

Curs 11

UTILIZAREA PROFILELOR DIN OȚEL FORMATE LA RECE ÎN CONSTRUCȚII

1. Aspecte specifice ale comportării profilelor din oțel cu pereți subțiri, formate la rece

1.1 Generalități

Profilele metalice formate la rece se întâlnesc în mai toate aspectele vieții moderne. Utilizările acestora sunt multe și variate, existând în zilele noastre o gamă largă de produse, cu o mare diversitate de forme și mărimi.

Apariția în construcții a profilelor formate la rece datează de pe la mijlocul secolului XIX, în SUA și Marea Britanie. Utilizarea pe scară largă a acestor profile a început însă doar din a doua jumătate a secolului trecut.

Până nu demult, profilele formate la rece au fost folosite preponderent ca elementele secundare ale structurilor de rezistență ale clădirilor, în alcătuirea învelitorilor, ca pane pentru acoperiș sau rigle pentru pereți. Tot mai mult, în ultimii ani, aceste profile sunt utilizate și pentru alcătuirea structurii de rezistență propriu-zise a clădirilor.

Un produs specific, cu largă aplicabilitate, sunt tablele cutate, utilizate pentru realizarea învelitorilor clădirilor. Tablele pentru învelitori se produc în sortimente variate, începând cu tablele cutate obișnuite, utilizate pentru închiderile halelor industriale, până la panourile speciale pentru realizarea unor fațade deosebite. Sistemele metalice ușoare, pentru realizarea de pereți cortină, sunt de asemenea utilizate pe scară largă. Tablele cutate se utilizează, în ultimii 15 ani, ca o componentă de bază în alcătuirea planșelor mixte oțel-beton ale clădirilor multietajate.

Piața de desfacere a produselor din oțel formate la rece pentru construcții continuă să se dezvolte în întreaga lume. Aceasta se datorează și noilor tehnologii de protecție anticorozivă, care conduc la creșterea competitivității produselor în domenii în care, până nu demult, utilizarea lor era restricționată ca urmare a riscului ridicat la coroziune. Studii recente au arătat că degradarea protecției anticorozive pentru elementele din oțel zincate este suficient de lentă, astfel încât se poate garanta o durată medie de viață de 60 ani.

În mod obișnuit, profilele formate la rece au grosimi de până la 3mm. Dezvoltări recente ale tehnologiilor de fabricație permit însă formarea la rece a unor secțiuni cu grosimi de până la 25mm. Secțiunile deschise, cu grosimi de până la 8mm, au început să se utilizeze frecvent în construcții. Oțelurile din care se obțin aceste profile au limite de curgere cuprinse între 250-550MPa (Hancock, 1997). Sunt însă tot mai des utilizate și oțeluri cu limite de curgere superioare acestor valori.

Utilizarea profilelor cu grosimi reduse și a oțelurilor cu rezistențe ridicate implică rezolvarea unor probleme de proiectare deosebite, care nu sunt întâlnite în proiectarea structurilor din oțel clasice. Instabilitatea structurală se produce mai repede, ca rezultat al voalării pereților secțiunii transversale, care interacționează cu flambajul global al elementului. Utilizarea oțelurilor cu rezistențe ridicate poate face însă ca tensiunea critică corespunzătoare voalării pereților secțiunii transversale să fie aproximativ egală cu limita de curgere.

Formele secțiunilor transversale în cazul profilelor formate la rece sunt de obicei mai complexe decât ale celor laminate la cald sau sudate, cum ar fi secțiunile I sau U. Secțiunile formate la rece au de regulă forme monosimetrice, chiar nesimetrice, având în mod normal rigidizări suplimentare de capăt pe tălpi și chiar rigidizări intermediare pe inimi sau pe tălpile cu lățime mare. Așa cum se arată în Figura 1, prin formare la rece pot fi produse diverse secțiuni simple sau complexe.



Fig. 1: Secțiuni formate la rece (Trebilcock, 1994)

Pentru calculul structurilor realizate din profile de oțel formate la rece, au fost elaborate norme de calcul specifice. În SUA, prima ediție a normelor AISI (American Iron and Steel Institute) pentru proiectarea elementelor din oțel formate la rece a apărut în 1946; aceste norme s-au actualizat cu regularitate până la ediția lor cea mai recentă din 1999. Prima ediție a normelor americane unificate, *North American Specification* (AISI, 2001), a fost publicată în 2001. Această normă se aplică în SUA, Canada și Mexic, pentru proiectarea elementelor din oțel formate la rece.

În Australia și Noua Zeelandă, ultima versiune a normei pentru proiectarea structurilor din oțel formate la rece a fost publicată în decembrie 1996 (AS/NZS, 1996). Noua ediție, 2003, este în curs de apariție.

