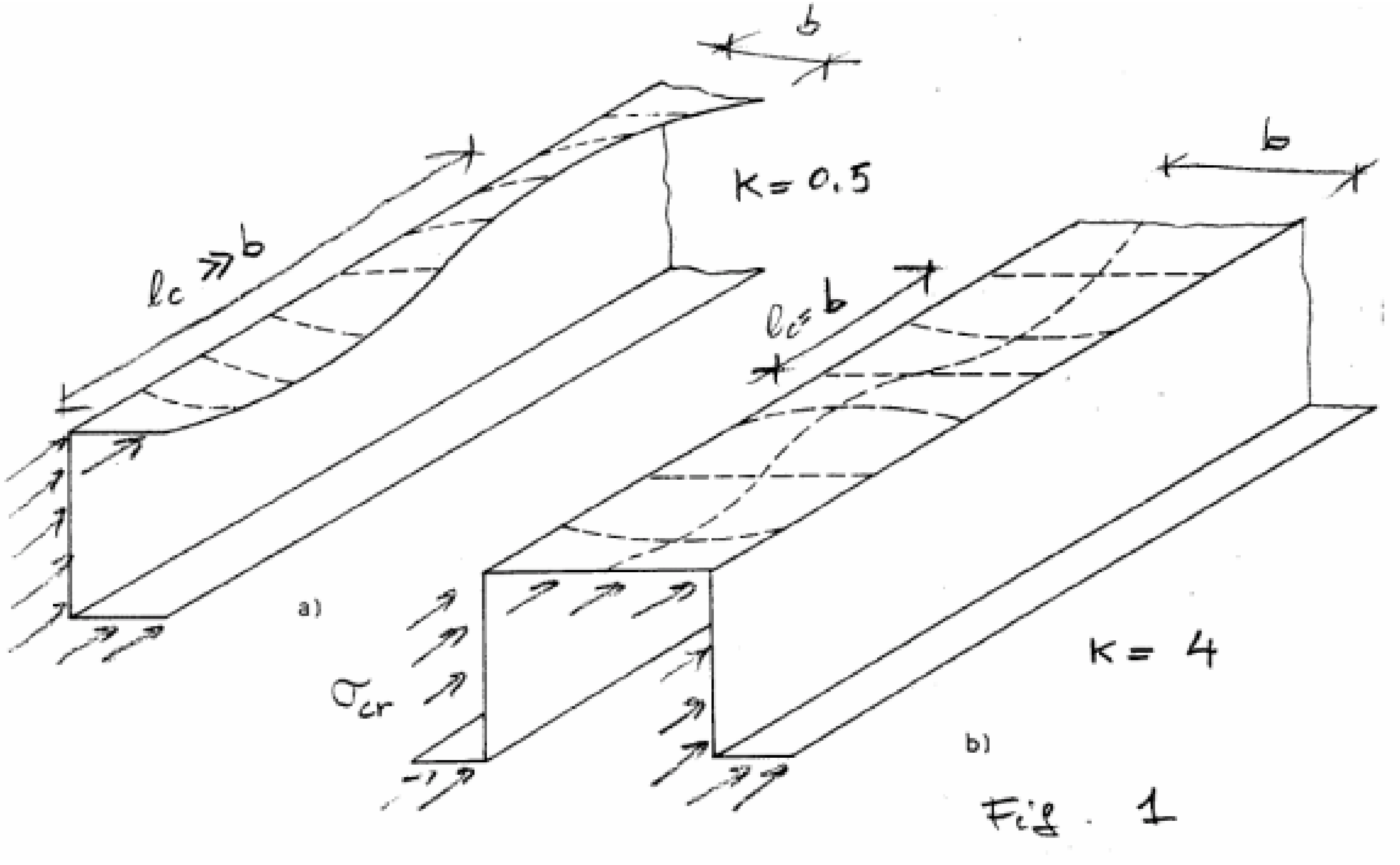
Senza effetti locali



Diffusione a 45° dei carichi concentrati che vanno a caricare direttamente l'anima
→ VERIFICA DI RESISTENZA +
VERIFICA ALL'IMBOZZAMENTO



Il problema – Imbozzamento



Lastra appoggiata sui bordi

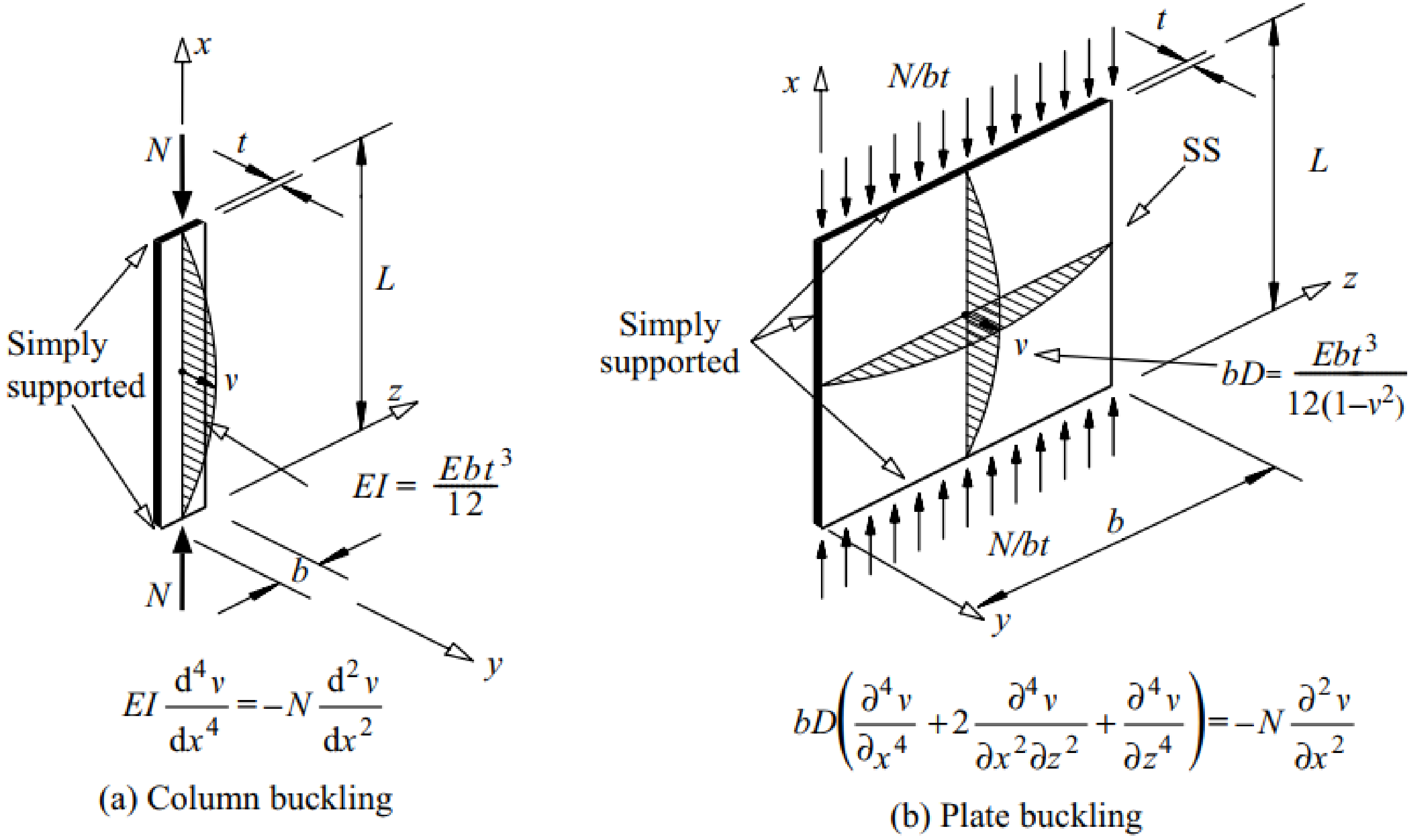
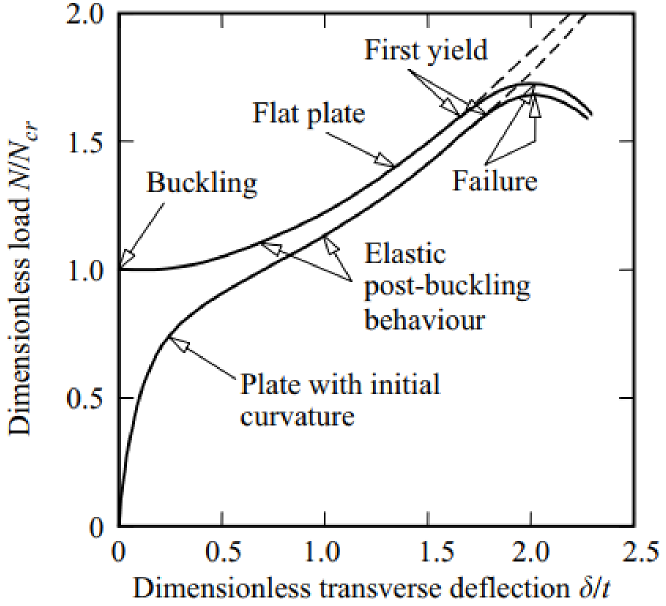


Figure 4.5 Comparison of column and plate buckling.



Post-buckling behaviour of thin plates.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{k_\sigma}{(b/t)^2}$$

$$\sigma_{cr} = N_{cr}/bt$$

$$k_\sigma = 4.$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{k_\sigma}{(b/t)^2}$$

Lastra appoggiata sui bordi

- Per interpretare qualitativamente il fenomeno pensiamo la lastra discretizzata in un graticcio di aste, dove le aste verticali, caricate di punta, sono vincolate da quelle orizzontali

- Questo contributo spiega il termine $1/(1-\nu)^2$ che tiene conto del **comportamento a lastra** (dilatazioni trasversali impedite) ed il valore maggiore del coefficiente k (k=1 per l'asta di Eulero, k=4 per il pannello di fig. 2)

- Il contributo delle fibre trasversali, che ostacolano il progredire dell'imbozzamento una volta raggiunto il carico critico, spiega la **resistenza post-critica del sistema**, con carichi di collasso che, a seconda delle condizioni di vincolo, possono essere anche molto maggiori del carico critico

- Nelle costruzioni civili si tende a cautelarsi dal fenomeno dell'imbozzamento; in altri casi, come nelle strutture in cui è fondamentale la leggerezza (es. strutture aeronautiche), si ammette che l'imbozzamento avvenga sotto i carichi di esercizio

