

***Asupra unor subiecte controversate
privind aplicarea Eurocode 3***

prof. dr. ing. Dan CREȚU
Universitatea Tehnică de Construcții București

Scurt istoric

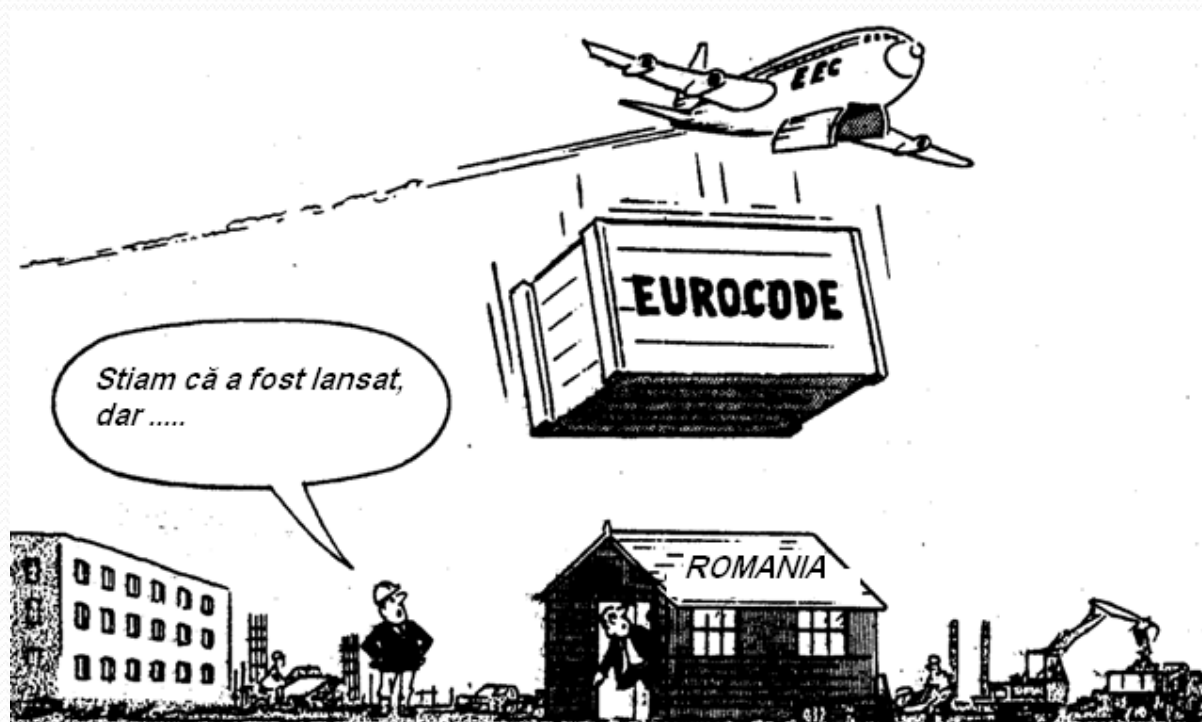
- În anul 1975 se inițiază în țările din Comunitatea Europeană un vast program de acțiune în domeniul construcțiilor, obiectivul declarat fiind armonizarea normativelor în vederea eliminării barierelor de natură tehnică în schimburile economice.
- Primele coduri europene, apărute în anii 1980, au fost îmbunătățite continuu, ajungându-se astăzi la zece reglementări numerotate de la EN 1990 - Eurocode 0: *Bazele proiectării structurilor* până la EN 1999 - Eurocode 9: *Proiectarea structurilor de aluminiu*.
- Având statutul de standarde europene, se acceptă totuși și se recunoaște dreptul fiecărui stat membru de a stabili prin anexe naționale valori specifice ale unor parametri de calcul tributar zonei geografice și performanțelor materialelor disponibile.

Scurt istoric

- România a devenit țară membră a Uniunii Europene la 1 ianuarie 2007, mult timp după ce normele europene intraseră deja în faza finală de elaborare.
- Deși facultățile de construcții din România au participat la programe europene încă de la începutul anilor 1990, aprofundarea și transmiterea conținutului eurocodurilor nu s-a realizat în mod corespunzător.
- De cele mai multe ori, colectivele de specialiști au fost puse în situația de a traduce standarde cu un conținut relativ pretențios.

Scurt istoric

- Un astfel de exemplu îl reprezintă suita de norme din zona proiectării construcțiilor metalice, începând cu norma de bază EN 1993-1-1 - Eurocode 3: *Proiectarea structurilor de oțel, Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri*.
- Conform directivei europene, standardul EN 1993-1-1 trebuia să primească statut de standard național până cel târziu în octombrie 2005, urmând ca, începând cu martie 2010, standardele naționale în contradicție să fie anulate. Prin urmare, standardul românesc STAS 10108/0-78, *Calculul elementelor din oțel*, trebuie abrogat.
- Atingerea termenului scadent după o perioadă destul de lungă – circa 20 de ani de „liniște”, a trezit reacții de respingere a noului standard.



Aspecte de calcul contestate

- cazul barelor întinse solidarizate cu șuruburi sau cu sudură
- verificarea barelor solicitate la compresiune și încovoiere
- calculul în domeniul plastic al elementelor de rezistență disipative din alcătuirea structurilor metalice amplasate în zone seismice

Cazul barelor întinse solidarizate cu șuruburi sau cu sudură

- conf.dr. ing. Ioan Paul
 - Principii de aplicare a Normativului P100-1/2006 la construcțiile din oțel, după anularea STAS 10108/o-78, *Revista AICPS* nr. 2-3/2010
 - Aplicarea seriei de standarde SR EN 1993, în volumul Realizări și preocupări actuale în ingineria construcțiilor metalice - Lucrările celei de-a 12-a Conferințe Naționale de Construcții Metalice Timișoara 2010
 - Compatibilitatea prevederilor SR EN 1993 și 1998 cu practica inginerescă, a XXII-a conferință națională AICPS , “Construcții moderne. Conlucrarea între arhitectură și structură” , 2012

Observații

- Utilizarea a două limite de referințe pentru același element, f_y și f_u când se știe din practica inginerescă că un element din oțel nu se rupe decât prin eforturi de întindere, deci utilizarea limitei de rupere la alte tipuri de solicitări este nejustificată tehnic (la orice altă solicitare supunem elementul metalic acesta nu se rupe ci iese din lucru prin pierderea stabilității locale sau generale).
(ruperea se poate produce prin întindere, torsiune, încovoiere)
- Relațiile de calcul în cazul barelor îmbinate cu tije supuse la întindere sunt “anomalii tehnice” deoarece, conform noului cod, practicarea unor găuri într-o bară întinsă nu diminuează capacitatea sa de rezistență.
- Se propune un singur parametru pentru rezistențele de calcul (f_y) și renunțarea la rezistența ultimă (f_u).

Verificarea barelor solicitate la compresiune și încovoiere

- prof. dr. ing. Daniela Preda, prof. dr. ing. Lucian Negrei, Impactul SR EN 1993-1-1 asupra problemei de flambaj, Conferința Națională Ingineria Clădirilor, 2011

Observații

- În relația de verificare la flambaj prin încovoiere-răsucire se utilizează caracteristicile elastice sau plastice ale secțiunii în funcție de clasa acesteia. Utilizarea caracteristicilor plastice ale secțiunii este o eroare de concepție, în defavoarea siguranței. Corect este ca, în orice calcul la flambaj, să se utilizeze numai caracteristicile elastice ale secțiunii.
- de ce verificarea la flambaj cere și verificarea de rezistență, în condițiile în care verificările la flambaj se fac cu eforturile maxime pe lungimea elementului structural.
- Verificarea de rezistență este mai exigentă decât verificarea la flambaj, în condițiile în care verificarea la flambaj se face cu eforturile maxime pe lungimea elementului structural.
- Deficiențele enunțate provin din structura parametrilor $[k_{yy}; k_{yz}; k_{zy}; k_{zz}]$ care reprezintă o prelucrare periculoasă a coeficienților de echivalență $[c_x, c_y]$ din STAS 10108/0-78.

Verificarea barelor solicitate la compresiune și încovoiere

- prof. dr. ing. Daniela Preda, prof. dr. ing. Lucian Negrei, Impactul SR EN 1993-1-1 asupra problemei de flambaj, Conferința Națională Ingineria Clădirilor, 2011

Observații

- Verificarea la flambaj indică o rezervă de rezistență de 14%.
- Rezultatul este absurd și în defavoarea siguranței.
- Cauza rezultatului absurd provine din structura necorespunzătoare a relațiilor care stabilesc coeficienții de interacțiune.
- Sistemul de calcul prevăzut în SR EN 1993-1-1 este incoerent și vulnerabil, în defavoarea siguranței.

Calculul în domeniul plastic al elementelor de rezistență disipative din alcătuirea structurilor metalice amplasate în zone seismice

- conf. dr. ing. Ioan Paul – în aceleași lucrări

Observații

- eforturile N_{Ed} , M_{Ed} , V_{Ed} sunt determinate printr-un calcul static liniar cu caracteristicile geometrice elastice ale secțiunilor indiferent de natura încărcărilor \Rightarrow nu se pot face verificări în domeniul plastic deoarece nu se mai păstrează distribuția eforturilor în structura reală.
- aplicarea principiilor calculului post-elastic la bare solicitate la încovoiere poate conduce la mecanisme de cedare din încărcări gravitaționale aplicate static.

Calculul în domeniul plastic al elementelor de rezistență disipative din alcătuirea structurilor metalice amplasate în zone seismice

- conf. dr. ing. Ioan Paul– în aceleași lucrări

Observații

- starea de eforturi din acțiunea seismică se determină printr-un calcul static liniar la o fracțiune din încărcarea seismică, fracțiune cuprinsă între 16% și 50% din încărcarea seismică. Verificările de rezistență și de stabilitate nu se pot realiza în domeniul plastic deoarece cealaltă fracțiune (50%-80%) trebuie “consumată” prin plastificarea secțiunilor și deformații sub efort constant în domeniul elasto-plastic.
- revenirea la principiile calculului liniar, respectiv toate verificările de rezistență, stabilitate și deformabilitate trebuie efectuate în domeniul elastic dacă eforturile și deformațiile sunt determinate printr-un calcul elastic.
- verificările de rezistență, stabilitate și deformabilitate se efectuează în domeniul elasto-plastic numai dacă starea de eforturi și de deformații se obține dintr-un calcul în domeniul neliniar.

Răspuns la reacțiile negative produse de codul european

- retrospectivă asupra principiilor de calcul și a relațiilor utilizate în
 - vechiul standard de calcul românesc STAS 10108/0-78 Calculul elementelor din oțel
 - noul cod de calcul european EN 1993-1-1:2005 Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
 - codul de proiectare seismică – partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri – P100-1/2006, EN 1998

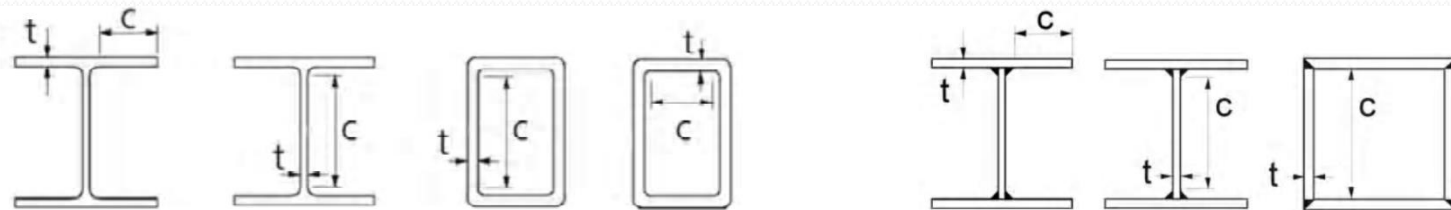
Elemente noi

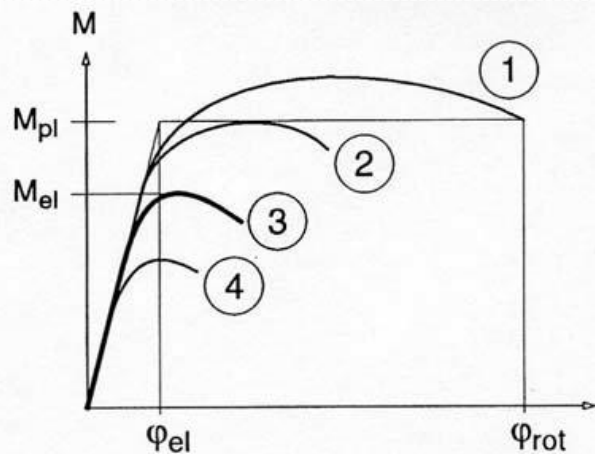
- **Clasele de secțiuni**

- flambajul local se poate produce înaintea flambajului general afectând astfel capacitatea de deformație dar și de rezistență
- în cazul structurilor din oțel proiectate de a avea incursiuni post-elastice flambajul local trebuie evitat pentru a nu se reduce ductilitatea în secțiunile disipative
- patru clase de secțiuni definite de capacitatea de rotire plastică în articulațiile plastice și care depind de raportul c/t al zonei comprimate din secțiune (efectul clasei oțelului se contorizează prin

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

- dacă diferite părți ale secțiunii sunt în clase diferite secțiunea se va încadra în clasa cea mai defavorabilă.