În Europa, comitetul ECCS (European Convention for Constructional Steelwork) a elaborat recomandările europene pentru proiectarea elementelor din oțel formate la rece, pentru prima oară, în anul 1987 (ECCS, 1987). De atunci, acest document european a fost revizuit și publicat în 1996 ca și prenormă europeană Eurocode 3, Partea 1.3 (ENV1993-1-3, 1996). În prezent, este disponibilă în versiunea finală și Euronorma corespunzătoare: EN 1998-1-3.

În România, există din anul 1997 versiunea tradusă și adaptată a ENV1993-1-3, cu denumirea "Normativ pentru calculul elementelor din oțel cu pereți subțiri formate la rece" indicativ NP012-1997 (NP012-1997). Standardul de profil, STAS 10108/2-1983, mai vechi, este bazat, în principal, pe noema AISI-1968.

Domeniile de utilizare ale profilelor din oțel formate la rece, ca elemente de rezistență, sunt variate, mergând de la industria construcțiilor până la industria automobilelor, în aeronautică, construcții navale, industria chimică etc.

1.2 Profile din oțel formate la rece

1.2.1 Tipuri de profile din oțel formate la rece

Elementele structurale din oțel formate la rece pot fi clasificate în două tipuri distincte:

1. Profile în cadrul structurii de rezistență propriu-zise a clădirii;
2. Panouri de tablă profilată pentru învelitoare sau planșee.

Prima categorie include, așa cum se arată în Figura 2, secțiuni deschise simple (Figura 2a), secțiuni compuse deschise (Figura 2b) sau secțiuni compuse închise (Figura 2c). În mod obișnuit, înălțimea secțiunilor variază de la 50-70mm până la 350-400mm, cu grosimi de aproximativ 1-6mm.

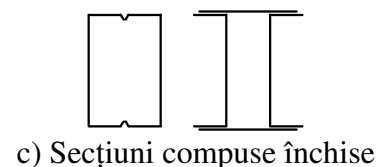
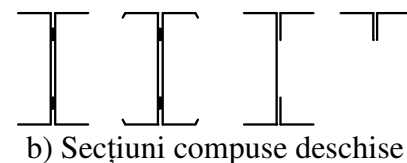
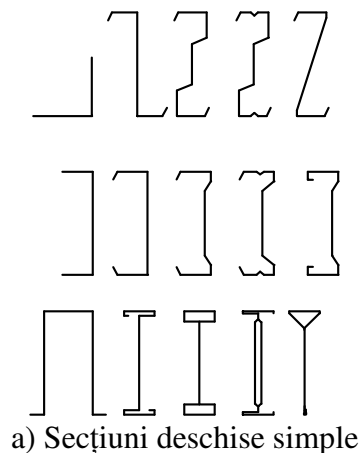


Fig. 2: Tipuri de secțiuni formate la rece

Panourile din tablă, realizate din table profilate sau casete, sunt arătate în Figura 3. Înălțimea panourilor variază de obicei între 20 și 200mm, în timp ce grosimile variază între 0.4-1.5mm.

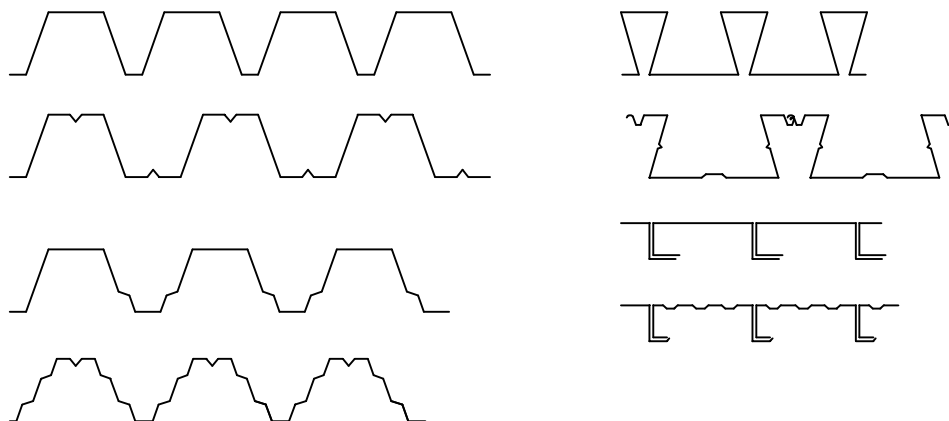


Fig. 3: Table profilate și casete

Figura 4 arată câteva exemple de table cutate de tip LINDAB.