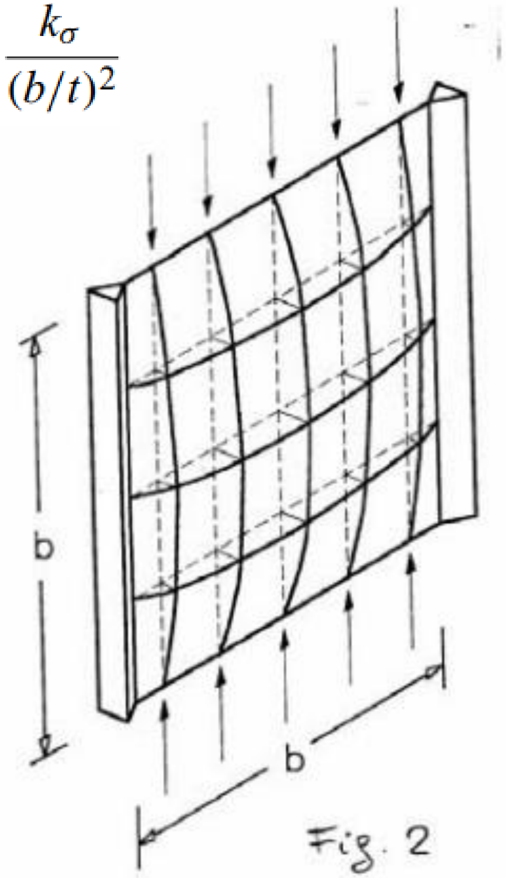


Fig. 2

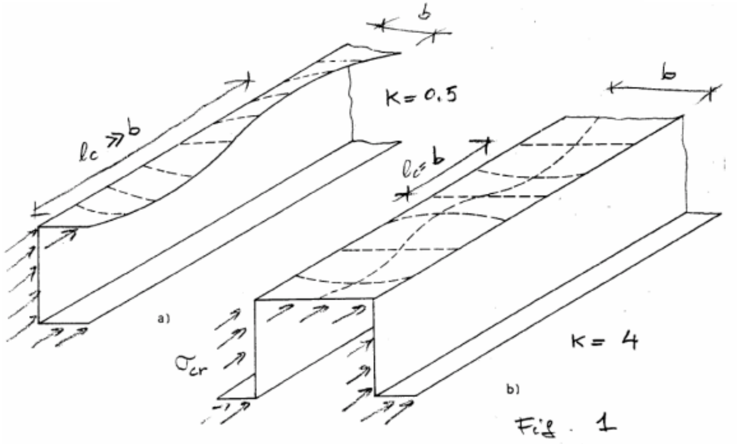
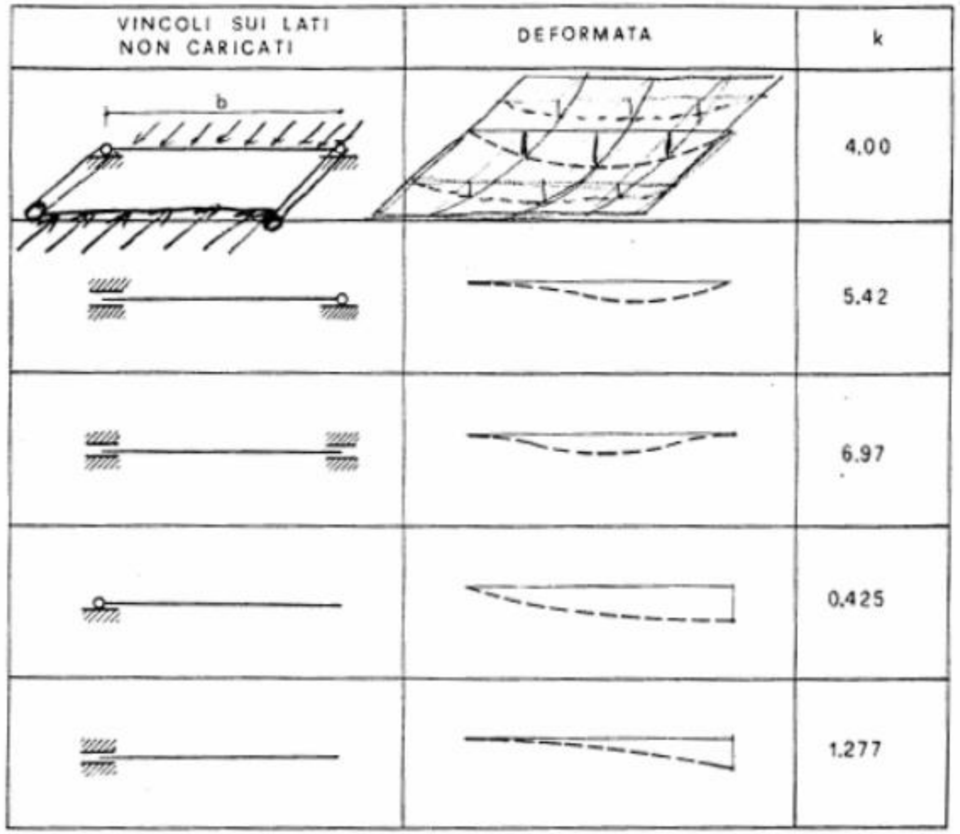


Fig. 1

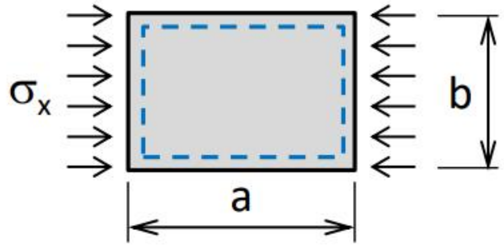
Il problema – Imbozzamento

In fig. 3 sono riportati i valori di k per lastre di lunghezza indefinita, soggette a σ uniformi di compressione, per varie condizioni di vincolo lungo i bordi.



Carico critico elastico

Sia data una lastra appoggiata sui bordi e sollecitata da una tensione σ_x costante sui due lati opposti



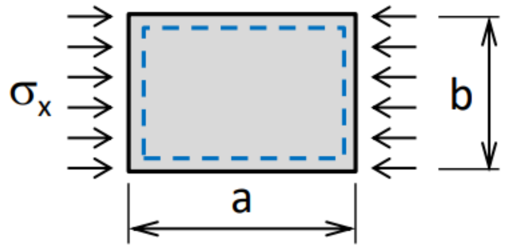
La deformata della lastra soggetta ad instabilità è legata al carico tramite la relazione :

$$bD\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\,\partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) = -N\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$

dove :

N	carico applicato nel piano secondo asse x
w	spostamento fuori piano
D	rigidezza flessionale della lastra $= \dfrac{E\,t^3}{12(1-\nu^2)}$
t	spessore della lastra

Carico critico elastico



La deformata della lastra soggetta ad instabilità è espressa tramite la doppia serie di Fourier :

$$w(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin\frac{m\,\pi\,x}{a} \sin\frac{n\,\pi\,y}{b}$$

dove :

w	spostamento fuori piano
m, n	numero di semionde sinusoidali nelle direzioni longitudinali e trasversali
A_{mn}	coefficienti incogniti rappresentanti spostamenti generalizzati

La tensione critica della lastra è :

$$\sigma_{cr} = \frac{D\,\pi^2}{t\,b^2}\left[m\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{n^2}{m}\left(\frac{a}{b}\right)\right]^2$$

Il valore minimo del carico critico della lastra si ha per n=1,

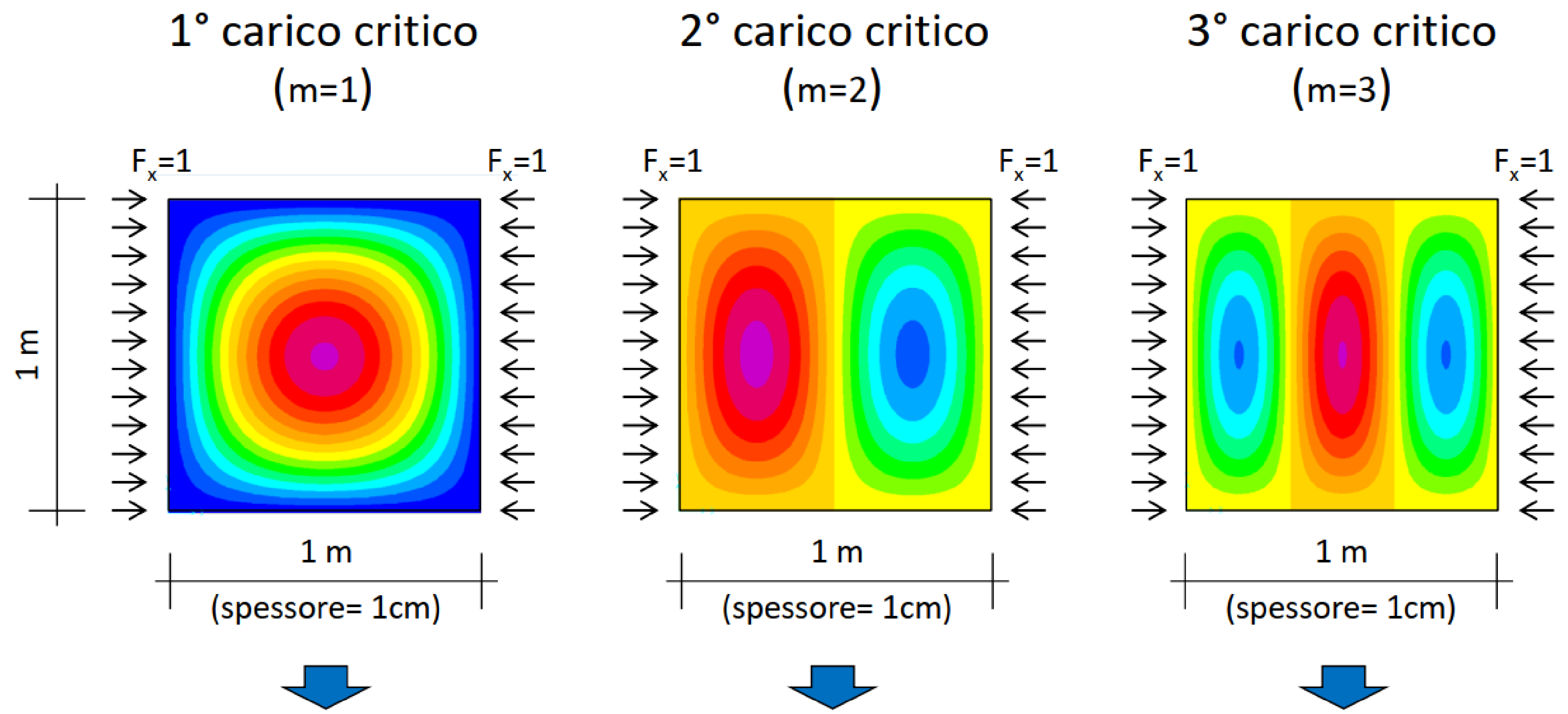
ovvero quando trasversalmente si ha una sola semionda sinusoidale :