Standardul românesc:

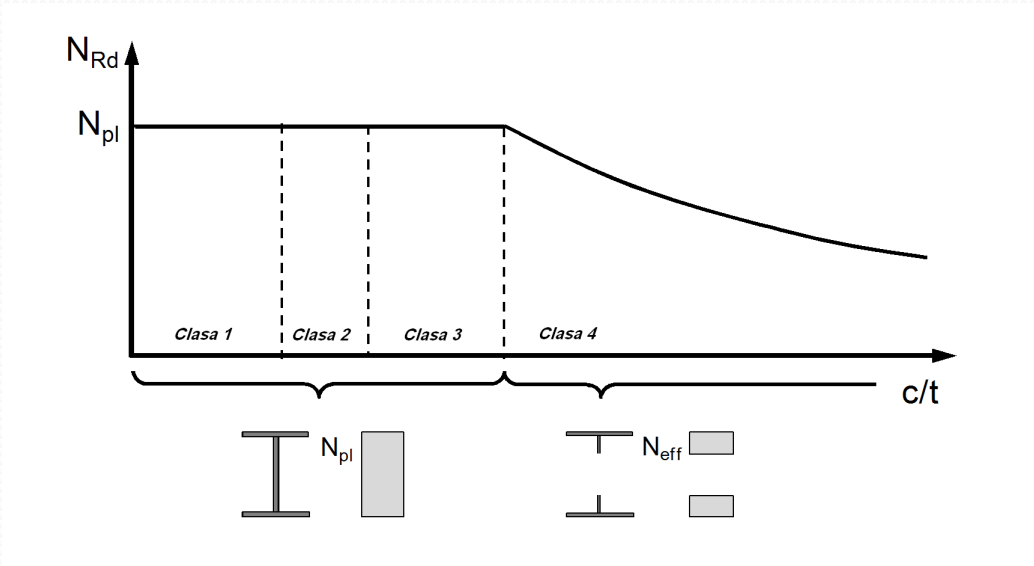
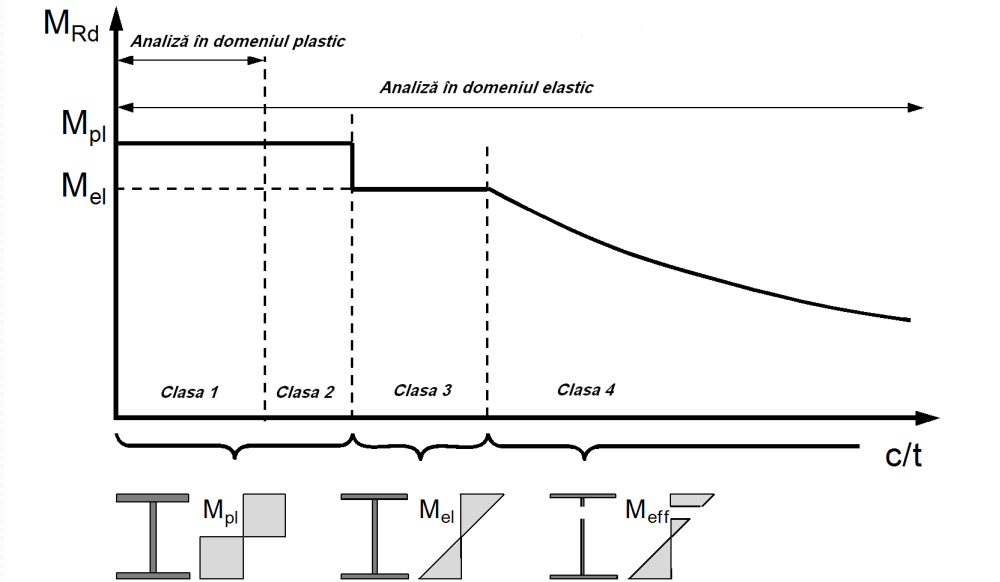
- conține numai prevederi de calcul în domeniul elastic și nu este potrivit unui calcul structural cu elemente disipative chiar dacă oțelul este prin excelență un material ductil;
- nu conține explicit o clasificare a secțiunilor în funcție de capacitatea de deformare plastică.

clasa 1: se referă la secțiunile care permit formarea articulațiilor plastice printr-o mare capacitate de deformare plastică fără afectarea capacității de rezistență a acestora (profile HEA)

clasa 2: permite atingerea capacității de rezistență plastică la încovoiere dar cu rotații plastice mai reduse – elemente compacte

clasa 3: comportare în domeniul elastic, distribuție liniară de tensiuni cu f_y în fibra comprimată cea mai solicitată - nu se pot dezvolta deformații plastice datorită flambajului local (profile IPE) – elemente semicompacte

clasa 4: flambajul local se produce înaintea atingerii limitei de curgere (profile din tablă îndoită sau secțiuni cu dimensiuni mari) - ca efect al flambajului local și al comportării postcritice se reduce aria secțiunii comprimate - arie echivalentă) - elemente zvelte



Prevederile codului european EN1993-1-1 privind calculul barelor solicitate la întindere cu zone slăbite de șuruburi sau îmbinate cu sudură

STAS 10108/0-78 EN 1993-1-1:2005

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \leq R$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}; N_{u,Rd})$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

Numai în cazul îmbinărilor cu șuruburi supuse la forfecare din categoriile A și B se operează cu două stări limită, aferente secțiunii brute curente a barei cu atingerea limitei de curgere, respectiv ruperea care s-ar produce în dreptul slăbirilor produse de șuruburi.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{sau} \quad \sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Secțiuni slăbite de găurile din îmbinările cu șuruburi

$$r_1 = \frac{A_{EN}}{A_{STAS}} = \frac{1,175}{f_y/R}$$

$$r_2 = \frac{A_{EN}^{net}}{A_{STAS}^{net}} = \frac{1,175 \cdot 1,25}{0,9 f_u/R} \rightarrow \gamma_{M2}$$

Marca oțelului	r_1			r_2		
	$t \leq 16$ mm	$16 < t \leq 40$ mm	$t > 40$ mm	$t \leq 16$ mm	$16 < t \leq 40$ mm	$t > 40$ mm
S235 (OL37)	1,100	1,000	1,093	0,997	0,907	0,907
S355 (OL52)	1,043	0,993 < 1	1,005	1,008	0,960	0,994



sporul de arie necesară este cuprins între 4,3 și 10%, (r_1) ceea ce înseamnă că noul cod de calcul adoptat este mai restrictiv decât vechia normă românească STAS 10108/0-78

Prevederea dimensionării economice prin care aria efectivă trebuia să se afle între limitele $0,95A_{nec} \leq A_{ef} \leq 1,03A_{nec}$

ar trebui înlocuită în spiritul siguranței cu condiția $A_{nec} \leq A_{ef} \leq 1,03A_{nec}$

Zona imbinărilor prezintă o capacitate redusă de deformare plastică în raport cu restul barei.

Prevederile codului european EN1993-1-1 privind calculul barelor solicitate la întindere cu zone slăbite de șuruburi sau îmbinate cu sudură

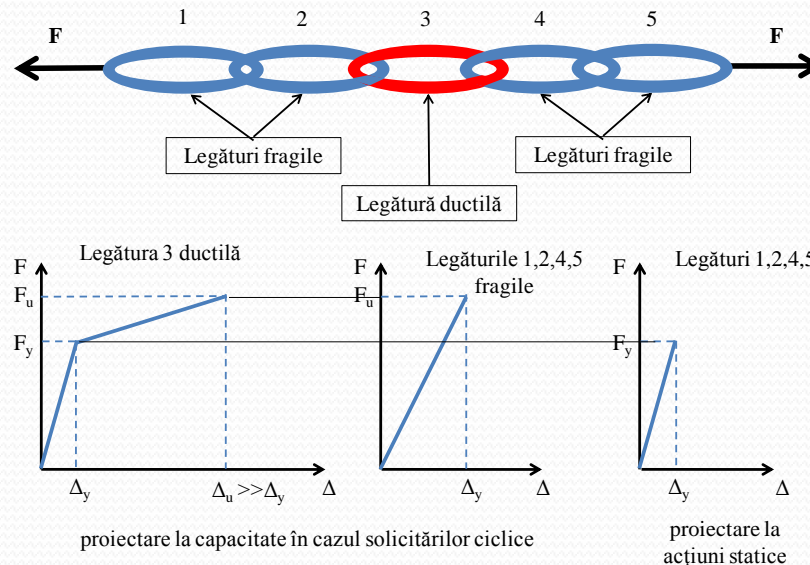
EN 1998-1-1

Pentru a asigura o comportare generală (globală) disipativă și ductilă, trebuie evitată cedarea casantă sau formarea prematură a mecanismelor instabile.



Procedeele de proiectare conținute în EN 1998-1:2004 sau în codul românesc de calcul la seism, P100-1/2006, se bazează pe proiectarea ierarhizării capacităților de rezistență cu scopul obținerii unui mecanism plastic adecvat, în care să se evite cedările fragile.

Metoda de proiectare la capacitate a fost expusă deosebit de sugestiv de profesorul Pauley, prin lanțul cu legături ductile și fragile. Astfel, ierarhizarea capacităților presupune ca în legăturile ductile să se producă deformații plastice la o forță mult mai mică în raport cu capacitățile de rezistență a legăturilor fragile.



Lungimea totală a lanțului la starea limită ultimă va fi $\Delta u = 5\Delta_y = \sum_{i=1}^5 N_{Ed,i} l_i / (EA_i)$.

Prevederile codului european EN1993-1-1 privind calculul barelor solicitate la întindere cu zone slăbite de șuruburi sau îmbinate cu sudură

Reducerea forțelor elastice de răspuns printr-un factor de comportare supraunitar ($q \geq 4$ în cazul structurilor cu ductilitate înaltă) presupune disiparea energiei induse de cutremur prin deformații plastice.

Prin deformații inelastice, legăturile ductile vor funcționa ca elemente de siguranță, limitând forțele de inerție induse de seism la capacitatea lor de rezistență limită.

Pentru aceasta, legăturile fragile vor trebui înzestrate cu o capacitate de rezistență mai mare, cel puțin egală cu capacitatea de rezistență ultimă a legăturilor ductile.

Asigurând acest principiu, se vor evita în zonele slăbite de mijloacele de îmbinare ruperile premature, casante, permițând o deformație plastică suficientă în legăturile ductile.

În cazul barelor întinse, zona de îmbinare cu șuruburi sau cu sudură se comportă ca o legătură fragilă.

Condiția de ductilitate: $N_{t,Rd} \geq N_{pl,Rd}$ $\frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \geq A_{br}f_y$ $A_{net} \geq A_{br} \frac{f_y \gamma_{M2}}{f_u 0,9} = kA_{br}$

Marcă oțel	$k = \frac{f_y \gamma_{M2}}{f_u 0,9}$	
	$t \leq 40$ mm	40 mm $< t \leq 80$ mm
S235	0,907	0,830
S355	0,967	0,990

Codul de proiectare P100-3/2008 impune pentru verificarea la SLU a barelor întinse o deformație inelastică maximă $\Delta_{t,u} = 9\Delta_y$

Acceptând că lungimea zonei slăbite de îmbinări se dezvoltă pe o lungime de cca 5% din lungimea barei, deformația plastică care se poate dezvoltata în zona îmbinării va fi

$$\left. \begin{aligned} \Delta l_{imb} &= \frac{5}{100} \Delta_{t,u} = 0,05 \cdot 9\Delta_y = 0,45\Delta_y \\ \text{În restul barei, } \Delta l_t &= \frac{95}{100} \Delta_{t,u} = 0,95 \cdot 9\Delta_y = 8,55\Delta_y \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta l_{imb}}{\Delta l_t} = 0,053$$

Este posibil ca tensiunile din zona de îmbinare să intre în zona de consolidare a oțelului, producându-se ruperea elementului în zona slăbită înainte ca deformațiile plastice considerate în calcul să se dezvolte în corpul barei întinse.

Prevederile codului european EN1993-1-1 privind calculul barelor solificate la întindere cu zone slăbite de șuruburi sau îmbinate cu sudură

Filozofia codului EN 1998-1 sau P100-1/2006 constă în asigurarea capacității de deformare plastică exprimată prin condiția

$$\mu_{\Delta} \geq q_{\mu} \rightarrow q_{\mu} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \text{factorul de comportare sau cerința de ductilitate asociată spectrului de proiectare și exprimă capacitatea structurii de a disipa energia indusă de seism}$$

↳ factorul de ductilitate la deplasare corespunzător capacității maxime de deformare a elementelor structurale disipative

Cutremurele severe de la Northridge, SUA, din 1994 și de la Kobe, Japonia, din 1995 au pus în evidență comportarea fragilă a îmbinărilor sudate și cu șuruburi.



⇒ măsuri constructive prin care îmbinarea să aibă capacitatea de rezistență mai mare decât a elementului disipator.

Se preîntâmpină astfel ruperile premature produse de concentrările de tensiuni specifice zonelor de îmbinare și se asigură dezvoltarea deformațiilor plastice în elementele disipative în concordanță cu factorul de comportare considerat.

Aceasta este de fapt rațiunea pentru care în zona îmbinărilor se înlocuiește limita de curgere f_y cu rezistența ultimă la rupere, f_u .

Negarea conceptului de proiectare la capacitate (*capacity design*) a zonelor slăbite de îmbinări face inutilă orice valoare apriori a factorului de comportare.

În acest caz, energia seismică nu ajunge să fie consumată prin deformarea plastică a elementelor considerate disipative, pe care s-a contat la alegerea factorului de comportare q .