a) Profile de tablă pentru acoperiș

b) Profile de tablă pentru perete

c) Tablă cu profil înalt pentru planșee

Fig. 4: Profile de tablă cutată de tip LINDAB

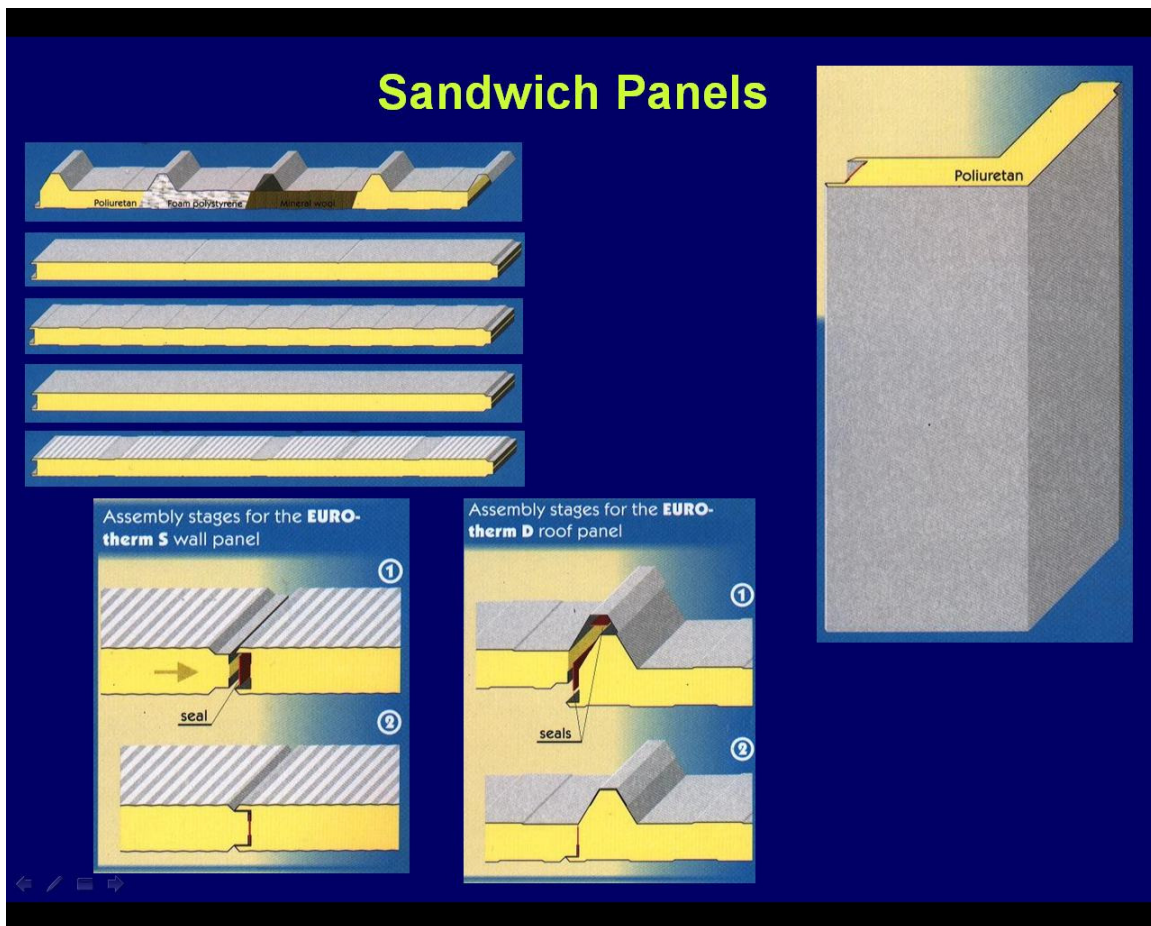


Fig. 4a: Panouri Sandwich

Pentru construcții, profilele formate la rece prezintă următoarele avantaje (Yu, 2000):

1. Prin formare la rece, pot fi realizate în mod economic profile cu secțiuni adaptate pentru aplicații specifice;
2. Folosirea profilelor formate la rece este mai economică decât laminatele la cald, pentru încărcări și deschideri relativ reduse;
3. Profilele formate la rece pot fi realizate astfel încât să poată fi transportate în mod compact și economic (cazul profilelor Z de tip LINDAB, cu tălpi inegale, care pot fi suprapuse pentru transport și ambalare);
4. Din punct de vedere structural, panourile din tablă cutată pentru învelitori sau pentru planșee ușoare au rolul de a susține sarcini perpendiculare pe planul lor, dar pot acționa, de asemenea, și ca diafragme la acțiunea forțelor orizontale.