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2}$$

$$k_\sigma = \left[m\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{m}\left(\frac{a}{b}\right)\right]^2$$

$$D = \frac{E\,t^3}{12(1-\nu^2)}$$

Carico critico elastico



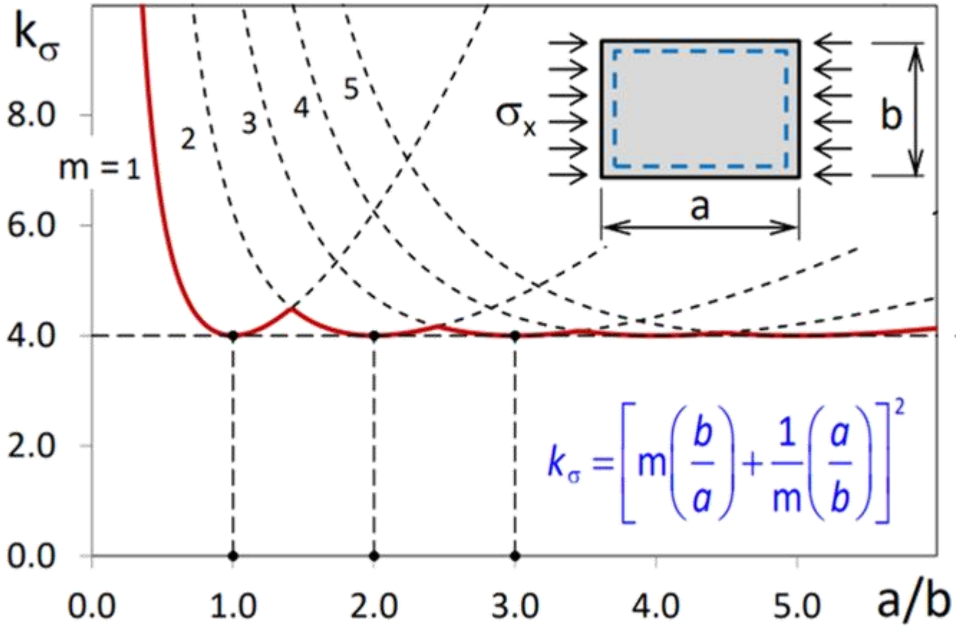
$\alpha_{cr,1}=723.12$ (E=200000 MPa)

$\alpha_{cr,2}=1130.05$ (E=200000 MPa)

$\alpha_{cr,3}=2009.74$ (E=200000 MPa)

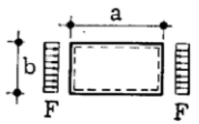
Carico critico elastico

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2}$$



$k_{\sigma,min} = 4$

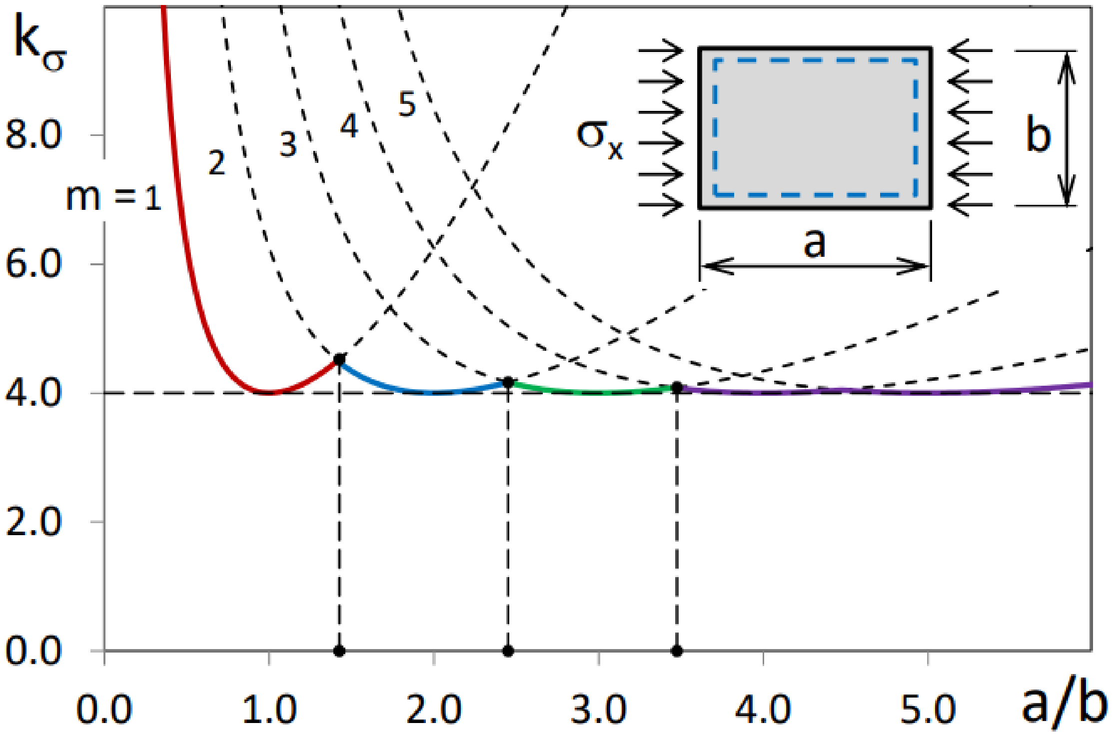
CARICO NELLA DIREZIONE DEI LATI LUNGHI *a*
(da *Timoshenko*)



a/b	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
k	27,0	13,2	8,41	6,25	5,14	4,53	4,20
a/b	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,41
k	4,04	4,00	4,04	4,13	4,28	4,47	4,49

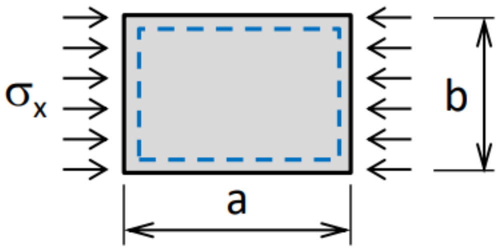
Il valore piu` basso del carico critico si ottiene per un rapporto d`aspetto pari ad un numero intero.

Carico critico elastico



La dimensione delle semionde è comparabile
con la dimensione trasversale della sezione

Carico critico elastico



Rapporto minimo larghezza/spessore

La tensione critica coincide con la tensione di snervamento se :

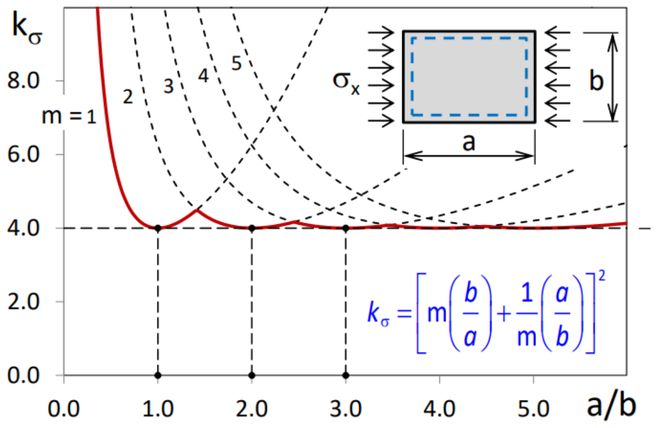
$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12\left(1-\nu^2\right)\left(b/t\right)^2} = f_y$$

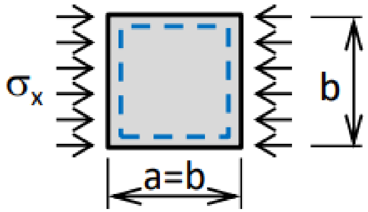
ovvero se :

$$k_\sigma \frac{\pi^2 210000}{12\left(1-0.3^2\right)\left(b/t\right)^2} = f_y \frac{235}{235} \qquad \ldots\ldots \qquad \frac{b}{t} = \sqrt{807.7\, k_\sigma} \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

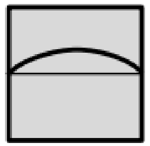
Se k_σ=4 $\quad \dfrac{b}{t} = 56.8 \cdot \sqrt{\dfrac{235}{f_y}}$

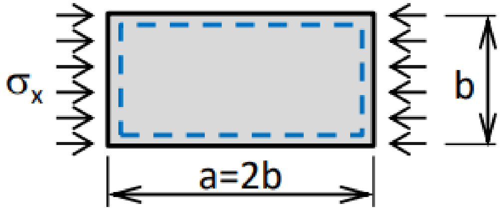
Carico critico elastico



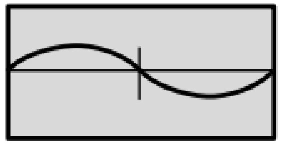


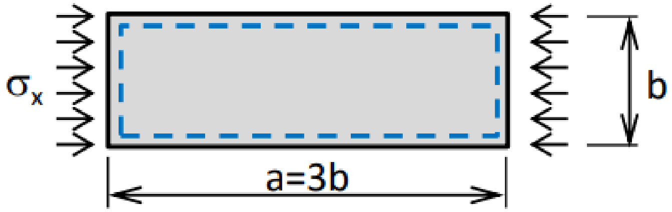
$k_\sigma = k_{\sigma,min}$



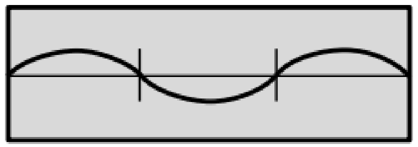


$k_\sigma = k_{\sigma,min}$



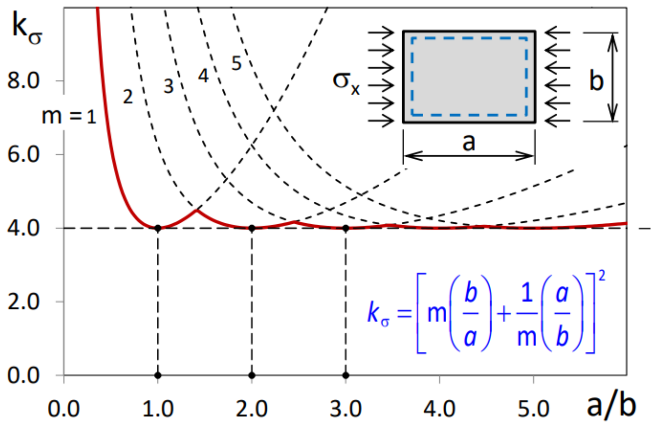


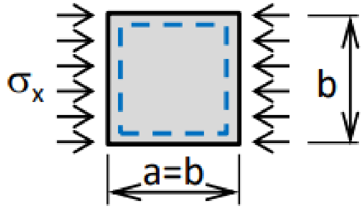
$k_\sigma = k_{\sigma,min}$



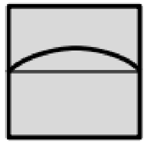
Le lastre, pur se caratterizzate da un rapporto d'aspetto pari ad un diverso numero intero, hanno lo stesso carico critico