Ca urmare se poate ajunge în situația ca îmbinările să cedeze prematur, fiind veriga slabă, fragilă, în lanțul lui Paulay.

De altfel, în norma europeană EN1998-1 ca și în codul românesc de calcul la seism P100-1/2006, se precizează: „Alcătuirea constructivă a elementelor cu zone potențial disipative trebuie să limiteze apariția tensiunilor reziduale mari, defectelor de execuție și să dirijeze dezvoltarea deformațiilor plastice în zonele special conformate în acest scop”.

Moduri de pierdere a stabilității barelor drepte

- **Compresiunea centrică:**

- nu sunt diferențe esențiale între STAS 10108/0-78 și EN 1993-1-1:2005
- modificările sunt de notație, introducerea a încă două curbe de flambaj și de încadrare în curba de flambaj în funcție de forma secțiunii, clasa oțelului și modul de realizare (profile laminate și bare din tablă îndoită la rece)

STAS 10108/0-78	EN 1993-1-1:2005
$\frac{N}{\varphi A} \leq R$	$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$ relația de calcul la flambaj prin încovoiere (controlează proiectarea barelor comprimate)
	N_{Ed} forța axială de proiectare de compresiune
	$N_{b,Rd}$ capacitatea de rezistență la flambaj
	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ clasele 1, 2 și 3
	$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$ clasa 4

Moduri de pierdere a stabilității barelor drepte

- **Compresiunea centrică:**

STAS 10108/0-78	EN 1993-1-1:2005
$\frac{N}{\varphi A} \leq R$	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0$ relația de calcul de rezistență (fără flambaj) $N_{c,Rd}$ capacitatea de rezistență a secțiunii solicitată la compresiune centrică $N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ clasele 1, 2 și 3 $N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ clasa 4

- Coeficienții de flambaj

STAS 10108/o-78

$$\phi = \left(0.6465 + \frac{5431}{\lambda^2}\right) - \sqrt{\left(0.6465 + \frac{5431}{\lambda^2}\right)^2 - \frac{10862}{\lambda^2}}$$

OL37 curba A

EN 1993-1-1:2005

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{l_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$

clasele 1, 2 și 3

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{l_{cr}}{i} \frac{\sqrt{A_{eff}}}{\lambda_1}$$

clasa 4

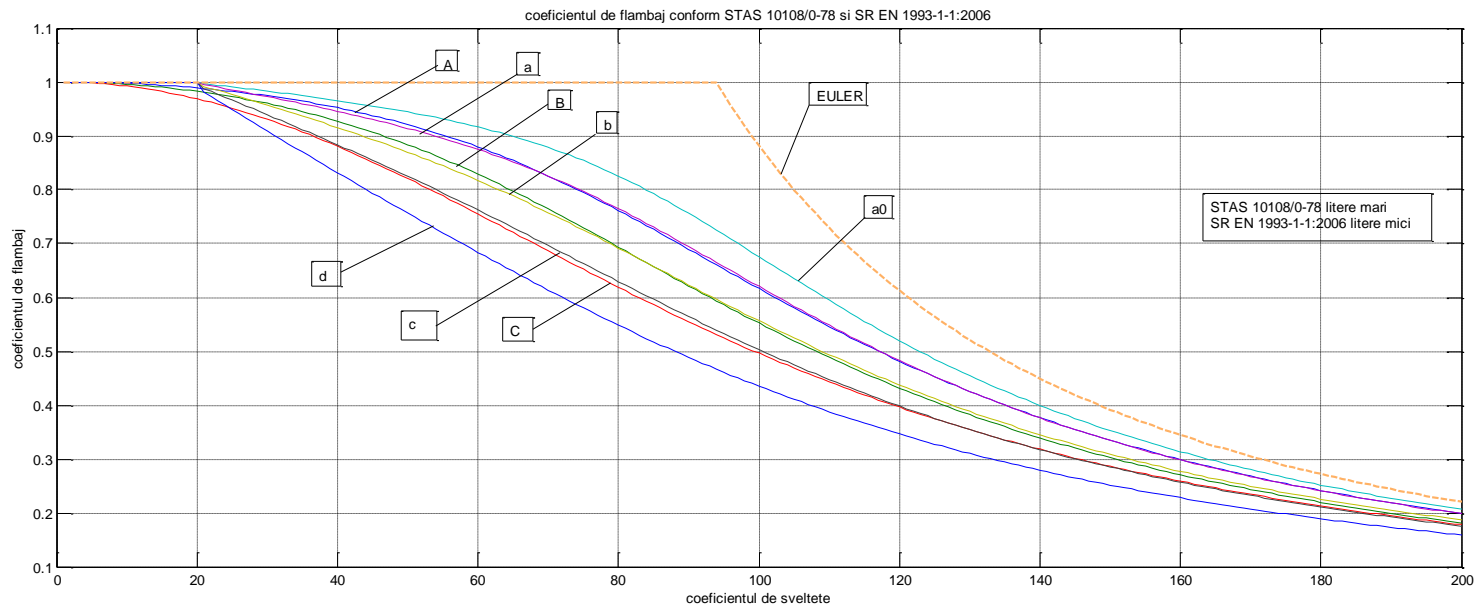
$$\bar{\lambda}_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad [f_y] = \text{N/mm}^2$$

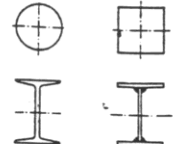
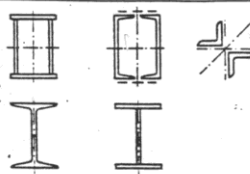

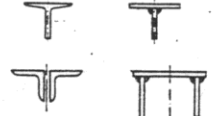
	a_0	a	b	c	d
α	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

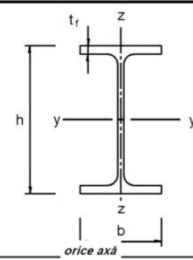
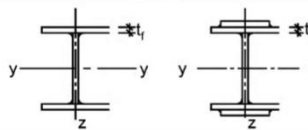
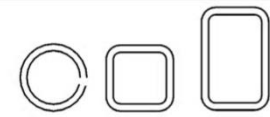
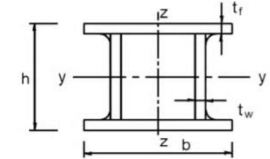
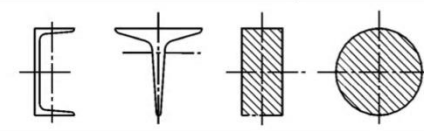

α și χ depind de geometria secțiunii transversale, de clasa oțelului, de procesul de fabricație și de planul de flambaj

Nu sunt diferențe privind coeficienții de flambaj între STAS 10108/0-78 și EN 1993-1-1



Dacă $\bar{\lambda} \leq 0.2$ sau $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0.04$, efectul flambajului din forță de compresiune se poate neglija.

Nr. crt.	Tipul profilului	Indicatorul tabelelor cu coeficienții ϕ în funcție de R_e
1	<p>a. Tuburi laminate la cald, fără sudură</p> <p>b. Profile dublu T laminate sau sudate din tablă oxiciupată, care flambează în plan paralel cu inima.</p> 	A - R_e
2	<p>a. Chesoaie sudate, profile solidarizate</p> <p>b. Profile dublu T laminate sau sudate din tablă oxiciupată, care flambează în plan paralel cu tălpile</p> 	B - R_e
3	<p>Profile deschise cu o axă de simetrie</p> <p>a. Flambaj în planul care conține axa de simetrie y-y</p> 	C - R_e
	<p>b. Flambaj în plan perpendicular pe axa de simetrie *</p> 	B - R_e

Forma secțiunii transversale	Limite	Flambaj în jurul axei	Curba de flambaj		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
<p>Secțiuni dublu T laminate</p> 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm	y-y	a	a ₀
			z-z	b	a ₀
	$h/b \leq 1,2$	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y	b	a
			z-z	c	a
	$t_f \leq 100$ mm	y-y	b	a	
		z-z	c	a	
	$t_f > 100$ mm	y-y	d	c	
		z-z	d	c	
<p>Secțiuni dublu T sudate</p> 	$t_f \leq 40$ mm	y-y	b	b	
		z-z	c	c	
	$t_f > 40$ mm	y-y	c	c	
		z-z	d	d	
<p>Secțiuni tubulare</p> 	Laminate la cald	orice axă	a	a ₀	
	Realizate la rece	orice axă	c	c	
<p>Secțiuni cascate sudate</p> 	orice formă cu excepția celor de mai sus	orice axă	b	b	
	grosimea sudurii $a > 0,5t_f$ $bt_f < 30$ $ht_w < 30$	orice axă	c	c	
<p>Secțiuni L, T și pline</p> 		orice axă	c	c	
<p>Secțiuni L</p> 		orice axă	b	b	

Cum s-au determinat curbele de flambaj ?

- experiment în laborator
- metode numerice (Metoda Elementelor Finite - FEM, Metoda Fâșiilor Finite - FSM)
- **s-a pus în evidență efectul imperfecțiunilor, al tensiunilor reziduale și al plasticității**
- Imperfecțiunile provin din:
 - abaterile geometrice de la axa barei considerată teoretic ideal dreaptă
 - aplicarea excentrică a forței axiale
 - tensiuni reziduale
 - structura cristalină neomogenă a materialului

⇒ forța critică teoretică EULER nu se va atinge niciodată

Imperfecțiuni geometrice

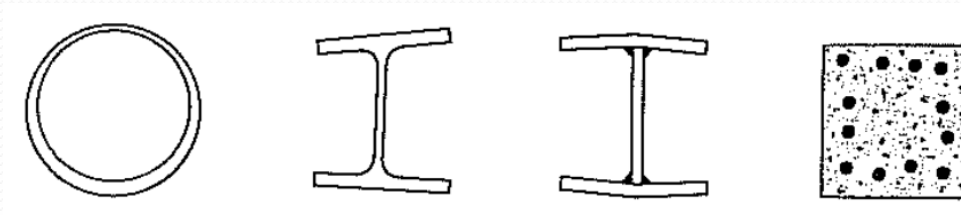
- se consideră o abatere sinusoidală de la axa rectilinie a barei de forma

$$w_0 = e_0 \sin \frac{\pi x}{l} \quad \longrightarrow \quad \text{conduce la factorul de corecție pentru deformații și eforturi dintr-un calcul de ordinul I}$$

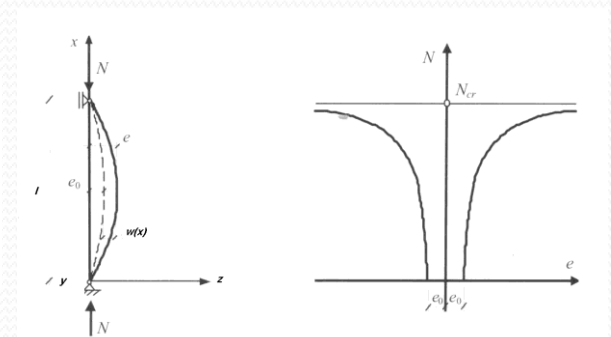
$$k = \frac{1}{1 - N/N_{cr}} \quad \text{coeficientul Ayrton-Perry}$$

Pentru deformații inițiale w_0 , chiar la valori reduse ale forței axiale, se dezvoltă momente încovoietoare:

$$M(x) = N(w + w_0) = N \frac{1}{1 - N/N_{cr}} e_0 \sin \frac{\pi x}{l}$$



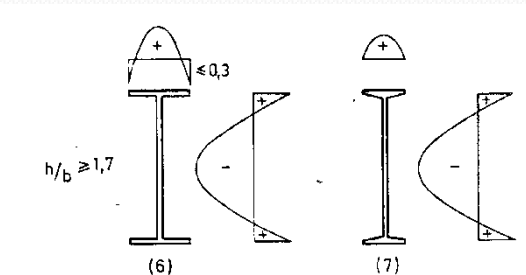
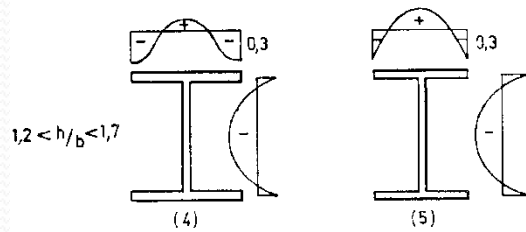
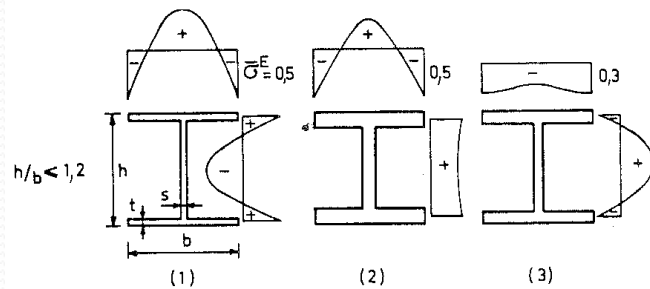
Imperfecțiuni geometrice



Bifurcarea echilibrului-calcul elastic

Tensiunile reziduale

- produc un sistem autoechilibrat de tensiuni și apar prin:
 - răcirea după laminarea la cald sau orice proces care implică căldura (sudură, tăierea cu flacăra)
 - formarea sau îndoirea la rece



Testele efectuate (ECCS 1976) pentru elemente comprimate cu diferiți coeficienți de zveltețe normalizați $\bar{\lambda}$ și comparate cu rezultatele teoretice au arătat:

- la valori reduse ale lui $\bar{\lambda}$ cedarea apare prin plastificarea secțiunii. Valorile $\sigma/f_y > 1.0$ s-au obținut experimental datorită consolidării oțelului
- pentru valori mari ale lui $\bar{\lambda}$ cedarea apare prin flambaj în domeniul elastic și imperfecțiunile nu au un rol important
- la valori intermediare ale lui $\bar{\lambda}$ cedarea apare prin flambaj în domeniul elasto-plastic, imperfecțiunile au un efect important - rezultatele experimentale deviază mult de la rezultatele teoretice.