Comparativ cu alte materiale de construcție, cum ar fi lemnul sau betonul, pentru elementele din oțel formate la rece pot fi evidențiate următoarele avantaje:

1. Greutate redusă;
2. Rezistență și rigiditate ridicate;
3. Fabricație ușoară;
4. Montaj rapid și ușor;

5. Acuratețe sporită a detaliilor;
6. Calitate uniformă;
7. Costuri reduse la transport și manipulare;
8. Sunt incombustibile, nu putrezesc și sunt insensibile la acțiunea insectelor;
9. Sunt reciclabile.

1.2.2 Tehnologii de fabricare

Elementele formate la rece pot fi fabricate prin următoarele procedee:

1. Laminare la rece;
2. Îndoire la rece;
3. Presare la rece.

În cazul laminării la rece, banda de oțel din care se realizează profilul este trecută succesiv printre două trenuri de role, îndoirea făcându-se progresiv într-o secvență de tipul celei prezentate în Figura 5.

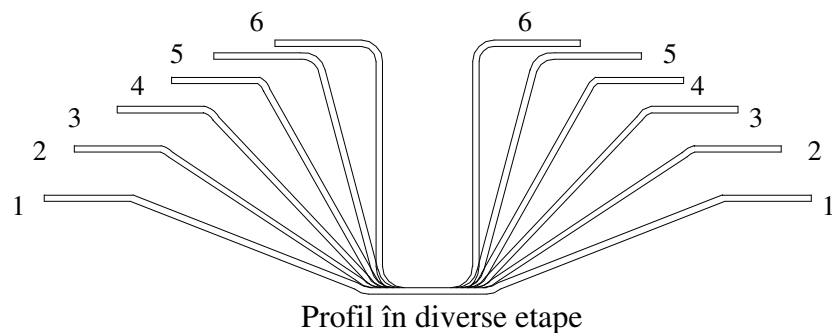
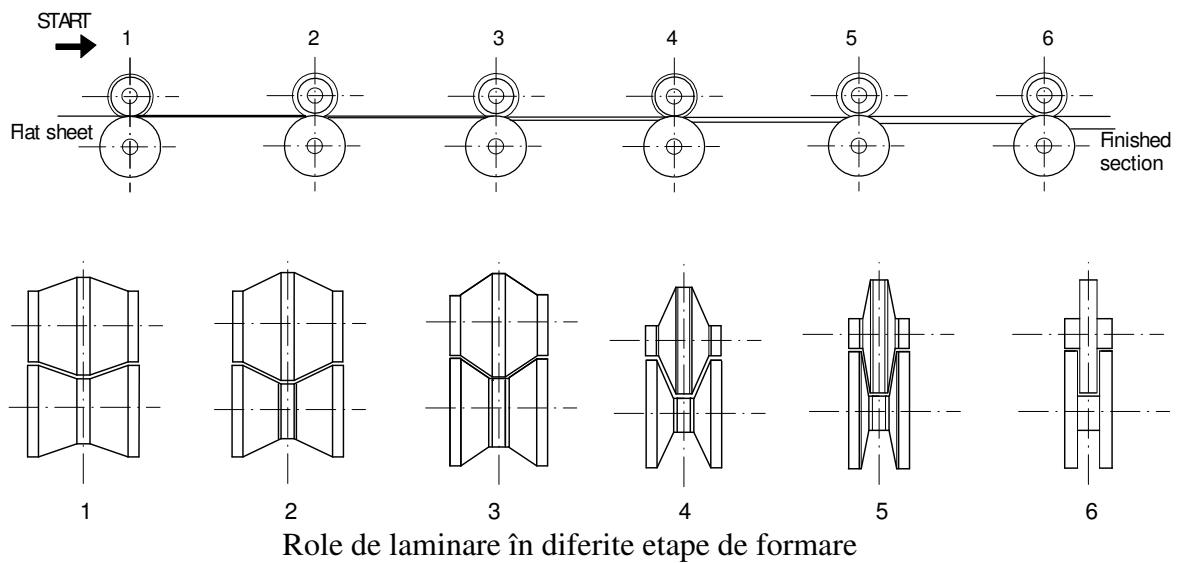


Fig. 5: Etape în laminarea la rece a unei secțiuni simple (Rhodes, 1991)

Figurile 6 (a și b) arată două linii de laminare pentru produse liniare (profile), respectiv pentru panouri de tablă cutată.

Schimbarea rolor de laminare la rece, pentru a obține profile de forme și/sau mărimi diferite, este consumatoare de timp și stagnează producția. Pe liniile moderne de laminare sunt folosite de obicei role ajustabile, care permit o schimbare rapidă pentru diferite game de mărimi ale secțiunii transversale.