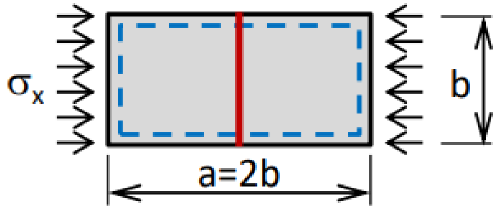
Carico critico elastico



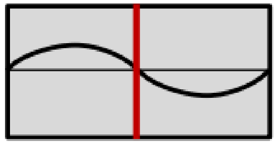


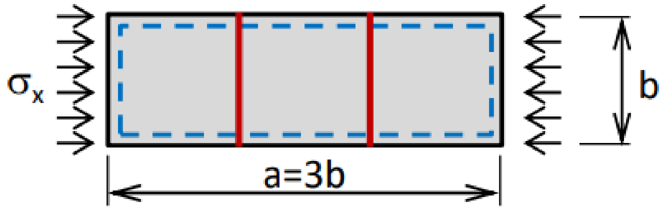
$k_\sigma = k_{\sigma,min}$



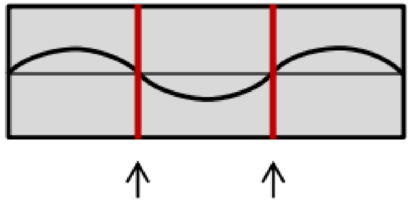


$k_\sigma = k_{\sigma,min}$





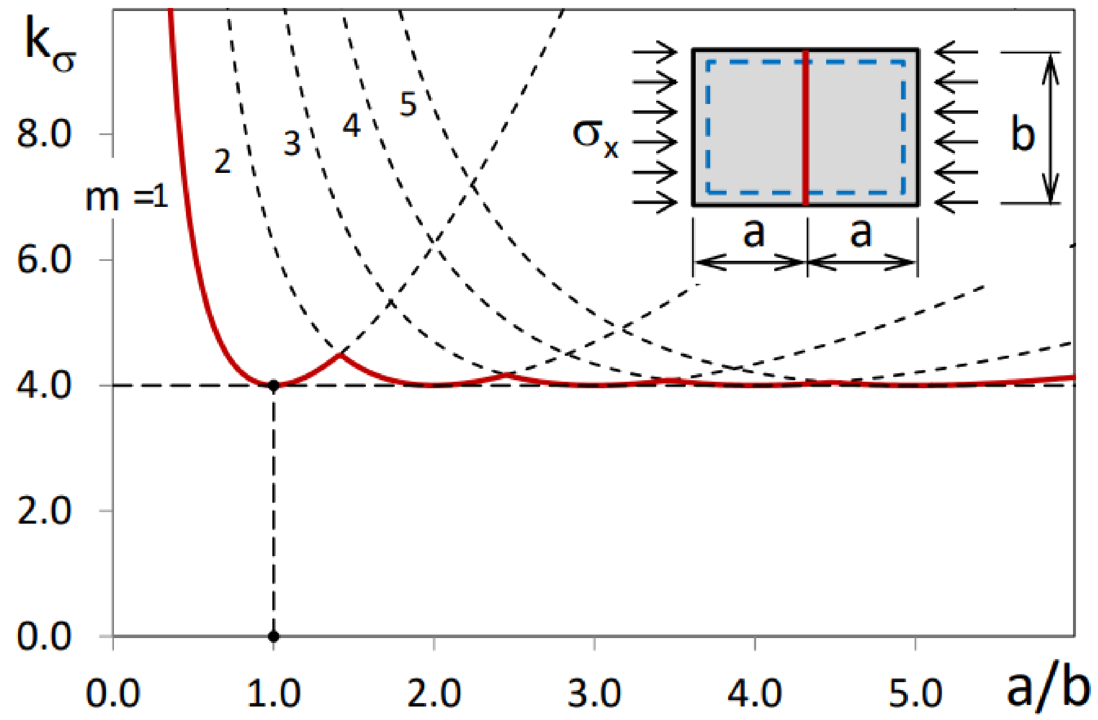
$k_\sigma = k_{\sigma,min}$



irrigidimenti trasversali

In lastre con rapporto d'aspetto pari ad un numero intero, l'uso di irrigidimenti trasversali con spaziatura equale alla larghezza della lastra non muta il valore del carico critico

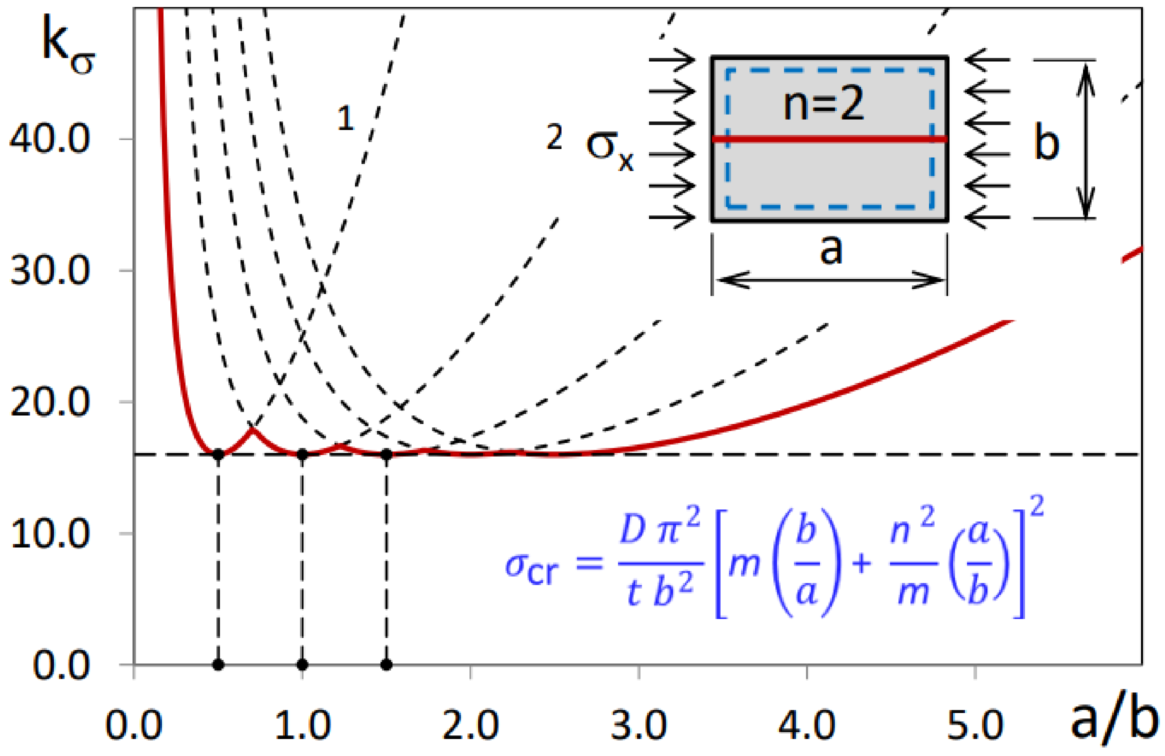
Carico critico elastico



Gli irrigidimenti trasversali (**se sufficientemente rigidi e resistenti**)
sono efficaci solo se la loro spaziatura
è minore della larghezza della lastra

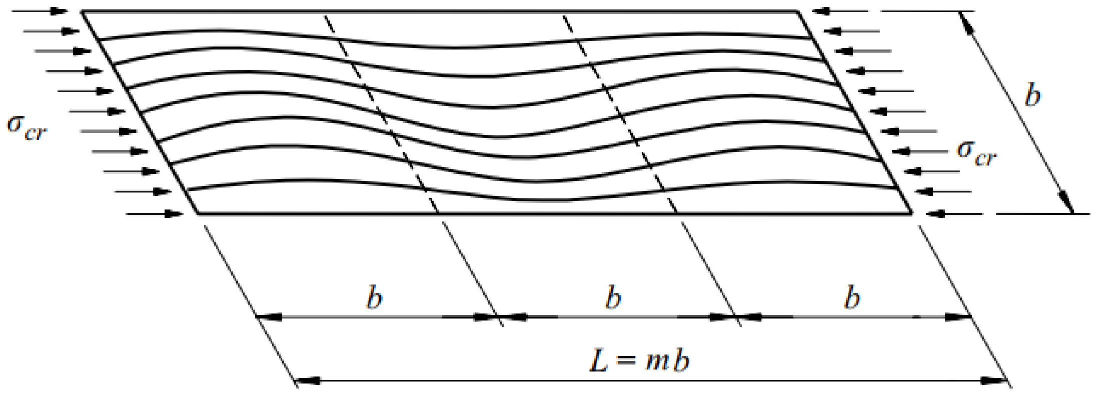
Carico critico elastico

Gli irrigidimenti longitudinali (**se rigidi e resistenti**) possono rappresentare una più economica alternativa, perché costringono il pannello ad instabilizzarsi con più semionde lungo la dimensione traversale

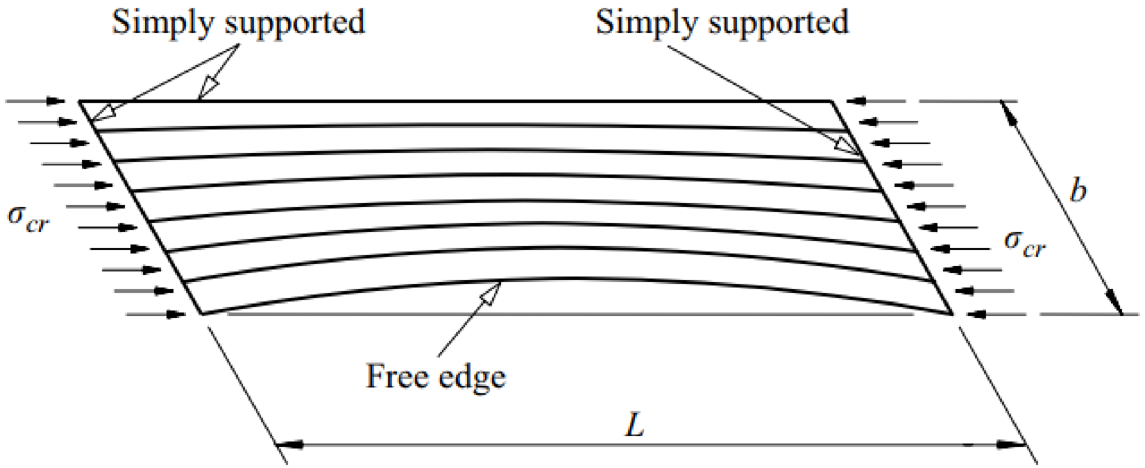


Gli irrigidimenti longitudinali hanno anche il vantaggio di contribuire all'aumento dell'area della sezione resistente

Altri casi – Appoggio su 3 bordi



Buckled pattern of a long simply supported plate in compression.