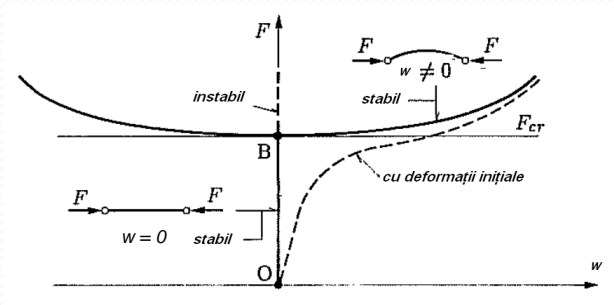
Capacitatea de rezistență a elementelor comprimate se bazează pe curbele europene pentru proiectarea la flambaj (European design buckling curves ECCS 1977) care leagă de $\bar{\lambda}$ raportul

$$\chi = \frac{\sigma}{f_y}$$

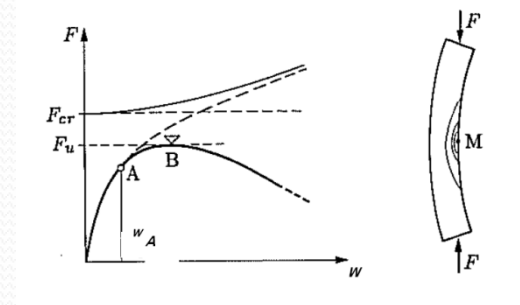
Cum s-au determinat curbele de flambaj ?

- Cele cinci curbe sunt rezultatul unui program intensiv de cercetări numerice și experimentale (ECCS 1976) care ține seama de toate imperfecțiunile din elementele reale supuse la compresiune.
- Imperfecțiunile, geometrice și din tensiuni reziduale, au fost stabilite statistic printr-un program extensiv de testări și măsurători experimentale (Strating și Vos 1973) care au justificat adoptarea în simulările numerice a unei imperfecțiuni geometrice sinusoidale cu amplitudinea maximă de $1/1000$ din deschidere.
- Iasinsky considera din 1894 pe bază de experimente din epocă o abatere geometrică din încovoiere de $1/1000$ din lungimea barei, modelând astfel condițiile întâlnite în practică.
- Abaterea de la forma rectilinie a barei are la bază o distribuție Gauss, normală, cu o valoare medie de $1/1176.5$ din deschidere și un coeficient de variație de 23,5%. Încărcările au fost considerate excentrice cu o distribuție Gamma cu $\lambda = 2.798$ și $k = 1.663$.
- Formulele analitice au fost stabilite de Maqui și Rondal (1978) care se bazează pe formula Ayrton-Perry în care amplitudinea se calibrează pentru a se surprinde efectul tuturor imperfecțiunilor.
- Curbele de flambaj au fost obținute prin prelucrare statistică a rezultatelor experimentale.

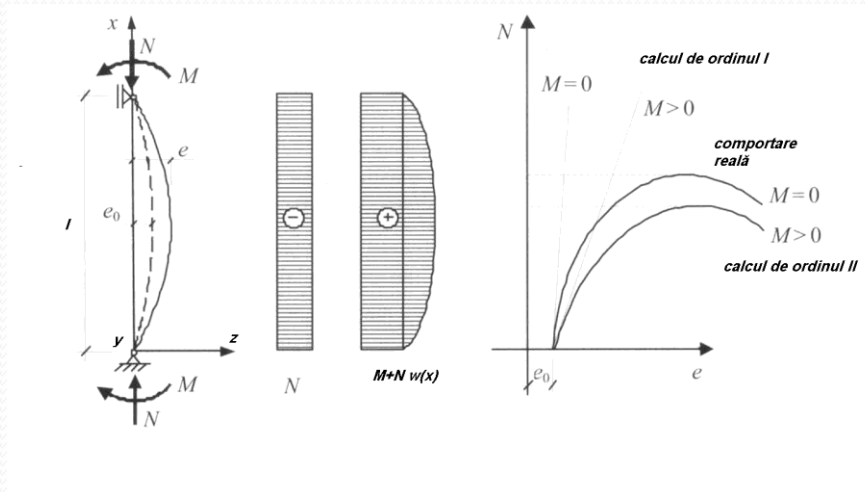
Tipuri de pierdere de stabilitate



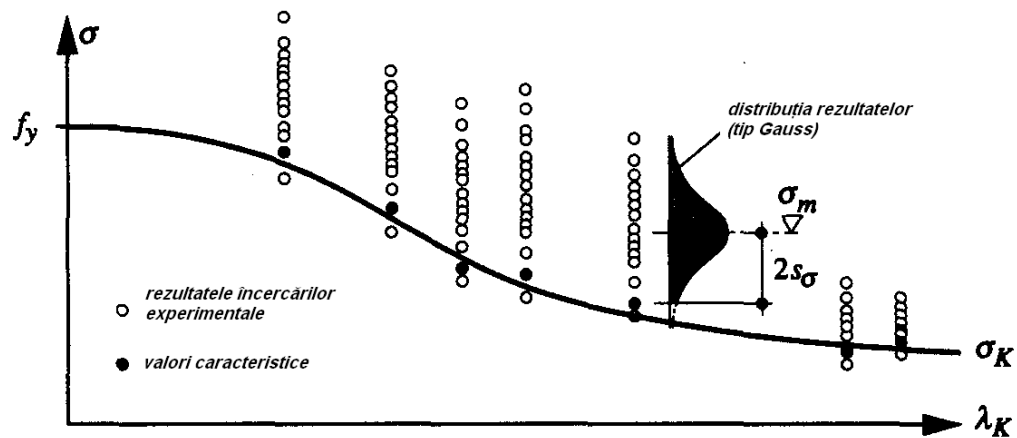
Comportare elastică



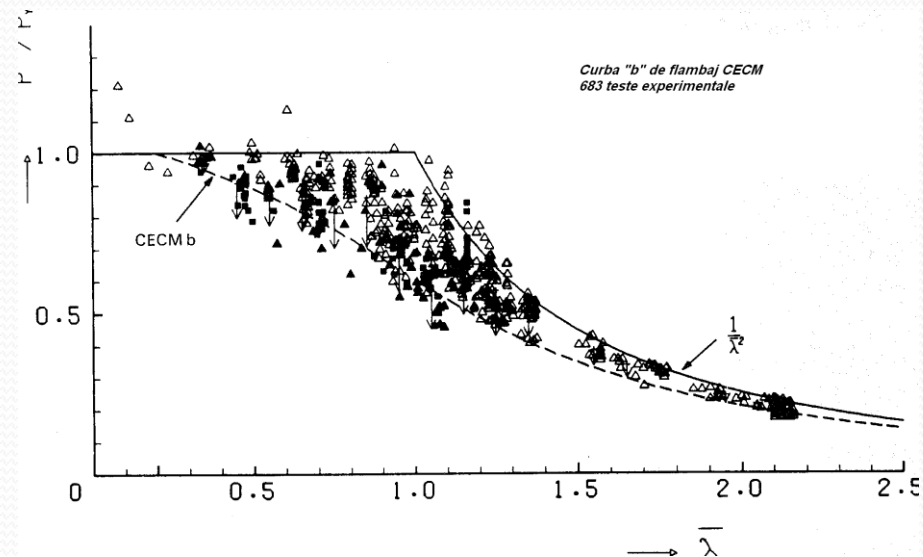
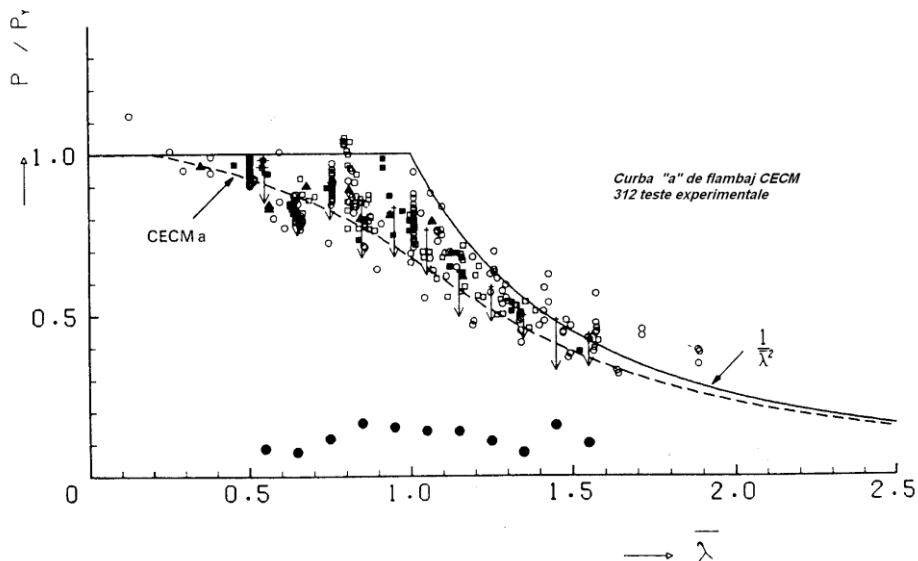
Comportare inelastică cu imperfecțiuni



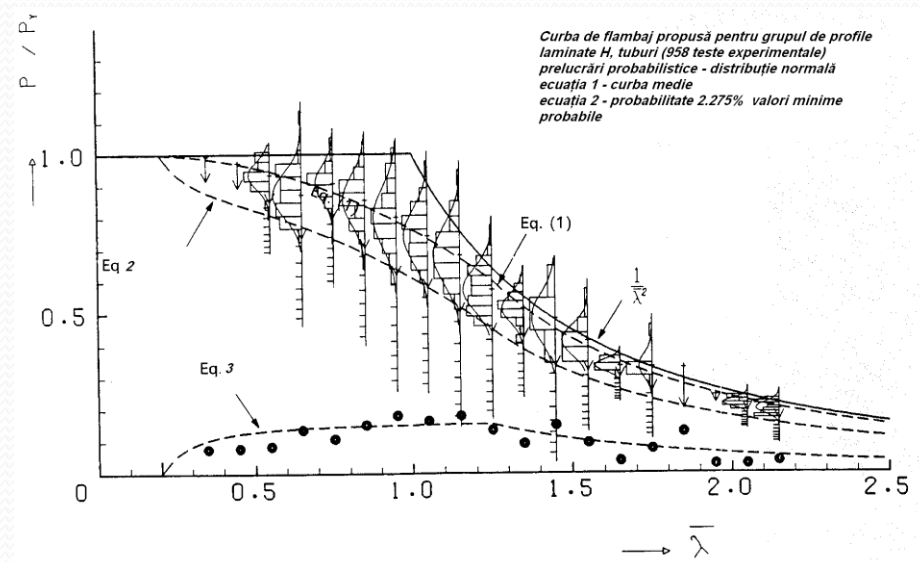
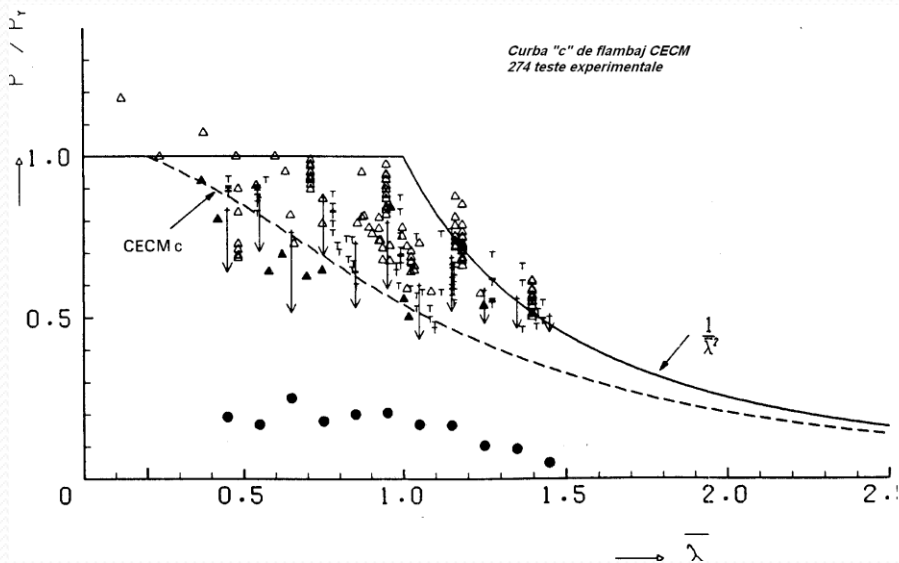
Rezultate experimentale care stau la baza determinării curbelor de flambaj