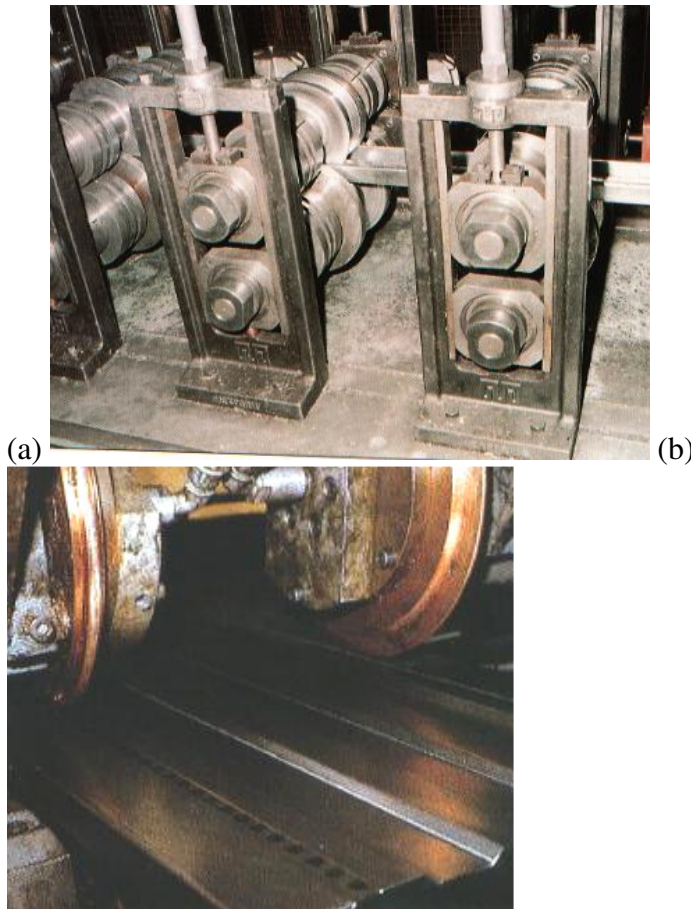


Fig. 6: Linii de laminare industriale

a) profile ; b) table

Îndoirea la rece este un procedeu mai simplu decât laminarea, dar și are aplicabilitate limitată. Profile cu lungimi reduse și cu geometrie simplă se pot realiza prin îndoiri succesive, așa cum se arată în Figura 7.

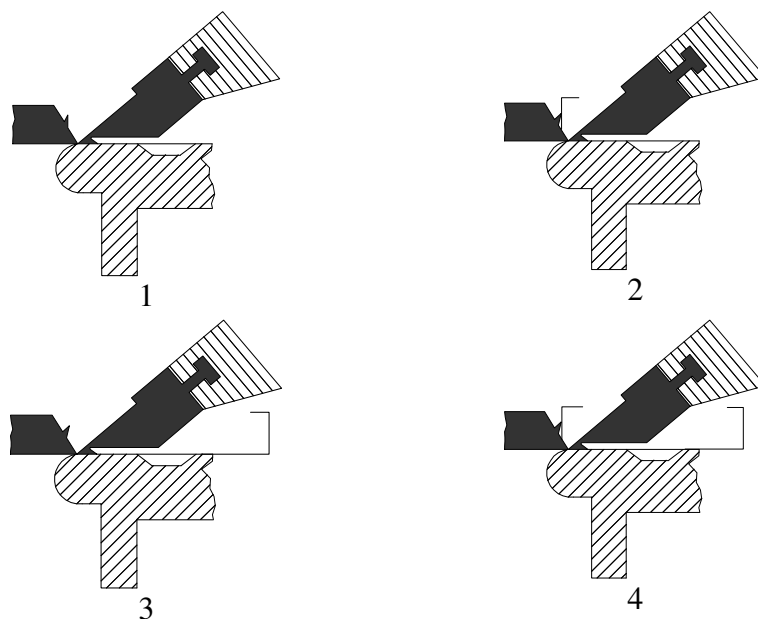


Fig. 7: Îndoirea la rece

Presarea la rece este mai răspândită decât îndoirea și permite producerea unei mari varietăți de forme secționale. Prin acest procedeu, o secțiune este formată prin presarea tablei, așa cum se arată în Figura 8. Fiecare îndoitură este obținută separat. Acest procedeu are, de asemenea, limitări în ceea ce privește geometria și lungimea elementelor care pot fi produse.