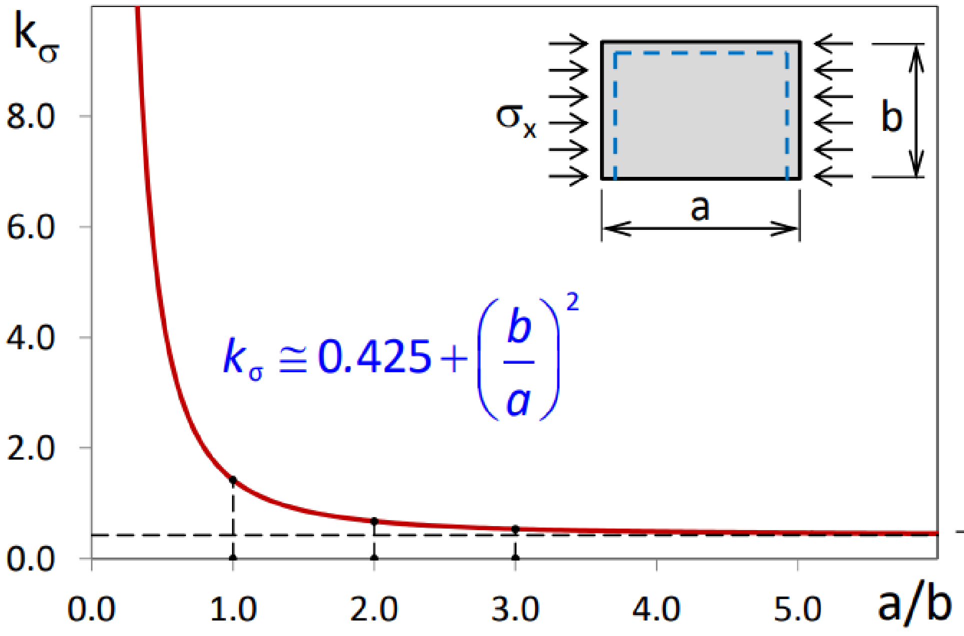


Buckled pattern of a plate free along one edge.

$$\sigma_{\text{cr}} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2}$$

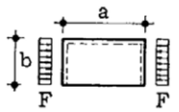
Altri casi – Appoggio su 3 bordi

$$\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{235}} = 18.5$$



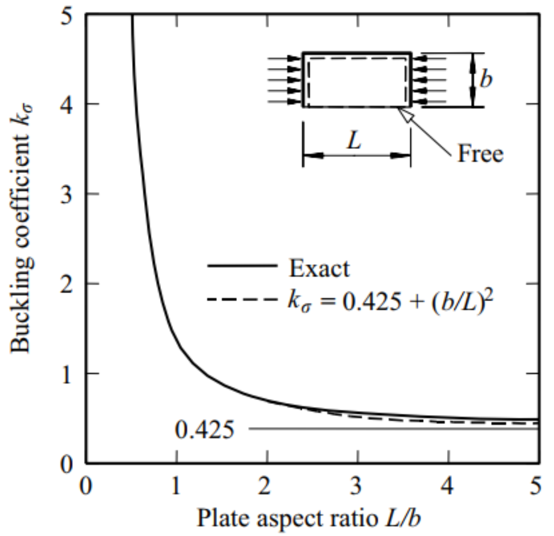
$k_{\sigma,min} \cong 0.425$

LATI LUNGHI *b* APPOGGIATI; LATI LUNGHI *a* LIBERO E APPOGGIATO.
CARICO NELLA DIREZIONE DEI LATI LUNGHI *a*
(da *Timoshenko*)



$\frac{a}{b}$	0,5	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
k	4,400	1,440	1,135	0,952	0,835	0,755

$\frac{a}{b}$	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
k	0,698	0,610	0,564	0,516	0,506

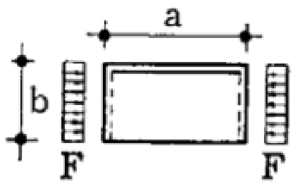


La modifica dei vincoli cambia la dipendenza del fattore di stabilità dal rapporto d'aspetto della lastra

Altri casi

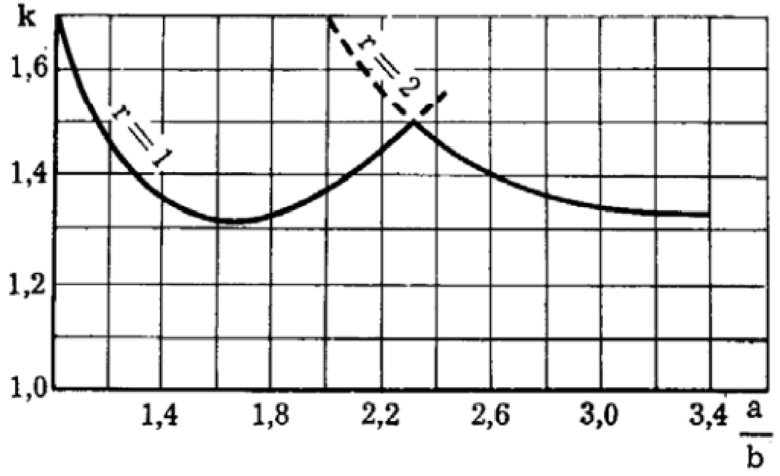
LATI LUNGHI *b* APPOGGIATI; LATI LUNGHI *a* INCASTRATO E LIBERO.
CARICO NELLA DIREZIONE DEI LATI LUNGHI *a*

(da *Timoshenko*)



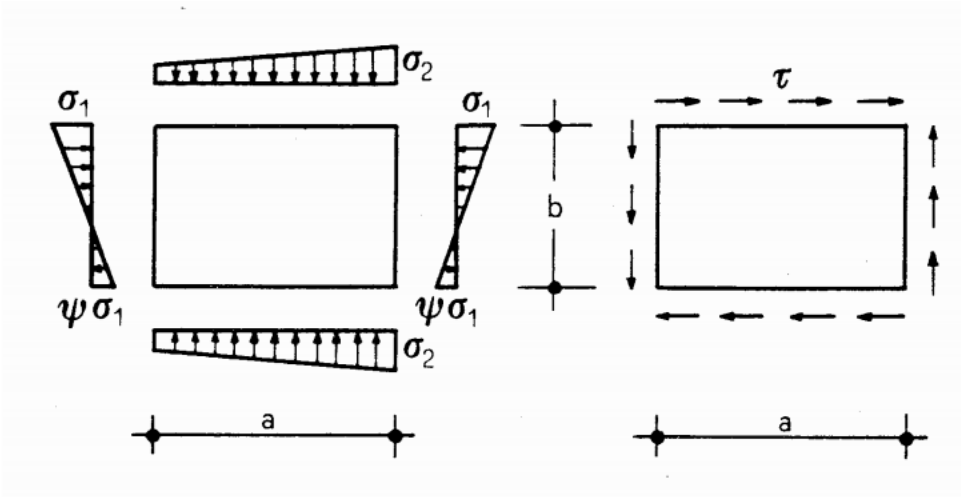
$\frac{a}{b}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
k	1,70	1,56	1,47	1,41	1,36	1,34	1,33

$\frac{a}{b}$	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4
k	1,33	1,34	1,36	1,38	1,45	1,47

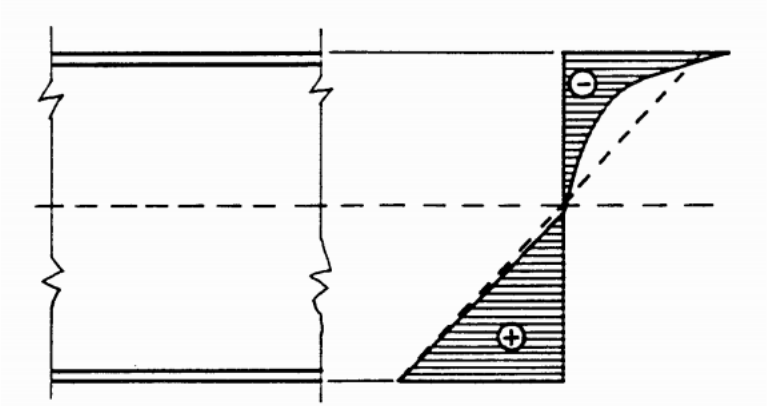


Lastre inflesse

Pannello d’anima con sollecitazione composta di flessione e taglio

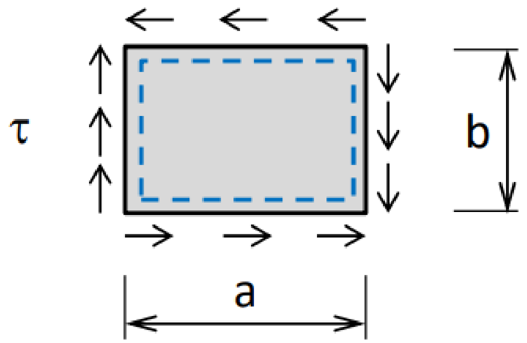


La fase post-critica è più pronunciata di quella delle piattabande compresse.



Tensioni tangenziali

Sia data una lastra appoggiata sui bordi e sollecitata da tensioni tangenziali τ costanti sui lati

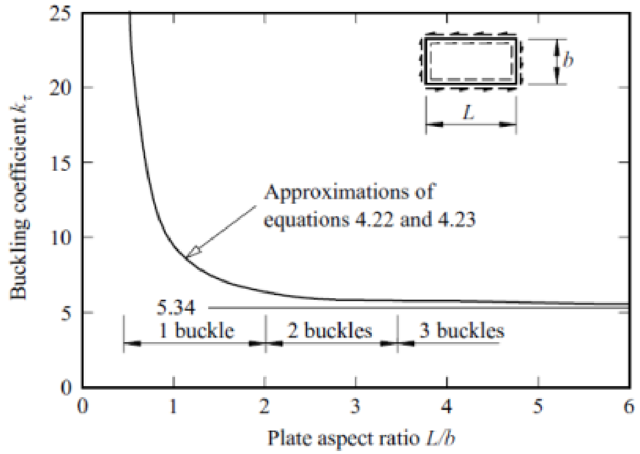


$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\,\partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) = -\frac{2\tau_{cr} t}{D}\frac{\partial^2 w}{\partial x\,\partial y}$$

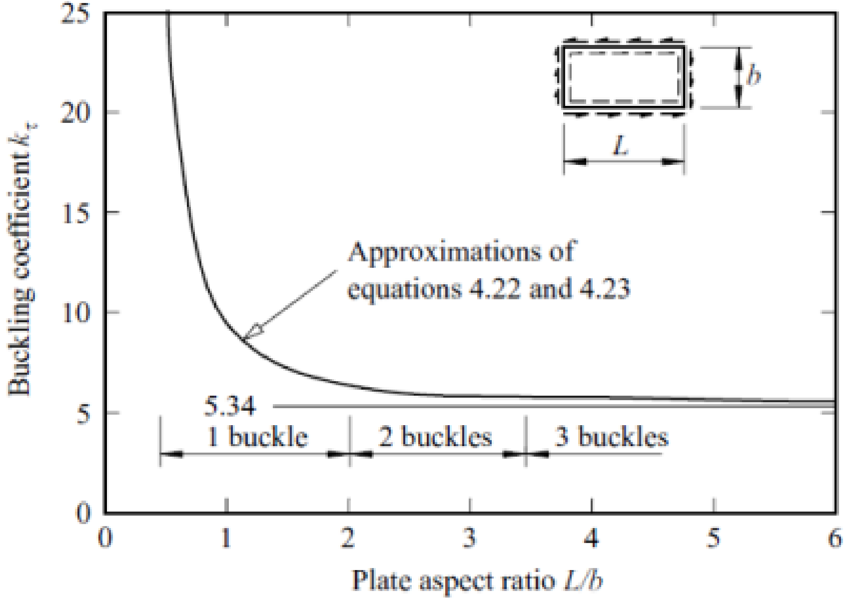
La tensione tangenziale critica della lastra è