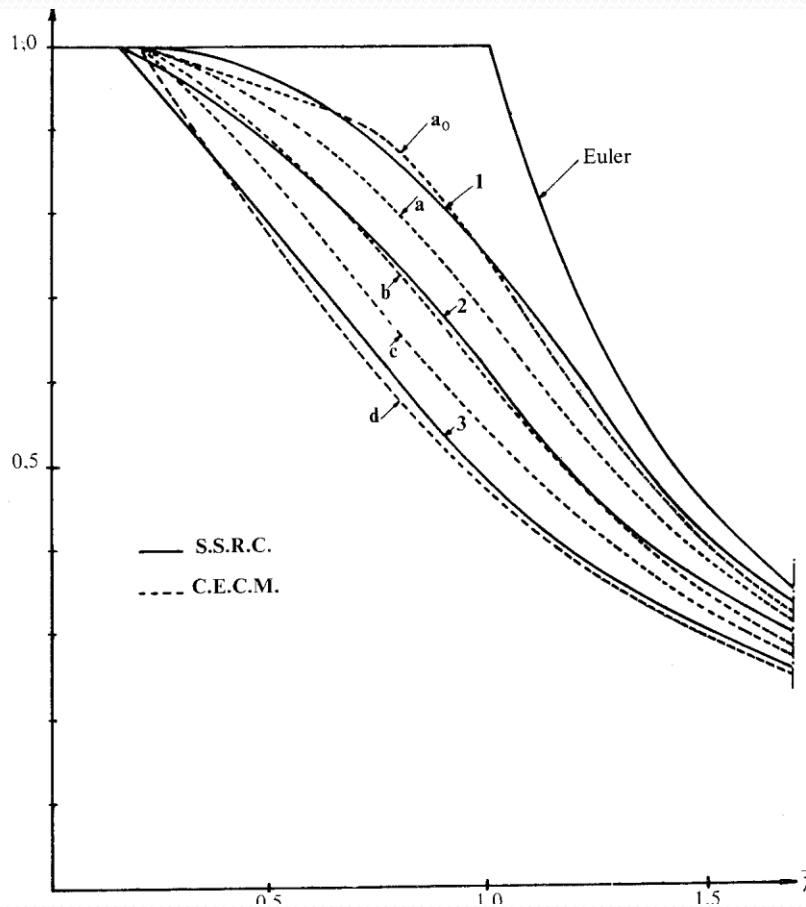
Tip profil	Simbol
H sudate	▲
casetat sudat	■
tub circular	○
tub rectangular	□
profil T	⊥
Bară circulară plină	●



Rezultate experimentale care stau la baza determinării curbelor de flambaj



Rezultate experimentale care stau la baza determinării curbelor de flambaj

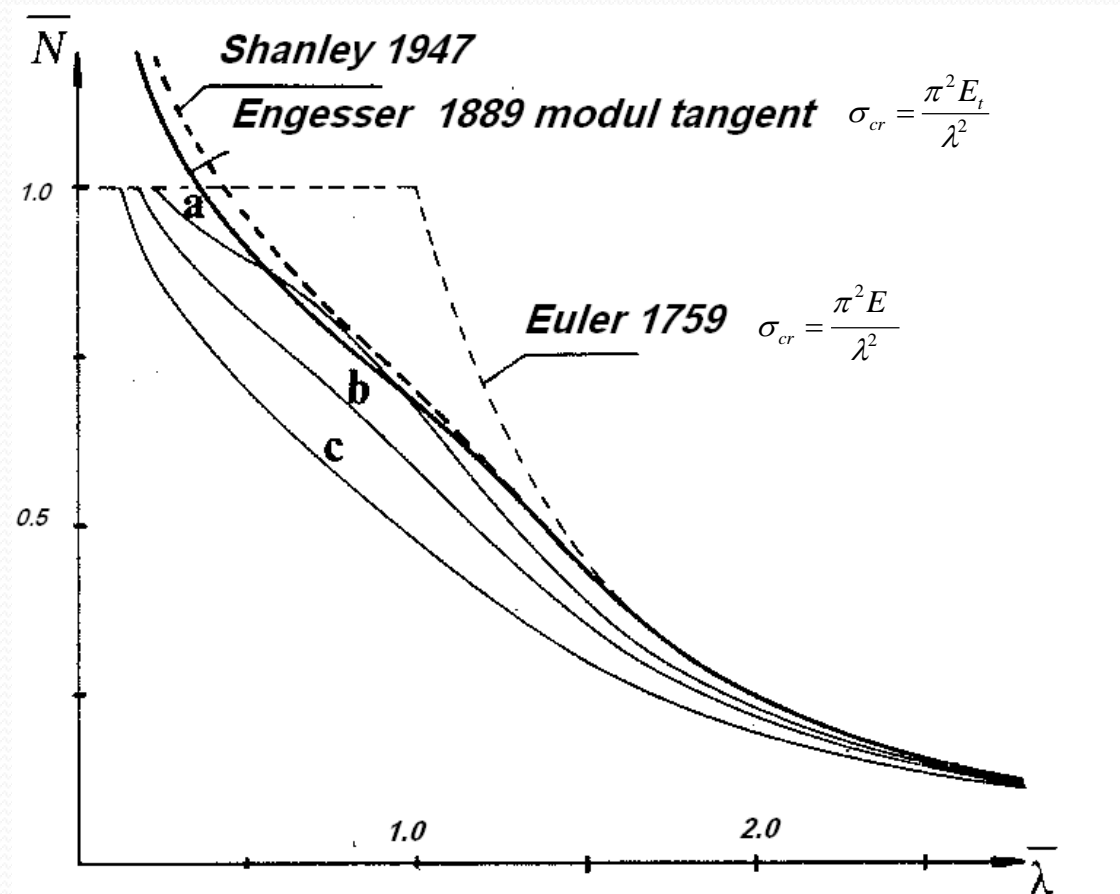


CECM – European Recommendation for Steel Construction sept. 1977
(Convention Europeene de la Construction Metallique)
(ECCS – European Convention for Constructional Steelwork)

SSRC – Guide for Stability Design Criteria for Metal Structures 1976 USA
(Structural Stability Research Council)

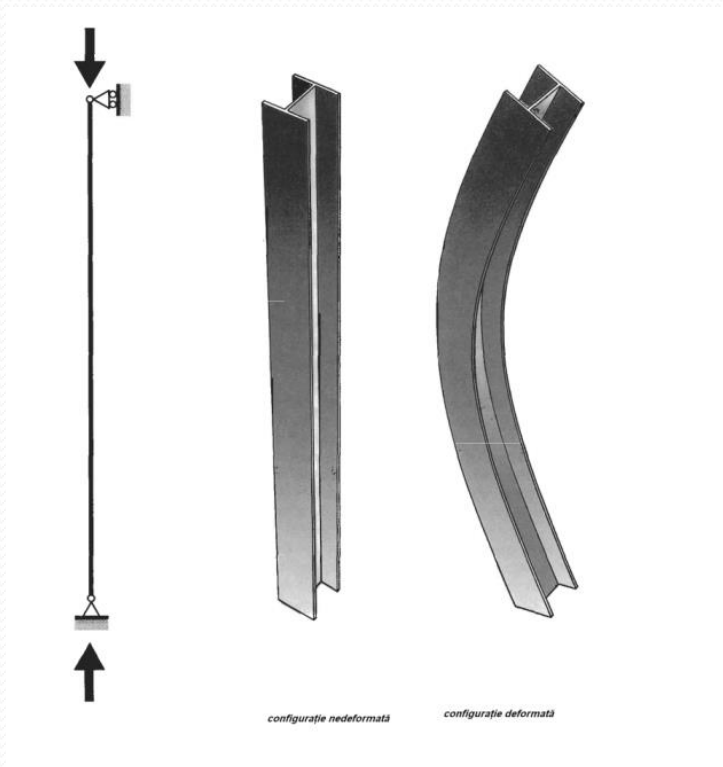
CRC – Guide for Stability Design for Structures 1960 USA (Column Research Council)

Rezultate experimentale care stau la baza determinării curbelor de flambaj

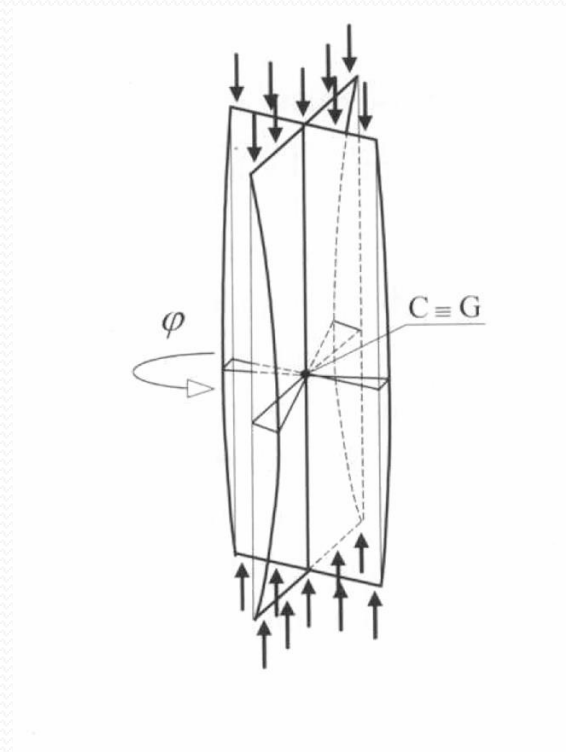


Tipuri de flambaj

flambaj prin încovoiere din compresiune
(flexural buckling)

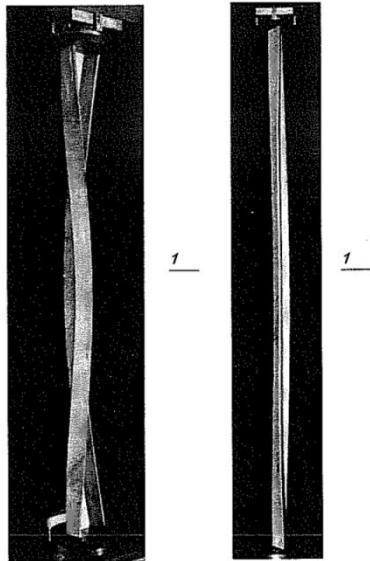


flambaj prin răsucire din compresiune
(torsional buckling)



Tipuri de flambaj

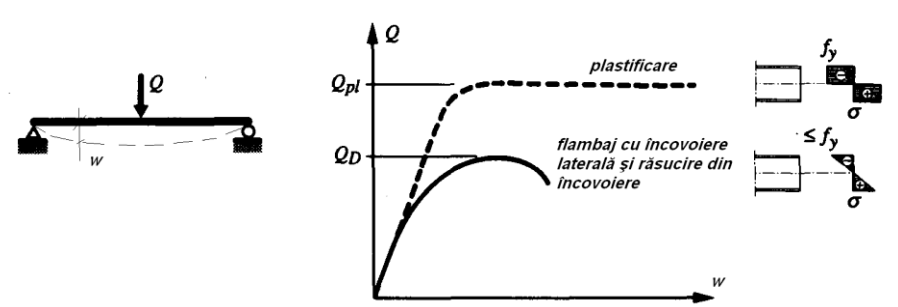
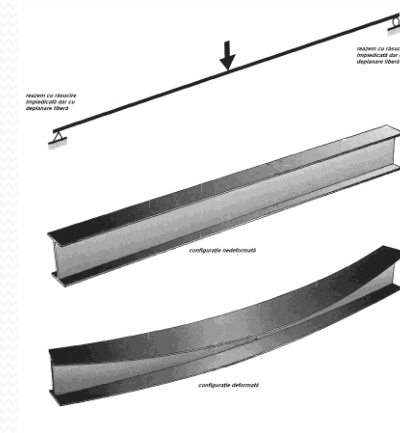
flambaj prin încovoiere și răsucire din compresiune
(flexural-torsional buckling)



Sectiune 1-1



flambaj prin încovoiere laterală și răsucire din încovoiere
(lateral-torsional buckling)



flambaj prin încovoiere laterală și răsucire din încovoiere
(lateral-torsional buckling)



Flambaj prin răsucire sau prin încovoiere-răsucire din forță de compresiune (relațiile din STAS 10108/0-78 anexa B sunt identice cu cele din EN 1993-1-1:2005)

Pentru elementele cu secțiuni deschise cu pereți subțiri există posibilitatea pierderii de stabilitate prin răsucire-încovoiere care se poate realiza la forțe mai mici față de flambajul prin încovoiere.

Relațiile de verificare sunt similare ca la flambajul prin încovoiere din compresiune.

Se înlocuiește $\bar{\lambda}$ cu $\bar{\lambda}_T$ și $N_{cr} = \min(N_{cr,T}, N_{cr,TF})$.