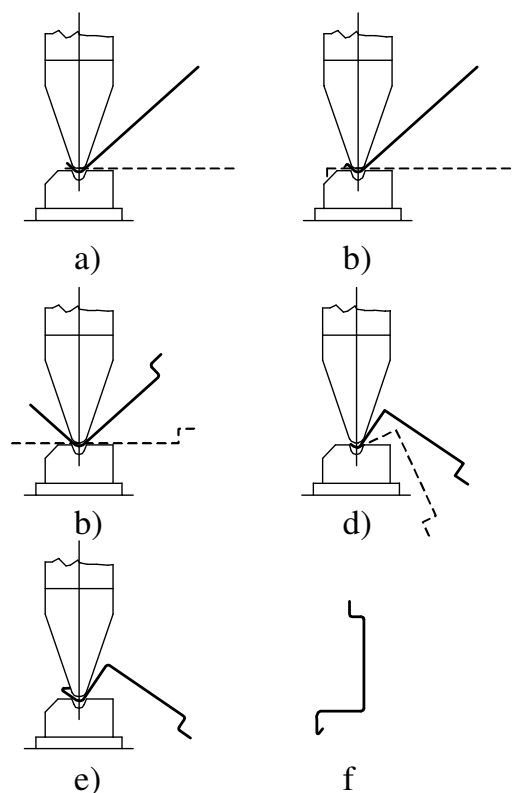


Fig. 8: Presarea la rece

Laminarea la rece este utilizată în mod uzual pentru producerea de cantități mari de profile cu aceeași formă a secțiunii transversale. Costurile inițiale ale investiției sunt ridicate, dar manopera ulterioară este redusă. Presarea la rece este utilizată, în mod uzual, pentru a produce cantități reduse de profile, atunci când este cerută o varietate mare de forme ale secțiunilor transversale.

1.2.3 Caracteristici ale profilelor formate la rece datorate procesului de fabricație

Procedeul de fabricație influențează anumite caracteristici mecanice și geometrice ale profilelor formate la rece. În primul rând, formarea la rece produce modificarea curbei caracteristice a oțelului. Prin ecruisare, laminarea la rece conduce la creșterea limitei de curgere, uneori și a rezistenței la rupere, fenomen mai accentuat în colțurile profilelor și apreciabil în inimi și tălpi. Presarea la rece lasă aceste caracteristici aproape neschimbate în inimi și tălpi. Evident, ecruisarea nu se produce în cazul secțiunilor laminate la cald, așa cum se arata în Tabelul 1 (Rondal, 1998).

Tabel 1. Creșterea limitei de curgere și a rezistenței la rupere funcție de procedeul de fabricație a profilelor

Procedeul de fabricație	<i>Laminare la cald</i>	Formare la rece	
		Laminare	Presare

Limita de curgere	Colțuri	--	Ridică	Ridică
	Inimi	--	Moderată	--
Rezistența la rupere	Colțuri	--	Ridică	Ridică
	Inimi	--	Moderată	--

Așa cum s-a menționat deja, creșterea limitei de curgere se datorează ecruisării și depinde de tipul de oțel utilizat. Creșterea rezistenței la rupere se datorează fenomenului de îmbătrânire, care fragilizează materialul, a cărui ductilitate a fost deja redusă prin ecruisare și depinde de caracteristicile metalurgice ale oțelului. Figura 9 prezintă comparativ curbele caracteristice ale oțelului înainte și după ecruisare.

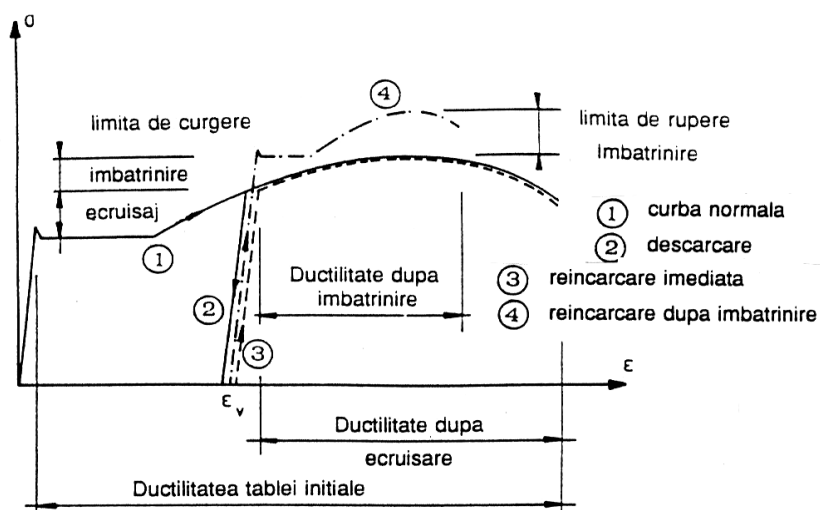
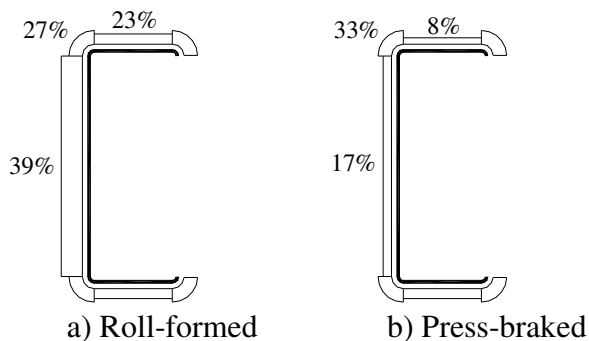