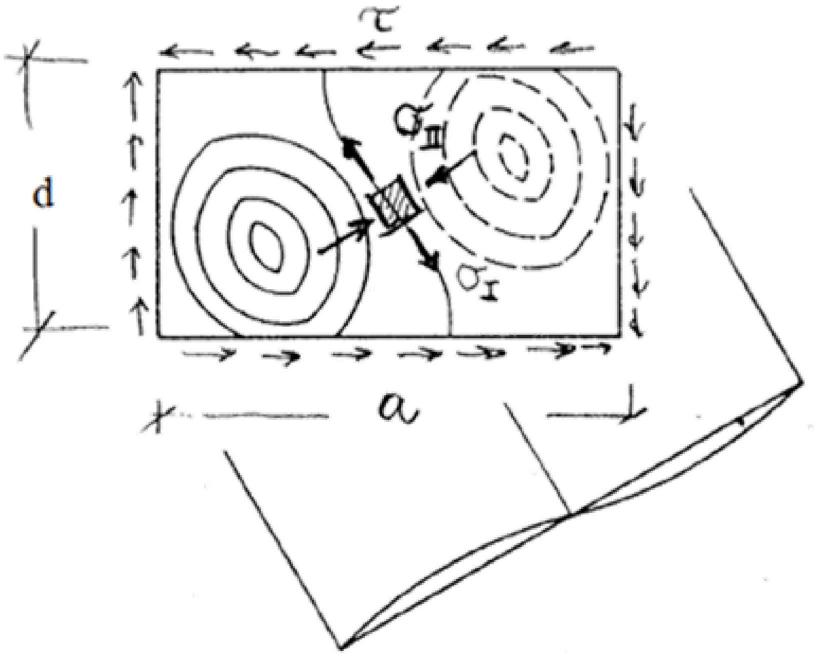
$$\tau_{cr} = k_\tau\,\sigma_e$$

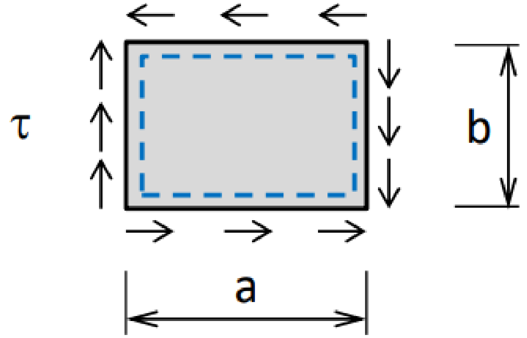
dove $\sigma_e = \dfrac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2}$



Tensioni tangenziali

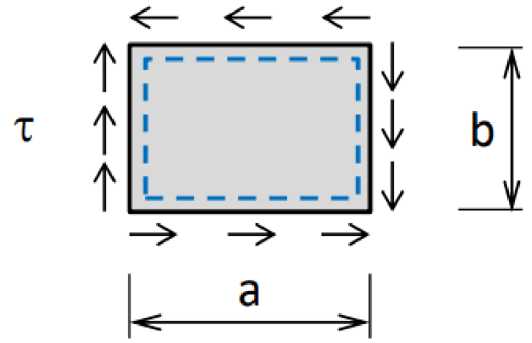






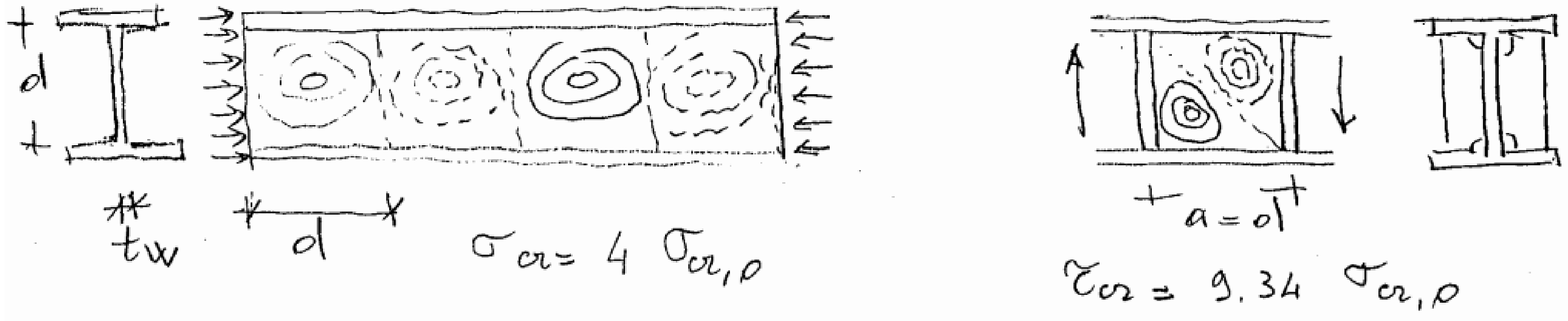
α=a/b	$\alpha \geq 1$	$\alpha < 1$
k_τ	$5.34 + 4.0/\alpha^2$	$4.0 + 5.34/\alpha^2$

Tensioni tangenziali



Per $\alpha = 1$ (pannello quadrato) $k_\tau = 9.34$

Si noti che nel caso di anima compressa non irrigidita le bozze si susseguono con passo a=d, cioè come se fossero presenti irrigidimenti trasversali con passo d, e il coefficiente di imbozzamento k_σ=4. La τ_{cr} è quindi molto più grande della σ_{cr} (k_τ=9.34).



Carico critico elastico secondo EC3

L'Eurocodice 3 (parte 1-5) fornisce i fattori di stabilità
per alcune distribuzioni di tensioni normali e tangenziali
su pannelli rettangolari interni o esterni, irrigiditi o non irrigiditi.

Il fattore di stabilità dipende da :

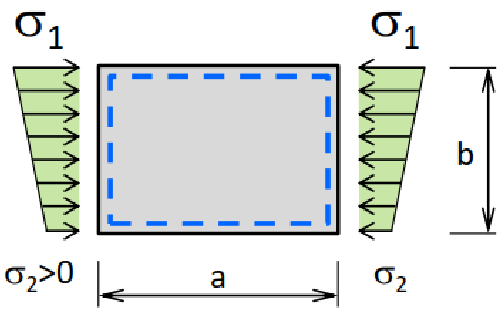
- Condizioni di vincolo
- Tipo di tensioni (normali o tangenziali)
- Condizioni di carico
  (compressione uniforme, flessione o presso flessione)

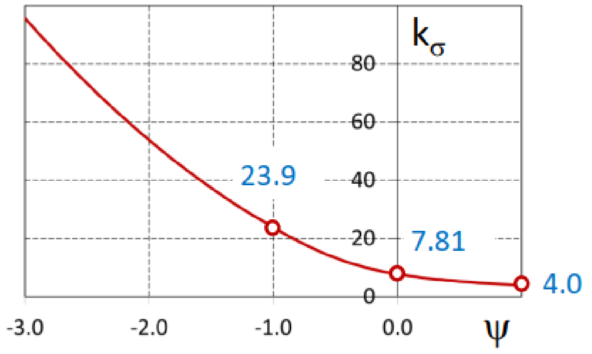
Carico critico elastico secondo EC3

Fattore di stabilità di pannelli interni non irrigiditi

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2}$$

Tensioni normali



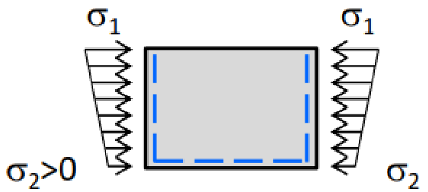


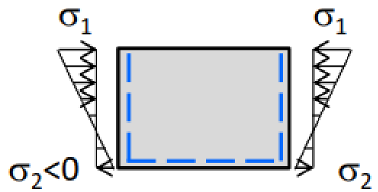
$\psi=\sigma_2/\sigma_1$	$1<\psi\leq 0$	$0<\psi\leq -1$	$-1<\psi\leq -3$
k_σ	$8.2/(1.05+\psi)$	$7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2$	$5.98(1-\psi)^2$

Carico critico elastico secondo EC3

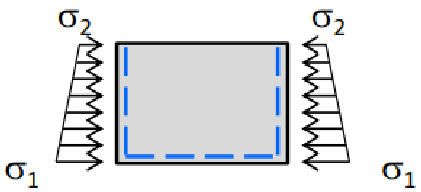
Fattore di stabilità di pannelli esterni non irrigiditi

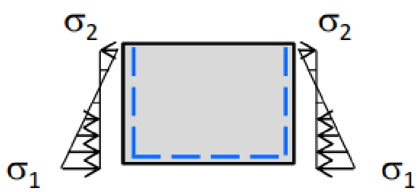
Tensioni normali





$\psi=\sigma_2/\sigma_1$	1	0	$1>\psi\geq-3$
k_σ	0.43	0.57	$0.57-0.21\,\psi+0.07\psi^2$

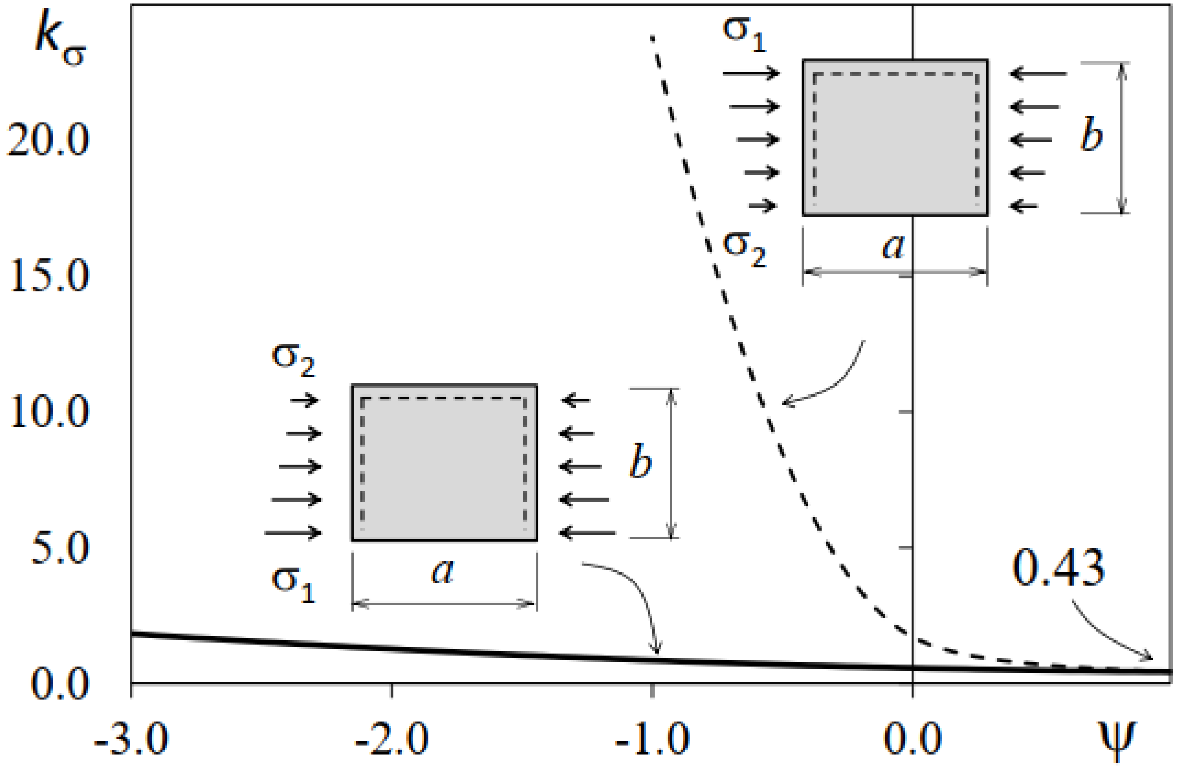


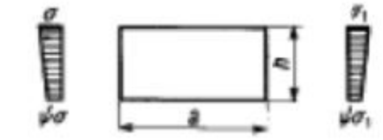
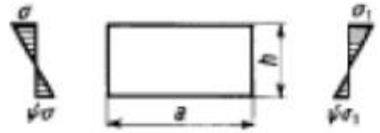
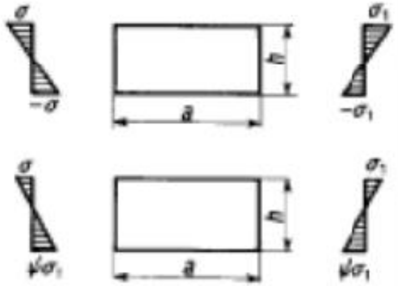
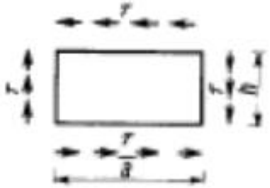