STAS 10108/0-78 anexa B

$$\lambda_{ir} = \pi \sqrt{\frac{EA}{N_{cr}}} = \bar{\lambda}_T \cdot \lambda_1$$

EN 1993-1-1:2005

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{clasele 1, 2 și 3}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{clasa 4}$$

$$N_{cr,T} = \text{forța critică asociată flambajului prin răsucire} \quad N_{cr,T} = \frac{1}{i_c^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_{\omega}}{l_{ET}^2} \right)$$

$N_{cr,TF}$ = forța critică asociată flambajului prin răsucire-încovoiere din calculul elastic cu coeficientul de imperfecțiune α identic cu cel din flambajul prin încovoiere din compresiune dar raportat la axa minoră de încovoiere

$$N_{cr,TF} = \frac{1}{2\beta} \left[(N_{cr,y} + N_{cr,T}) - \sqrt{(N_{cr,y} + N_{cr,T})^2 - 4\beta N_{cr,y} \cdot N_{cr,T}} \right]$$

Flambaj lateral cu răsucire din moment încovoietor

- Grinzile solicitate la încovoiere simplă trebuie să îndeplinească următoarele condiții:
 - de rezistență
 - de stabilitate a elementului
- Capacitatea de rezistență a elementului depinde de:
 - forma secțiunii transversale
 - clasa secțiunii
- Pentru o bară dublu simetrică, cu moment încovoietor constant, simplu rezemată la capete, cu rotire și deplasare laterală împiedicate dar cu deplanare liberă se obține valoarea momentului critic de pierdere a stabilității:

la dreptunghi:

$$M_{cr}^E = \frac{\pi}{l} \sqrt{GI_T EI_z \left(1 + \frac{\pi^2 EI_W}{l^2 GI_T} \right)}$$

$$M_{cr}^E = \frac{\pi}{l} \sqrt{GI_T EI_z} \quad I_\omega = \int_A \omega^2 dA = 0$$

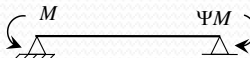

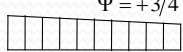
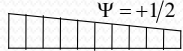
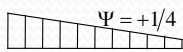


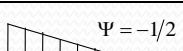
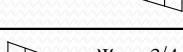

- Având în vedere diversitatea de situații de încărcare și de rezemare, rezolvarea exactă nu este o soluție productivă. În practică se folosesc formule aproximative.
- Ca o alternativă la expresiile anterioare se poate calcula M_{cr} cu relația propusă de Clark și Hall (1960) și Galea (1981) pentru secțiuni cu o axă de simetrie după axa minoră și cu rotirea din încovoiere în jurul axei majore

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z l)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k_z}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z l)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right]^{0,5} \right\}$$

C_1, C_2, C_3 sunt coeficienți care depind de forma diagramei de moment încovoietor și de condițiile de rezemare

Flambaj lateral cu răsucire din moment încovoietor

- Constrângerea încovoierii laterale și a deplanării poate fi luată în considerare prin parametrii k_z și k_y

condiții de încărcare și de rezemare	digrama de moment	k_z	C_1	C_3	
				$\psi_f \leq 0$	$\psi_f > 0$
	$\Psi = +1$ 	1,0 0,5	1,00 1,05	1,000 1,019	
	$\Psi = +3/4$ 	1,0 0,5	1,14 1,19	1,000 1,017	
	$\Psi = +1/2$ 	1,0 0,5	1,31 1,37	1,000 1,000	
	$\Psi = +1/4$ 	1,0 0,5	1,52 1,60	1,000 1,000	
	$\Psi = 0$ 	1,0 0,5	1,77 1,86	1,000 1,000	
	$\Psi = -1/4$ 	1,0 0,5	2,06 2,15	1,000 1,000	0,850 0,650
	$\Psi = -1/2$ 	1,0 0,5	2,35 2,42	1,000 0,950	$1,3 - 1,2\psi_f$ $0,77 - \psi_f$
	$\Psi = -3/4$ 	1,0 0,5	2,60 2,45	1,000 0,850	$0,55 - \psi_f$ $0,35 - \psi_f$
	$\Psi = -1$ 	1,0 0,5	2,60 2,45	$-\psi_f$ $-0,125 - 0,7\psi_f$	$-\psi_f$ $-0,125 - 0,7\psi_f$

- prin definiție la grinzile cu momente concentrate la capete $C_2 z_g = 0$
- $\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}$, I_{fc} și I_{ft} sunt momentele de inerție ale tălpilor comprimate și întinse în raport cu axa minoră a secțiunii
- C_1 se împarte la 1.05 când $\frac{\pi}{k_\omega L} \sqrt{\frac{EI_\omega}{GI_T}} \leq 1,0$, dar $C_1 \geq 1,0$

Flambaj lateral cu răsucire din moment încovoietor

Efectul imperfecțiunilor și al plasticității

- Considerarea imperfecțiunilor geometrice și al tensiunilor reziduale are ca efect faptul că momentul critic elastic nu va fi atins niciodată.
- Relațiile de verificare sunt similare cu cele de la flambaj din compresiune folosind curbele europene de flambaj.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}$$

Metoda generală

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{(\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2)}} \quad \text{dar } \chi_{LT} \leq 1,0$$

$$\phi_{LT} = 0,5 [1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

α_{LT} = factorul de imperfecțiune care depinde de curba de flambaj

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{[W_y f_y / M_{cr}]}$$

M_{cr} = momentul critic elastic

Secțiunea	Limite	Curba de flambaj
Secțiuni laminate I sau H	$h/b \leq 2$	<i>a</i>
	$h/b > 2$	<i>b</i>
Secțiuni sudate I sau H	$h/b \leq 2$	<i>c</i>
	$h/b > 2$	<i>d</i>
Alte secțiuni	---	<i>d</i>

Flambaj lateral cu răsucire din moment încovoietor

Efectul imperfecțiunilor și al plasticității

- **Metoda alternativă pentru secțiuni sudate și din profile laminate**

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{(\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2)}} \quad \text{dar} \quad \begin{aligned} \chi_{LT} &\leq 1,0 \\ \chi_{LT} &\leq 1/\bar{\lambda}_{LT}^2 \end{aligned}$$

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$\bar{\lambda}_{LT,0}$ și β = parametri care pot fi definiți prin anexele naționale

$\bar{\lambda}_{LT,0} \leq 0,4$ valoarea maximă și $\beta \geq 0,75$ valoarea minimă

α_{LT} = factor de imperfecțiune care depinde de curba de flambaj

$\bar{\lambda}_{LT}$ = coeficient de zveltețe dimensional definit ca în metoda generală

M_{cr} = moment critic elastic



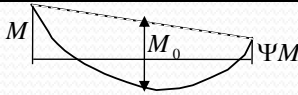
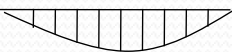


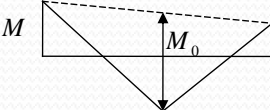



$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{dar} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1,0$$

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \quad \text{dar} \quad f \leq 1,0$$

Secțiunea	Limite	Curba de flambaj (EC3-1-1)
Secțiuni laminate I sau H	$h/b \leq 2$	<i>b</i>
	$h/b > 2$	<i>c</i>
Secțiuni sudate I sau H	$h/b \leq 2$	<i>c</i>
	$h/b > 2$	<i>d</i>

Flambaj lateral cu răsucire din moment încovoietor

Efectul formei diagramei de moment încovoietor

Diagrama de moment încovoietor	k_c
<p style="text-align: center;">$\Psi = +1$</p>  <p style="text-align: center;">$-1 \leq \Psi \leq 1$</p> 	<p style="text-align: center;">1,0</p> <p style="text-align: center;">$\frac{1}{1,33 - 0,33\Psi}$</p>
   	<p style="text-align: center;">0,94</p> <p style="text-align: center;">0,90</p> <p style="text-align: center;">0,91</p>
   	<p style="text-align: center;">0,86</p> <p style="text-align: center;">0,77</p> <p style="text-align: center;">0,82</p>
<p>Ψ - raportul dintre momentele de la capete, cu $-1 \leq \Psi \leq 1$</p>	

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

- Comportarea acestor elemente depinde de zveltețea lor:
 - în domeniul zvelteților mari, flambajul se produce în domeniul elastic prin încovoiere, tipic elementelor comprimate, sau prin încovoiere laterală și torsiune, tipic elementelor încovoiate
 - imperfecțiunile geometrice și tensiunile reziduale induc efecte de ordinul II pronunțate rezultând o interacțiune între plasticitate și instabilitate
- Verificarea se face în doi pași:
 - calcul de rezistență
 - calcul de stabilitate
- Relațiile de calcul sunt destul de complicate, sunt dependente de forma secțiunii și a diagramei de momente încovoietoare și încorporează două moduri de pierdere a stabilității cuplate:
 - flambaj prin încovoiere
 - flambaj prin încovoiere laterală și răsucire
- Formulele sunt pentru secțiuni dublu simetrice, dar investigațiile mai recente (Kaim 2004) au arătat că sunt valabile și pentru secțiuni cu o axă de simetrie.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{pl,Rd}} + \mu_y \left[\frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) M_{el,y,Rd}} + \frac{C_{mz} M_{z,ED}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) M_{el,z,Rd}} \right] \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{pl,Rd}} + \mu_z \left[\frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) M_{el,y,Rd}} + \frac{C_{mz} M_{z,ED}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) M_{el,z,Rd}} \right] \leq 1,0$$

C_{my} și C_{mz} = factorii momentelor echivalente diagramei reale de moment încovoietor

μ_y și μ_z = factori definiți de relațiile:

$$\mu_y = \frac{1 - N_{Ed}/N_{cr,y}}{1 - \chi_y N_{Ed}/N_{cr,y}} \quad \mu_z = \frac{1 - N_{Ed}/N_{cr,z}}{1 - \chi_z N_{Ed}/N_{cr,z}}$$

- Formulele de mai sus sunt bazate pe teoria de ordinul II în domeniul elastic și, ca urmare, **sunt valabile numai pentru secțiunile din clasele 3 și 4.**

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

- Barele cu secțiunea din clasele 1 sau 2 pot flamba în domeniul elasto-plastic iar relațiile de mai sus se modifică devenind:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{pl,Rd}} + \mu_y \left[\frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) C_{yy} M_{pl,y,Rd}} + \alpha^* \frac{C_{mz} M_{z,Ed}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) C_{yz} M_{pl,z,Rd}} \right] \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{pl,Rd}} + \mu_z \left[\beta^* \frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right) C_{zy} M_{pl,y,Rd}} + \frac{C_{mz} M_{z,Ed}}{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) C_{zz} M_{pl,z,Rd}} \right] \leq 1,0$$

$C_{yy}, C_{yz}, C_{zy}, C_{zz}$ = sunt parametrii care simulează efectul încurșurii în domeniul plastic

α^* și β^* = sunt parametrii care simulează efectul încurșurii în domeniul plastic

- Relațiile de calcul prezentate, **la care s-au făcut unele simplificări și calibrarea unor coeficienți prin investigații numerice și experimentale**, au stat la baza a două metode de calcul din EN 1993-1-1:2005 cunoscute sub numele de Metoda 1 și Metoda 2.
- Metoda 1 a fost dezvoltată de un grup de cercetători din Belgia și Franța, iar Metoda 2 a fost dezvoltată de un grup de cercetători din Austria și Germania (relații mai conservative).
- Paragraful 6.3.3 (1) consideră două situații distincte pentru:
 - elemente care nu sunt susceptibile la deformații de răsucire, cum ar fi elementele tubulare în general și la care pierderea de stabilitate prin încovoiere este relevantă
 - elemente care sunt susceptibile la deformații de răsucire, cum ar fi elementele deschise cu pereți subțiri și la care pierderea de stabilitate laterală prin încovoiere și răsucire este relevantă

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

Trebuie satisfăcute următoarele relații de interacțiune:

Flambaj în planul xoy

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

Flambaj în planul xoz

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

$N_{Rk} = A_i f_y$, $M_{i,Rk} = W_i f_y$, $\Delta M_{i,Ed}$ depind de clasa secțiunii elementului

Clasa	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y} N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z} N_{Ed}$

Metoda 1

Factori de interacțiune	Comportare elastic liniară (Clasa 3 sau 4)	Comportare în domeniul plastic (Clasa 1 sau 2)
k_{yy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

Metoda 1

Termeni auxiliari:

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \quad \mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \quad w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5 \quad w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} \quad \alpha_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} \geq 0 \quad C_{my} \text{ și } C_{mz} \text{ sunt factori de echivare cu moment uniform}$$

Pentru clasa 3 sau 4 se consideră $w_y = w_z = 1,0$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$\text{unde } b_{LT} = 0,5 \alpha_{LT} \bar{\lambda}_0^2 \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$\text{unde } c_{LT} = 10 \alpha_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$\text{unde } d_{LT} = 2 \alpha_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) - e_{LT} \right] n_{pl} \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$$

$$\text{unde } e_{LT} = 1,7 \alpha_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$$

Termeni auxiliari (continuare):

$$\lambda_{\max} = \max(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z);$$

$\bar{\lambda}_0$ - coeficient de zveltețe normalizat pentru flambaj lateral cu răsucire din moment încovoiator uniform $\Psi_y = 1,0$

$\bar{\lambda}_{LT}$ - coeficient de zveltețe normalizat pentru flambaj lateral cu răsucire

$$\text{dacă } \bar{\lambda}_0 \leq 0,2 \sqrt{C_1} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}} \right)} \rightarrow C_{my} = C_{my,0}; C_{mz} = C_{mz,0}; C_{mLT} = 1,0;$$

$$\text{dacă } \bar{\lambda}_0 > 0,2 \sqrt{C_1} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}} \right)} \rightarrow C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \alpha_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \alpha_{LT}} \quad C_{mz} = C_{mz,0};$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{\alpha_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}} \right)}} \geq 1,0;$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} \text{ pentru clasa de secțiune 1, 2 sau 3;}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}} \text{ pentru clasa de secțiune 4}$$

$N_{cr,y}$ - forța critică asociată flambajului lateral prin încovoiere în jurul axei majore y

$N_{cr,z}$ - forța critică asociată flambajului lateral prin încovoiere în jurul axei minore z

$N_{cr,T}$ - forța critică asociată flambajului prin răsucire

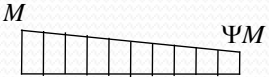
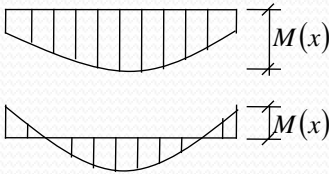
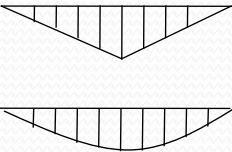
I_T - momentul de inerție pentru răsucirea liberă