Fig. 9: Influența procesului de formare la rece asupra caracteristicilor mecanice ale oțelului

Figura 10 arată modificarea limitei de curgere pentru două secțiuni formate la rece.



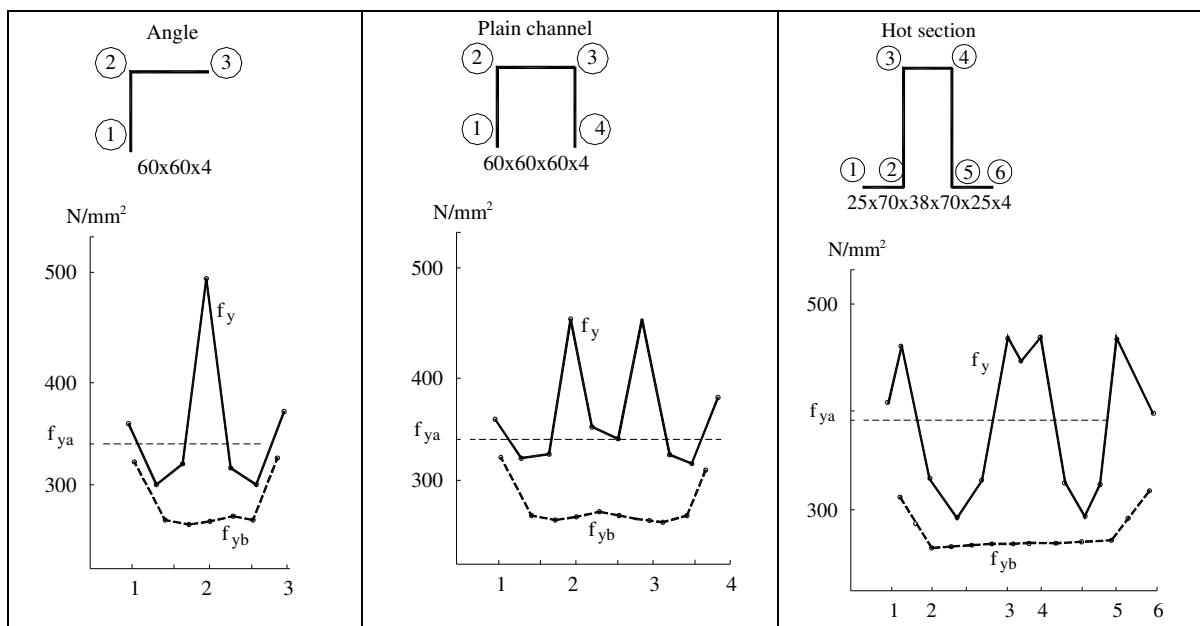


Fig. 10: Influența formării la rece

Valoarea medie a limitei de curgere pe ansamblul profilului crește cu numărul de îndoituri. Formula Limita de curgere medie se determina cu ajutorul formulei (2.1) din normativul românesc pentru calculul elementelor din oțel formate la rece (NPO, 1997):

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \cdot k \cdot n \cdot t^2 / A_g \leq (f_u + f_{yb}) / 2 \quad (2.1)$$

în care:

- f_{yb} , f_{ub} - limita elastică și rezistența la rupere a materialului de bază;
- t - grosimea tablei;
- A_g - aria brută a secțiunii;
- k - coeficient depinzând de modul de formare la rece ($k=7$ - laminare și $k=5$ - alte metode);
- n - numărul îndoiturilor cu o rază interioară mai mică decât $5t$ și cuprinse între 0° - 135° .