$\psi=\sigma_2/\sigma_1$	1	$1>\psi\geq0$	$0>\psi\geq-1$
k_σ	0.43	$0.578/(0.34+\psi)$	$0.57-0.21\,\psi+0.07\psi^2$

Carico critico elastico secondo EC3

Fattore di stabilità di normativa per pannelli esterni non irrigiditi soggetti a tensioni normali



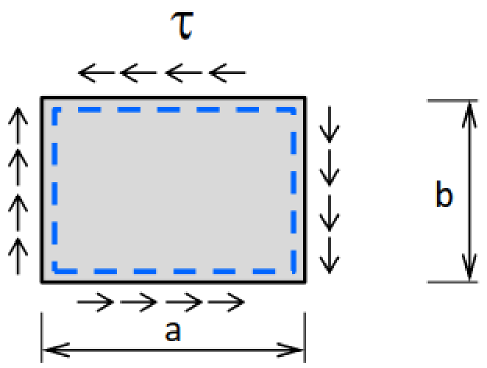
Numero d'ordine	Condizioni di carico del pannello		Tensioni ideali di imbozzamento*	$\alpha = \frac{a}{h}$	Coefficiente di imbozzamento
I	Tensione di compressione variabile linearmente $0 \leq \psi \leq 1$		$\sigma_{cr} = k_\sigma \sigma_{cr,0}$	$\alpha \geq 1$	$k_\sigma = \frac{8{,}4}{\psi + 1{,}1}$
				$\alpha < 1$	$k_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \frac{2{,}1}{\psi + 1{,}1}$
II	Tensione di compressione e trazione variabili linearmente, ma preponderante la tensione di compressione $-1 < \psi < 0$		$\sigma_{cr} = k_\sigma \sigma_{cr,0}$		$k_\sigma = 1 + \psi k_1 - \psi k_3 + 10 \psi (1 + \psi)$ dove: k_1 si ottiene dal caso I per $\psi = 0$; k_3 si ottiene dal caso III per $\psi = -1$
III	Tensione di compressione e trazione variabili linearmente, ma uguali i valori massimi di compressione e trazione $\psi = -1$ ovvero preponderante la tensione di trazione $\psi < -1$		$\sigma_{cr} = k_\sigma \sigma_{cr,0}$	$\alpha \geq \frac{2}{3}$	$k_\sigma = 23{,}9$
				$\alpha < \frac{2}{3}$	$k_\sigma = 15{,}87 + \frac{1{,}87}{\alpha^2} + 8{,}6\,\alpha^2$
IV	Tensione tangenziale uniformemente distribuita		$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_{cr,0}$	$\alpha \geq 1$	$k_\tau = 5{,}34 + \frac{4}{\alpha^2}$
				$\alpha < 1$	$k_\tau = 4 + \frac{5{,}34}{\alpha^2}$

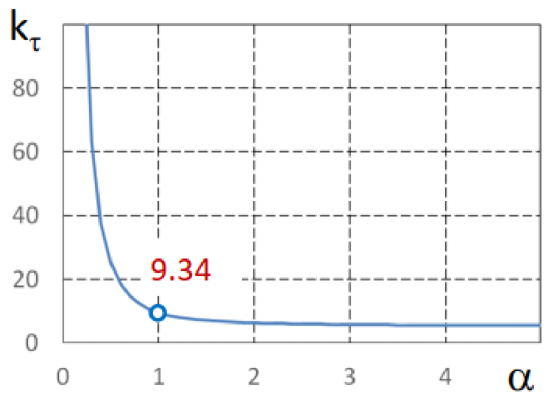
* Per i valori della tensione di riferimento $\sigma_{cr,0}$ vedere prospetto 7-IX.

Carico critico elastico secondo EC3

Fattore di stabilità di pannelli interni non irrigiditi

Tensioni tangenziali





$\alpha = a/b$	$\alpha \geq 1$	$\alpha < 1$
k_τ	$5.34 + 4.0/\alpha^2$	$4.0 + 5.34/\alpha^2$

Carico critico elastico secondo EC3

Fattore di stabilità di pannelli irrigiditi

L'Eurocodice 3 parte 1.5 prevede procedure semplificate diverse per il calcolo della tensione critica di pannelli con:

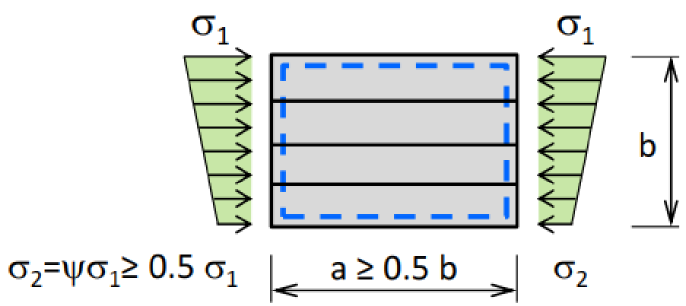
- un irrigidimento longitudinale
  nella parte compressa (appendice A.2)
- due irrigidimenti longitudinali
  nella parte compressa (appendice A.2)
- tre o più irrigidimenti longitudinali
  egualmente spaziati nell'altezza del pannello (appendice A.1)

Carico critico elastico secondo EC3

Fattore di stabilità di pannelli irrigiditi

Nota: questo metodo vale solo per pannelli con almeno tre irrigidimenti egualmente spaziati

Tensioni normali



$\alpha \le \gamma^{0.25}$	$k_{\sigma,p} = \dfrac{2\left[\left(1+\alpha^2\right)+\gamma-1\right]}{\alpha^2(\psi+1)(\delta+1)}$
$\alpha > \gamma^{0.25}$	$k_{\sigma,p} = \dfrac{4\left(1+\sqrt{\gamma}\right)}{(\psi+1)(\delta+1)}$

a/b

dove :

$\gamma = I_{sl}/I_p$

I_p momento d'inerzia del piatto $= \dfrac{bt^3}{12\left(1-\nu^2\right)}$

I_{sl} momento d'inerzia dell'intero piatto irrigidito

$\delta = \sum A_{sl}/A_p$

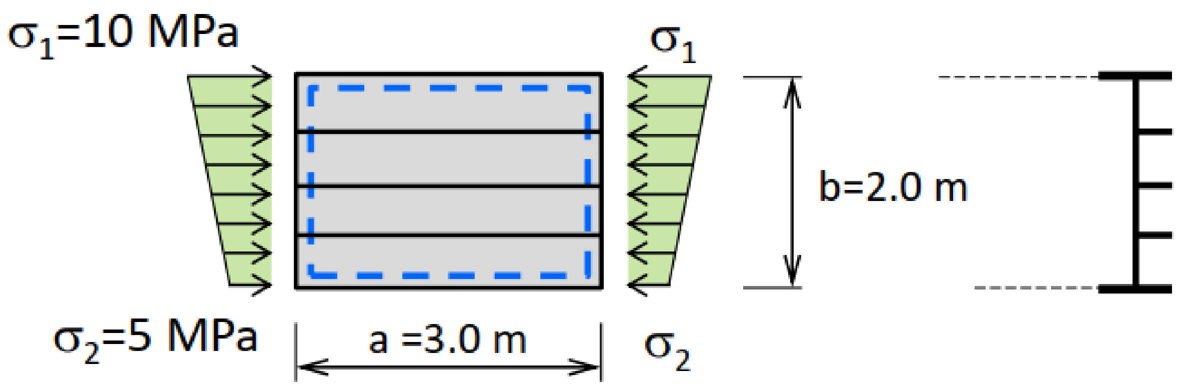
$A_p = b\,t$

ΣA_{sl} somma delle aree degli irrigidimenti

tratto da: Eurocodice 3 parte 1.5 (annesso A.1)

Carico critico elastico secondo EC3

Esempio di lastra interna irrigidita



spessore lastra e irrigidimenti = 10 mm
altezza irrigidimenti = 150 mm
(E=200000 MPa)

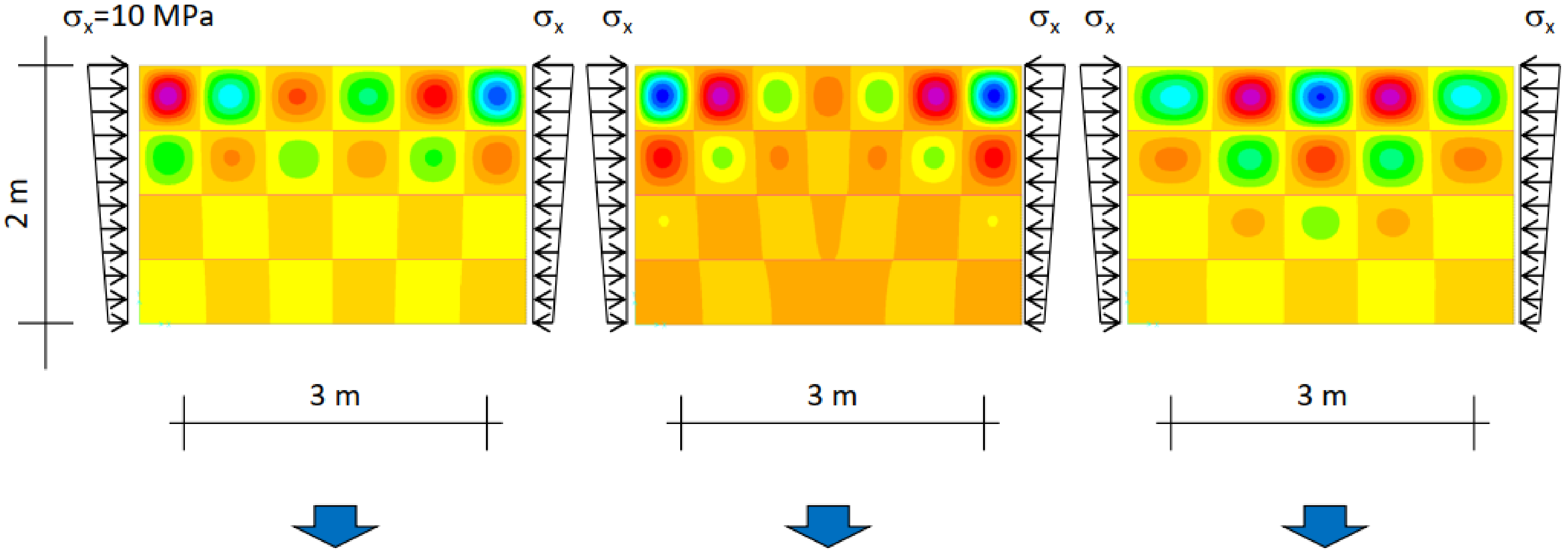
Valutazione numerica del moltiplicatore critico