I_y - momentul de inerție în jurul axei y

$$C_1 = \left(\frac{1}{k_c} \right)^2 \text{ unde } k_c \text{ din tabelul anterior}$$

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

- Metoda 1

Diagrama de moment	$C_{mi,0}$
	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\Psi_i + 0,36(\Psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI_i \delta_x }{l^2 M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ <p>$M_{i,Ed}(x)$ este momentul maxim dintre $M_{y,Ed}$ sau $M_{z,Ed}$ determinat prin calcul de ordinul I</p> <p>δ_x deplasarea maximă dintre δ_z (din $M_{y,Ed}$) sau δ_y (din $M_{z,Ed}$)</p>
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ $C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

Metoda 2

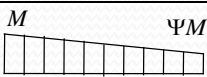
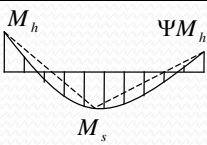
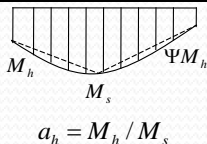
Factori de interacțiune	Tipul de secțiune	Proprietăți elastice (Clasa de secțiune 3 sau 4)	Proprietăți plastice (Clasa de secțiune 1 sau 2)
k_{yy}	secțiuni I sau H și secțiuni tubulare rectangulare	$C_{my} \left(1 + 0.6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0.6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	secțiuni I sau H și secțiuni tubulare rectangulare	k_{zz}	$0,6k_{zz}$
k_{zy}	secțiuni I sau H și secțiuni tubulare rectangulare	$0,8k_{yy}$	$0,6k_{yy}$
k_{zz}	secțiuni I sau H	$C_{mz} \left(1 + 0.6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0.6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	secțiuni tubulare rectangulare	$\leq C_{mz} \left(1 + 0.6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0.2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

În cazul secțiunilor I sau H și al secțiunilor tubulare rectangulare sollicitate la compresiune cu încovoiere într-un plan ($M_{y,Ed}$), k_{zy} poate fi luat zero

Factori de interacțiune	Proprietăți elastice (Clasa de secțiune 3 sau 4)	Proprietăți plastice (Clasa de secțiune 1 sau 2)
k_{yy}	k_{yy} din tabelul alăturat	k_{yy} din tabelul alăturat
k_{yz}	k_{yz} din tabelul alăturat	k_{yz} din tabelul alăturat
k_{zy}	$\left[1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ pentru $\bar{\lambda}_z < 0,4$; $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z$ $\leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
k_{zz}	k_{zz} din tabelul alăturat	k_{zz} din tabelul alăturat

Flambajul elementelor comprimate și încovoiate

Metoda 2

Diagrama de moment	Interval		C_{my}, C_{mz} și C_{mLT}	
			încărcare uniformă	încărcare concentrată
	$-1 \leq \Psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\Psi \geq 0,4$	
 $a_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \Psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s \leq 0$	$0 \leq \Psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \Psi \leq 0$	$0,1(1 - \Psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\Psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 $a_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \Psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h \leq 0$	$0 \leq \Psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \Psi \leq 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\Psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1 + 2\Psi)$

α_s sau α_h se iau pozitivi când momentul încovoietor întinde fibra de jos și negativi când întinde fibra de sus
 Pentru elemente cu noduri deplasabile lateral factorul de echivalare cu moment uniform trebuie luat $C_{my} = 0.9$ sau $C_{mz} = 0.9$
 Factorii C_{my}, C_{mz} și C_{mLT} se obțin din diagramele de momente încovoietoare între secțiunile cu legături relevante după cum urmează:

factorul de moment	încovoiere în jurul axei	legături în direcția
C_{my}	$y - y$	$z - z$
C_{mz}	$z - z$	$y - y$
C_{mLT}	$y - y$	$y - y$

STAS 10108/0-78 Elemente supuse la forță axială și încovoiere

- **Bare comprimate și încovoiate într-un plan principal**

- a. Verificări de rezistență

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq R$$

- b. Verificări de stabilitate (axa y cuprinsă în planul inimii la secțiuni dublu T)

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} + \frac{c_x M_x}{\varphi_g \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_E}\right) W_x} \leq R \quad \text{cu } \sigma_E = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad \varphi_g \rightarrow \lambda_{tr} = \gamma \frac{\mu l}{i_y}, \quad \gamma \rightarrow \frac{l^2 I_r}{h^2 I_y}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

pentru $N/\varphi A \leq 0.15R \rightarrow$ verificarea se face cu $\sigma = \frac{N}{\varphi A} + \frac{M_x}{\varphi_g W_x} \leq R$

- **Bare solicitate la compresiune și încovoiere oblică**

- a. Verificări de rezistență

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_z}{W_z} + \frac{M_y}{W_y} \leq 1,1R$$

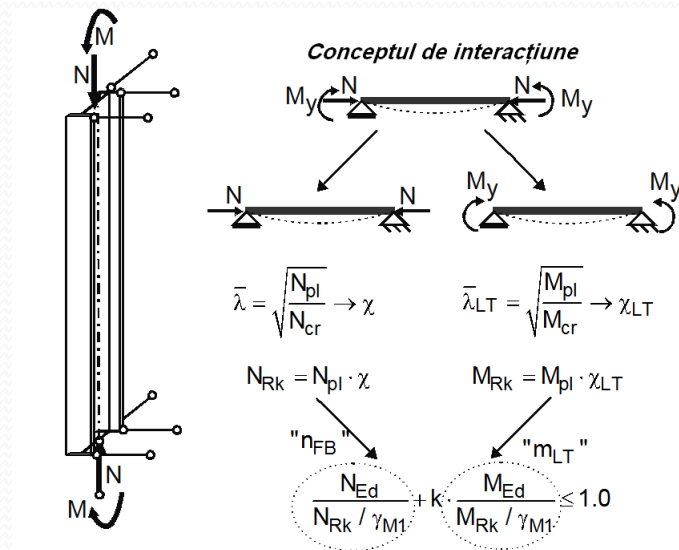
- b. Verificări de stabilitate (axa y cuprinsă în planul inimii la secțiuni dublu T)

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} + \frac{c_x M_x}{\varphi_g \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_E}\right) W_x} + \frac{c_y M_x}{\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_E}\right) W_y} \leq R$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} \leq 1,0$$

Flambajul barelor drepte solicitate la încovoiere oblică și forță axială de compresiune

$f\left(\frac{N}{N_u}, \frac{M_y}{M_{uy}}, \frac{M_z}{M_{uz}}\right) \leq 1.0 \rightarrow$ relații neliniare de interacțiune prin intermediul factorilor de interacțiune




Conceptul de interacțiune pentru elementele solicitate la încovoiere cu forță axială de compresiune (paragraf 6.3.3 din EN 1993-1-1:2005)

Forța axială de compresiune trebuie privită ca o caracteristică a secțiunii în calculul de ordinul II pentru a se putea face o suprapunere a efectelor

Flambajul barelor drepte solicitate la încovoiere oblică și forță axială de compresiune

$$f\left(\frac{N}{N_u}, \frac{M_y}{M_{uy}}, \frac{M_z}{M_{uz}}\right) \leq 1.0 \quad \rightarrow \quad \text{relații neliniare de interacțiune prin intermediul factorilor de interacțiune}$$

Conceptul de sveltețe generalizată normalizată



LEA/MNA GMNIA

imperfecțiuni geometrice *tensiuni reziduale*

$$\bar{\lambda}_{GS} = \sqrt{\frac{LPF_{MNA}}{LPF_{LBA}}} = \sqrt{\frac{R_{pl}}{R_{cr}}}$$

e_0

$\pm 0.3 f_y$ $h/b > 1.2$

$\pm 0.5 f_y$ $h/b \leq 1.2$

$$R_k = R_{pl} \cdot \chi_{GS} \quad \chi_{GS} = \frac{R_{GMNIA} ?}{R_{pl}}$$

$$\frac{R_k}{\gamma_{M1}} \geq 1.0$$

Conceptul cuprinde “metoda cazului general de încărcare” folosită în teoria plăcilor plane și curbe și “metoda generală” pentru calculul stâlpilor din paragraful 6.3.4 din EN 1993-1-1:2005.

$LPF_{MNA} = R_{pl}$ capacitatea de rezistență plastic calculată cu metoda de analiză neliniară fizică (de material).

$LPF_{LBA} = R_{cr}$ capacitatea de rezistență la flambaj lateral

$$R_{b,d} = \frac{\chi_{GS} \cdot R_{pl}}{\gamma_{M1}} \geq 1.0 = \text{capacitatea de rezistență la flambaj}$$

LEA – analiză elastic-liniară

MNA – analiză neliniară de material

GMNIA – analiză neliniară geometrică și de material a structurilor cu imperfecțiuni (Geometrically materially nonlinear analyses of imperfect structures)

Flambajul barelor drepte solicitate la încovoiere și forță axială de compresie

- de regulă verificarea se face cu o relație de interacțiune care ar trebui să îndeplinească condițiile de la solicitările simple de încovoiere ($n=0$) și flambaj ideal din compresie ($m=0$).
- conform STAS 10108, dar și EC3-1-1, în loc de momentul de ordinul I se folosește momentul de ordinul II,

$$M^{II} = M^I / (1 - P/P_{cr,E})$$

⇒ relația de verificare normalizată

$$\sigma = \frac{n}{\varphi} + \frac{c_x m_x}{k \cdot \varphi_{g0}} \leq 1$$

↳ factorul de corecție al lui Perry pentru momentul de ordinul I,

$$k = \left(1 - P/P_{cr,E}\right) = \left(1 - \sigma/\sigma_{cr,E}\right) = \left(1 - n/n_{cr,E}\right)$$

$$n = \frac{N}{N_{cap}} = \frac{N}{A * R}$$

$$m = \frac{M}{M_{cap}} = \frac{M}{W * R}$$

$$\sigma_{cr,E} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

$\varphi, \varphi_{g0}, c_x, A, W, R, E, \lambda$ = constante

m și n = variabile

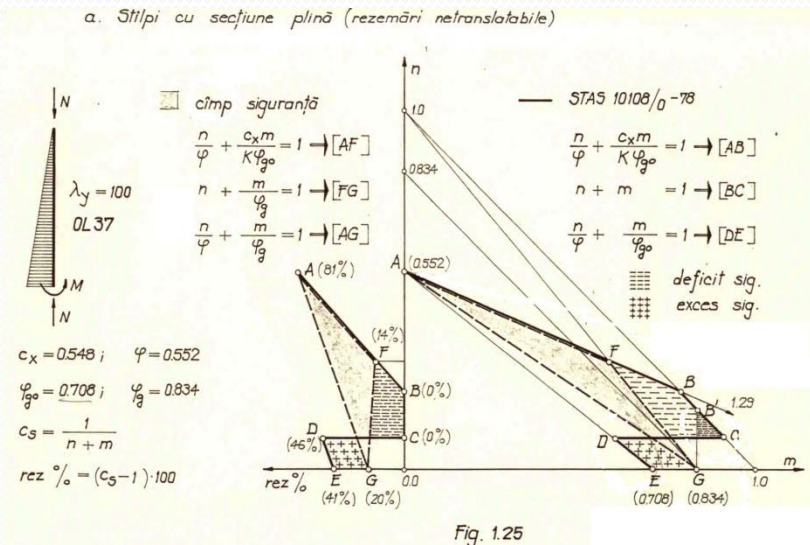
$k = f(n)$ = gradul I

⇒ relația de interacțiune = funcție de gradul II în n ,

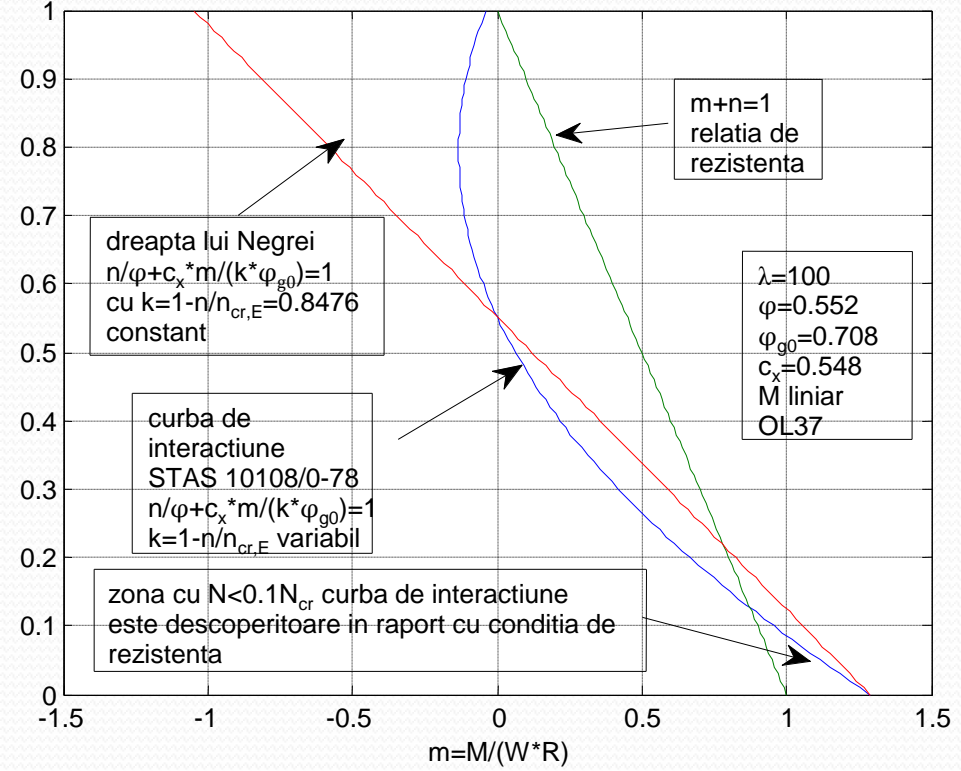
$$\frac{\varphi_{g0}}{n_{cr,E}} n^2 - \varphi_{g0} \left(\frac{\varphi}{n_{cr,E}} + 1 \right) n - c_x \cdot \varphi \cdot m + \varphi_{g0} \cdot \varphi \leq 1 \quad \iff \quad c_1 n^2 + c_2 n + c_3 m + c_4 = 0$$

Flambajul barelor drepte solicitate la încovoiere și forță axială de compresiune

curbe de interacțiune-dreapta lui Negrei si de ce este necesara conditia de rezistenta



n=N/(A*R)



Calculul formal la acțiunea seismică și comportarea reală a structurilor la care se dezvoltă articulații plastice prin incursiuni în domeniul plastic

Codul P100-1/2006 conține recomandări minimale .

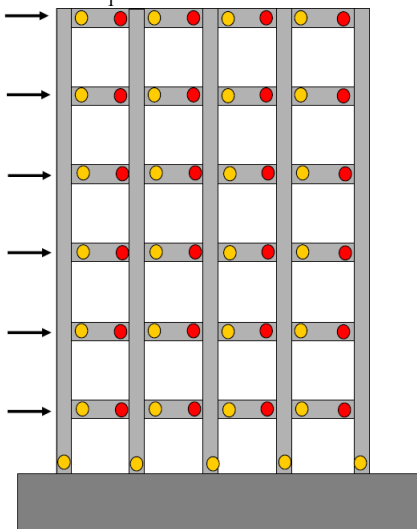
Procedeul de calcul conține un formalism prin care articulațiile plastice s-ar forma simultan în secțiunile critice acceptate.

În realitate articulațiile plastice apar progresiv, punând în evidență redundanța structurală.

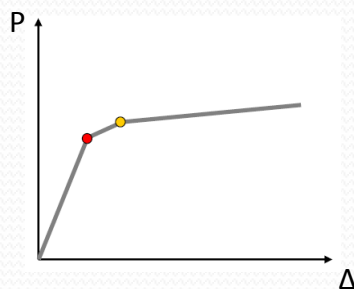
Orice calcul strict în domeniul elastic, la forțe mai mici decât cele asociate unui răspuns elastic, deci în situația în care elementele de rezistență sunt capabile să dezvolte articulații plastice, este complet eronat, deoarece elementele se vor încărca suplimentar până la dezvoltarea articulațiilor plastice.

Consecința este reducerea factorului de comportare care tinde către 1 și supraîncărcarea fundațiilor sau, în cazul structurilor metalice, pierderea stabilității elementelor comprimate.

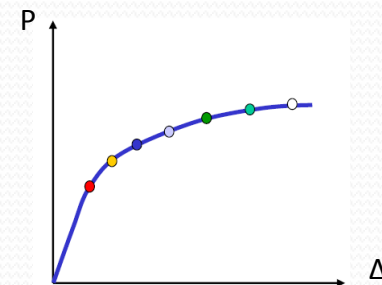
$$V_d = \frac{V_e}{\frac{\alpha_u}{\alpha_1} q}$$



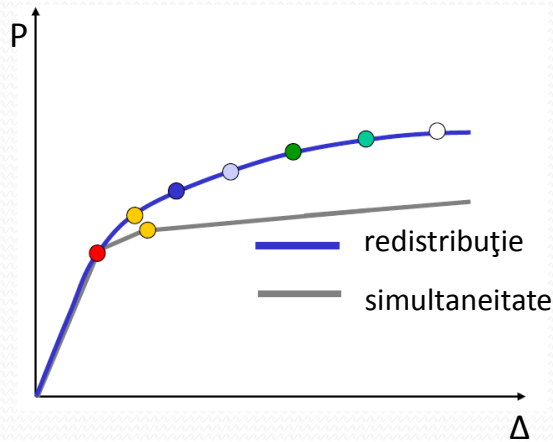
Conceptul calculului elasto-plastic = apariția simultană a articulațiilor plastice



Creșterea redundanței prin proiectarea apariției articulațiilor plastice



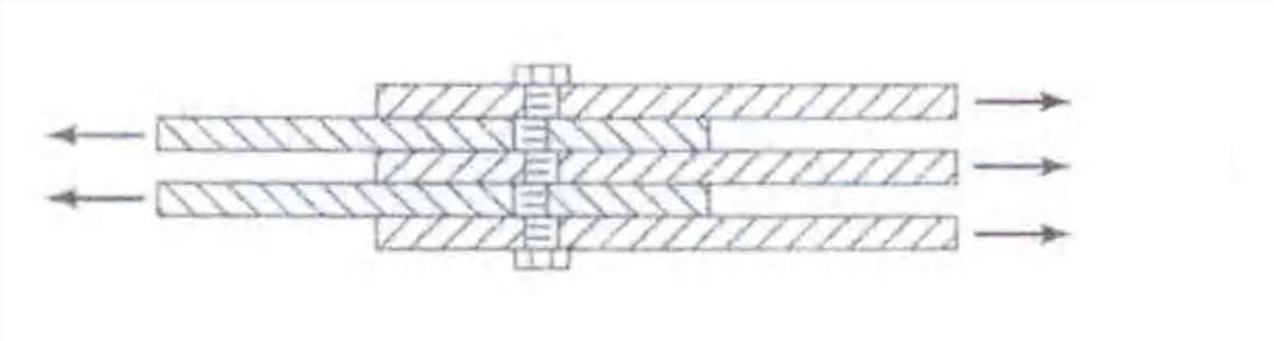
Calculul formal la acțiunea seismică și comportarea reală a structurilor la care se dezvoltă articulații plastice prin incursiuni în domeniul plastic



Apariția simultană a articulațiilor plastice:

- suprarezistență redusă
- stabilitate redusă

Revizuirea relației privind determinarea capacității de rezistență la forfecare pentru șuruburi



Bolted connections generally consist of lap or butt joints or some combination of them, but there are other cases. For instance, there are occasionally joints in which more than three members are being connected and the bolts are in multiple shear, as shown in Fig. 12.2(b). In this figure, you can see how the loads are tending to shear this bolt on four separate planes (quadruple shear). Although the bolts in this connection are being sheared on more than two planes, the usual practice is to consider no more than double shear for strength calculations. It seems rather unlikely that shear failures can occur simultaneously on three or more planes. Several other types of bolted connections are discussed in this chapter and the next. These include bolts in tension, bolts in shear and tension, etc.

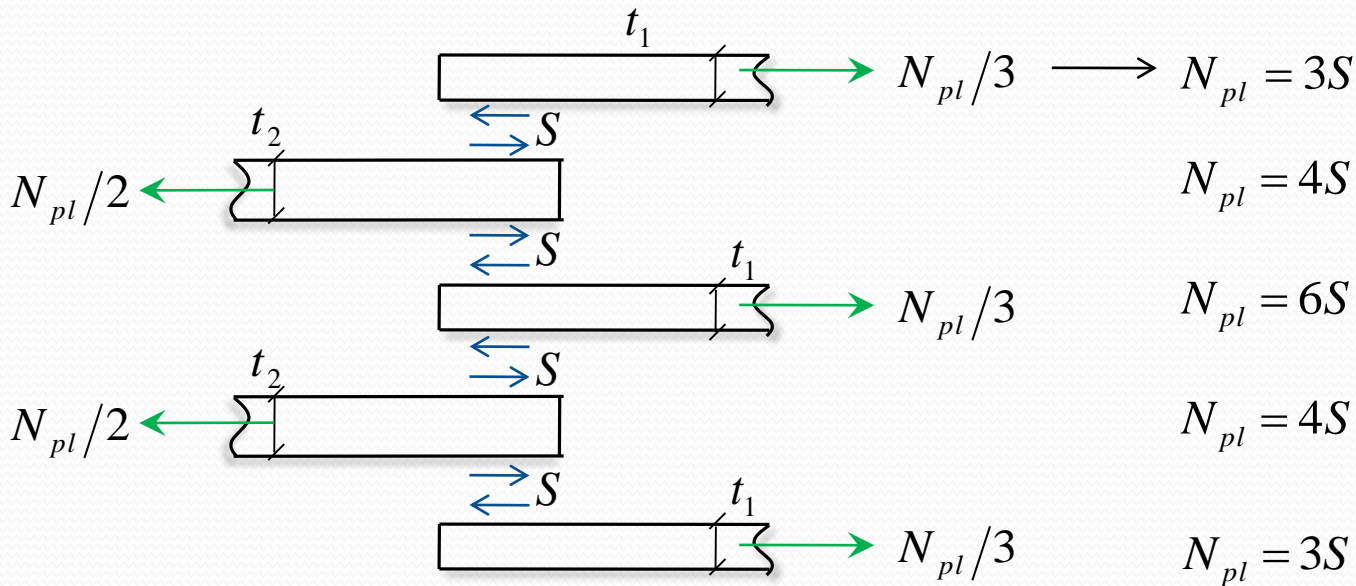
STRUCTURAL STEEL DESIGN

FOURTH EDITION

JACK C. McCORMAC

Revizuirea relației privind determinarea capacității de rezistență la forfecare pentru șuruburi

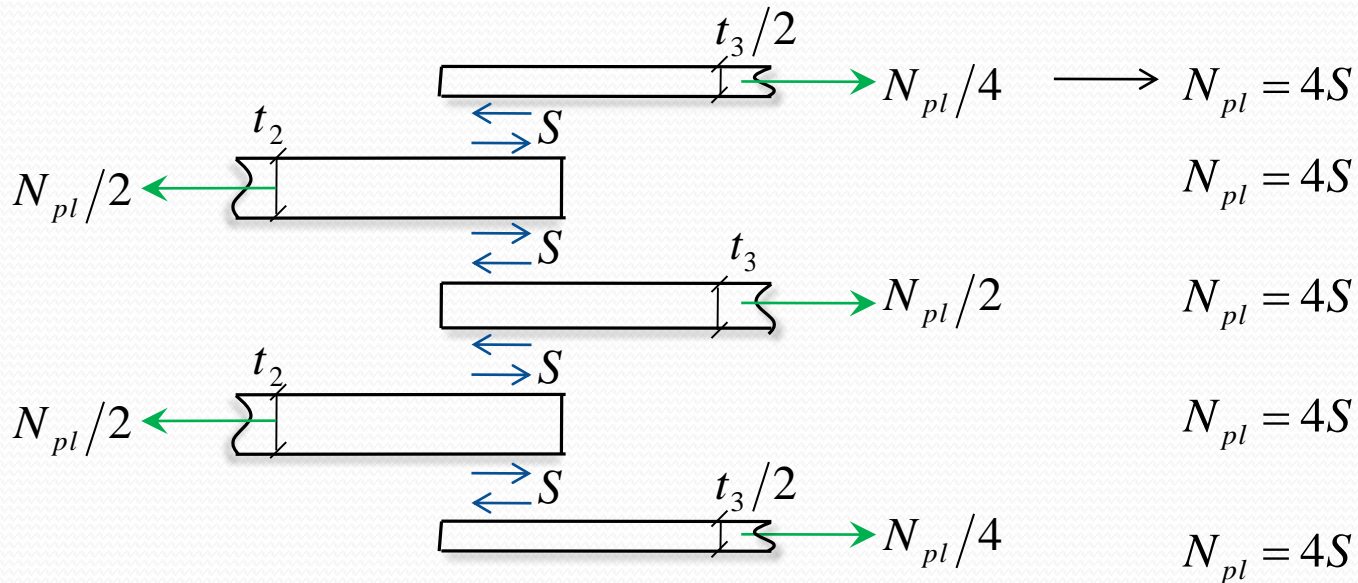
$$S_{Rd,s} = m A_{fs} \tau_c ?$$



$$N_{pl} = 3S \longrightarrow S_{Rd,s} = 3A_f \tau_c$$

Revizuirea relației privind determinarea capacității de rezistență la forfecare pentru șuruburi

$$S_{Rd,s} = m A_{fs} \tau_c ?$$



- Secțiunile de forfecare la șuruburi vor fi egal solicitate numai în cazul în care grosimea platbandelor este proporțională cu solicitarea.

CONCLUZII

- Regulile generale din EC 1993-1-1 constituie suportul procedurilor de calcul pentru proiectarea structurilor din oțel. Partea I a codului conține principiile modelării structurale și regulile pentru determinarea capacității de rezistență a elementelor structurale.
- Simpla prezentare a unor exemple numerice fără înțelegerea fenomenelor , a modului real de comportare și a relațiilor de calcul poate conduce la afirmații eronate.
- Este evident că relațiile de calcul din codul european sunt mult mai complexe și ca urmare mult mai complicate decât cele din standardul românesc 10108/0-78. Un calcul manual va conduce inevitabil la rezultate greșite. Prin urmare programele de calcul specializate reprezintă singurul mijloc de salvare, cu condiția de a cunoaște bine codul de proiectare pentru a ști ce date să introducem, ce să cerem și în final de a înțelege rezultatele.



Vă mulțumesc pentru atenție.