$\alpha_{cr,1}$=38.193

Carico critico elastico secondo EC3

Esempio di lastra interna irrigidita

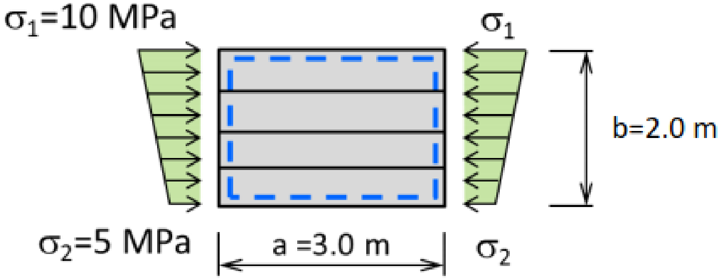
1° carico critico | 2° carico critico | 3° carico critico



$\alpha_{cr,1}$=38.193 | $\alpha_{cr,2}$=38.427 | $\alpha_{cr,3}$=40.781

Carico critico elastico secondo EC3

Esempio di lastra interna irrigidita



Lastra $A_p = 200 \cdot 1 = 200\ \text{cm}^2$

Irrigidimento $A_{sl} = 15 \cdot 1 = 15\ \text{cm}^2$

$\sum A_{sl} = 3 \cdot 15 = 45\ \text{cm}^2$

$\delta = \sum A_{sl} / A_p = 45/200 = 0.225$

$$I_p = \frac{b s^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{200 \cdot 1^3}{12(1-0.3^2)} = 18.31\ \text{cm}^4$$

Momento d'inerzia del pannello non irrigidito

$I_{sl} = 3211.44\ \text{cm}^4$

Momento d'inerzia del pannello irrigidito

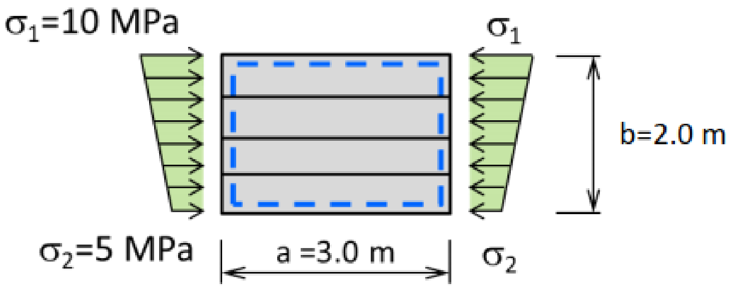
$\gamma = I_{sl} / I_p = 3211.44/18.31 = 175.39$

Carico critico elastico secondo EC3

Esempio di lastra interna irrigidita

$$\alpha = a/b = 300/200 = 1.5 \quad < \sqrt[4]{\gamma} = 3.64$$

$$\psi = \sigma_2/\sigma_1 = 5/10 = 0.5$$



$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} = 189800\left(\frac{1}{200}\right)^2 = 4.75\,\text{MPa}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{2\left[(1+\alpha^2)+\gamma-1\right]}{\alpha^2(1+\psi)(1+\delta)} = \frac{2\left[(1+1.5^2)+175.39-1\right]}{1.5^2(0.5+1)(0.225+1)} = 89.47$$

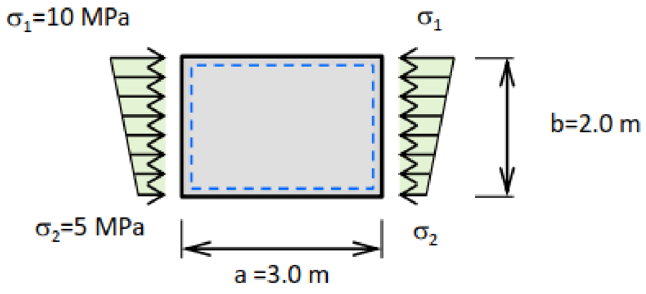
$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_e = 89.47 \cdot 4.75 = 424.98\,\text{MPa}$$

Carico critico elastico secondo EC3

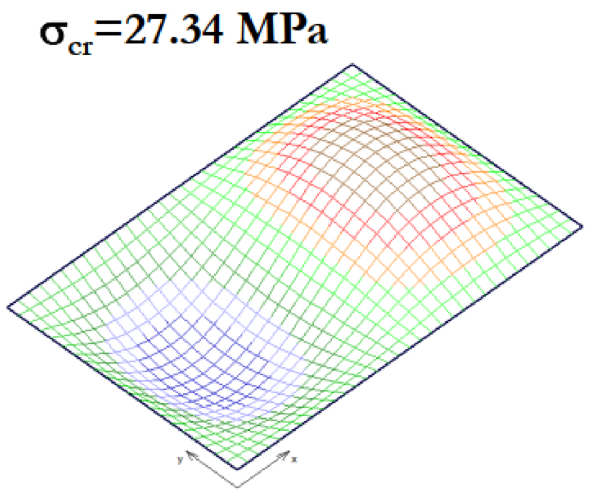
Irrigidimenti

Gli irrigidimenti devono avere sufficiente rigidezza e resistenza per rendere possibili (in forma ingegneristicamente accurata) gli incrementi dei carichi critici corrispondenti ad una infinita rigidezza e resistenza

Esempio :



spessore lastra = 10 mm

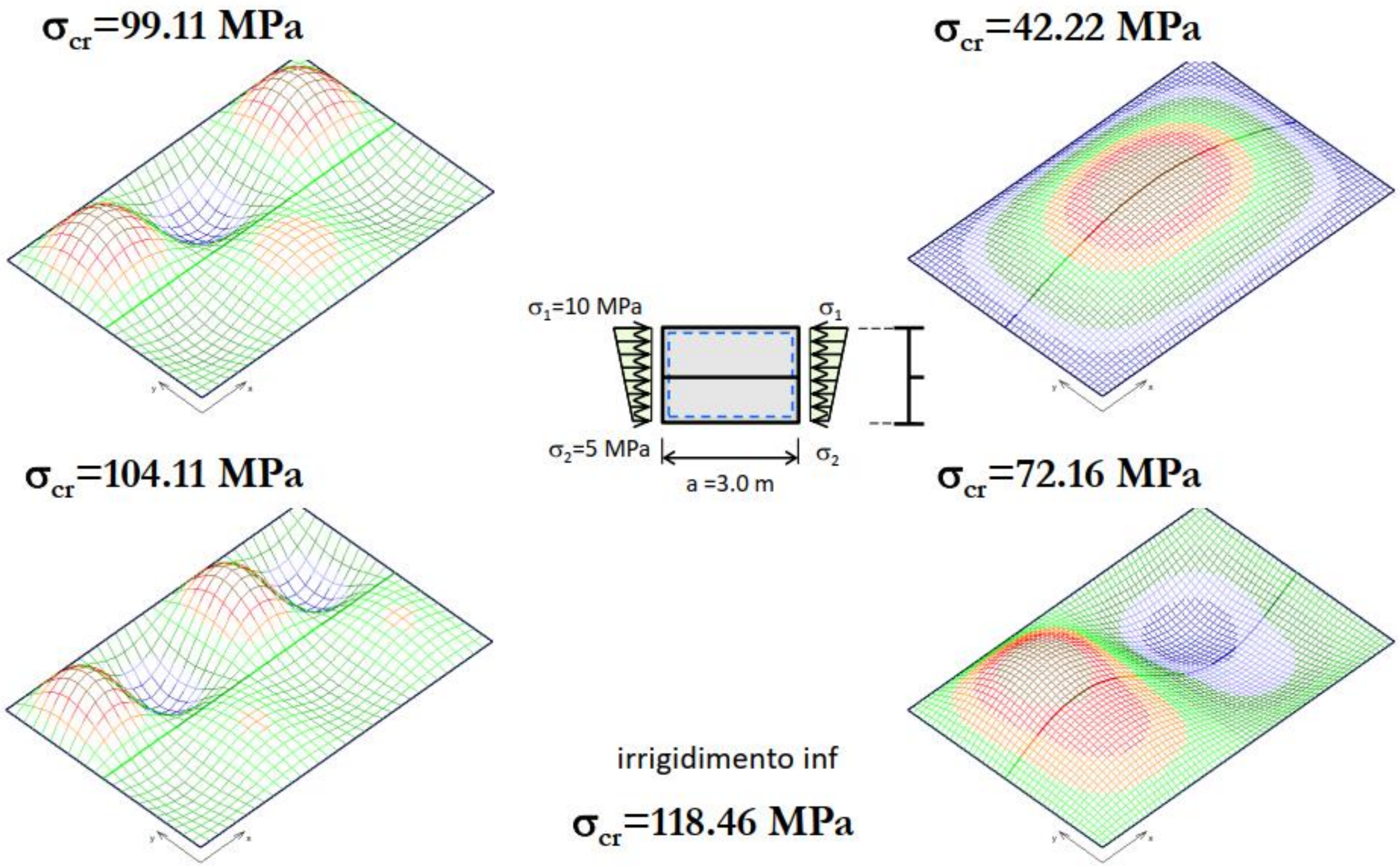


Carico critico elastico secondo EC3

Irrigidimenti

irrigidimento lunghezza=15 cm, spessore = 1 cm

irrigidimento lunghezza=5 cm, spessore = 1 cm



Carico critico elastico secondo EC3

Irrigidimenti

Formule approssimate di rigidezza minima degli irrigidimenti

Lastra soggetta a tensioni normali uniformi

$$I_{st} \geq 4.5bt^3\left[1+2.3\frac{A_{st}}{bt}\left(1+0.5\frac{A_{st}}{bt}\right)\right]$$

Nota: vedi altre indicazioni in Eurocodice 3 (parte 1.5)

Lastra soggetta a tensioni normali non uniformi (flessione)

$$I_{st} \geq 4bt^3\left[1+4\frac{A_{st}}{bt}\left(1+\frac{A_{st}}{bt}\right)\right]$$

Lastra soggetta a tensioni tangenziali

$$I_{st} \geq \frac{at^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\frac{6}{a/b}$$ a/b≥1

$$I_{st} \geq \frac{at^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\frac{6}{\left(a/b\right)^4}$$ a/b<1