Trebuie avut în vedere însă că această creștere a limitei de curgere nu poate fi luată în considerare decât pentru elementele cu întreaga secțiune efectivă (care nu voalează). De asemenea, această creștere nu se calculează pentru elementele sudate în zonele formate la rece sau elementele care sunt supuse tratamentelor termice. În ceea ce privește numărul îndoiturilor luate în considerare, se face distincție între solicitările de întindere și compresiune, pe de-o parte, și solicitarea de încovoiere, pe de altă parte. La întindere și compresiune toate colțurile joacă un rol, pe când la încovoiere doar cele învecinate tălpilor profilului.

Profilele laminate la cald sunt afectate de tensiuni reziduale de tip membranar, care depind de forma secțiunii transversale și au o influență semnificativă asupra comportamentului la stabilitate. De aceea, tensiunile reziduale au constituit factorul cel mai important pentru încadrarea profilelor laminate la cald pe diferite curbe de flambaj în normele de calcul europene (ENV 1993-1-1, 1992), inclusiv STAS 10108/0-78.

În cazul profilelor formate la rece, tensiunile reziduale sunt în principal de încovoiere, așa cum se arată în Figura 11, iar influența acestora asupra comportamentului la stabilitate este mai puțin importantă decât cele de tip membranar, după cum se vede în Tabelul 2 (Rondal, 1988). Pe de altă parte, procedeul de formare la rece influențează mărimea tensiunilor reziduale; laminarea la rece produce tensiuni reziduale de încovoiere mai mari decât presarea la rece.

Curbele de flambaj europene au fost calibrate utilizând rezultate experimentale pentru profile formate la cald (lamine sau sudate), obținute în urma unei largi campanii de încercări în Europa anilor 1960 (Sfiintesco, 1970). Aceste curbe se bazează pe binecunoscuta formulă Ayrton-Perry în care factorul de imperfecțiune α a fost calibrat pe baza rezultatelor experimentale (Rondal și Maquoi, 1979).

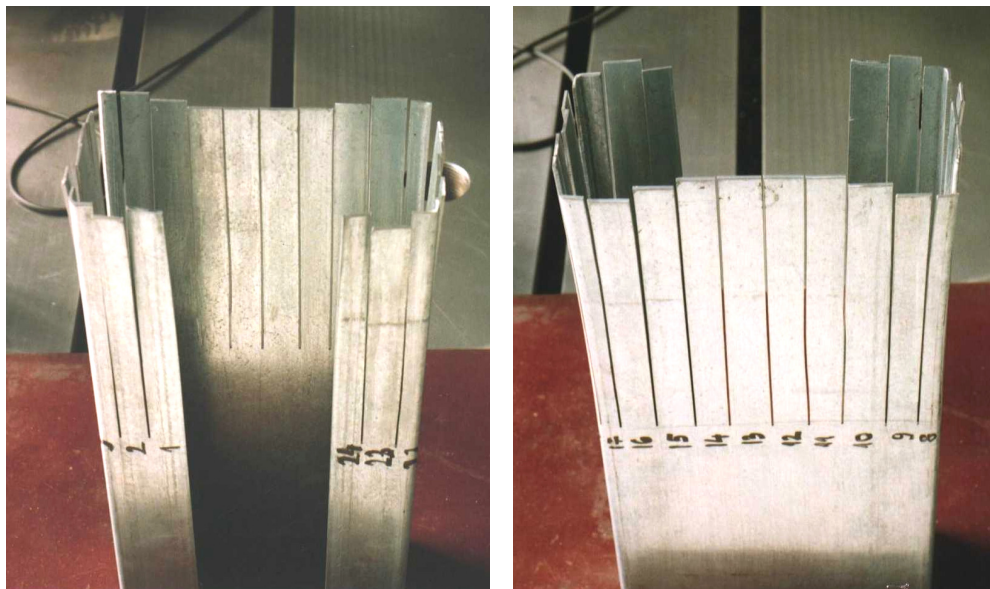


Fig. 11: Evidențierea tensiunilor reziduale de încovoiere pentru un profil C format la rece

Table 2. Tipul și intensitatea tensiunilor reziduale în profilele din oțel

Metoda de fabricație	<i>Laminare la cald</i>	Formare la rece	
		Laminare	Presare
Tensiuni reziduale membranare (σ_{rm})	Mare	Scăzută	Scăzută

Tensiuni reziduale de încovoiere (σ_{rf})	Scăzută	Mare	Scăzută
---	---------	------	---------

Datorită faptului că proprietățile mecanice ale profilelor formate la rece sunt diferite de cele ale celor formate la cald, ar trebui luate în considerare curbe de flambaj distincte (Dubina, 1995). Chiar dacă astăzi sunt la îndemână metode numerice și experimentale prin care factorul imperfecțiunilor α să fie calibrat în mod adecvat pentru profile formate la rece (Dubina, 2001), pentru simplitatea procesului de proiectare se utilizează aceleași curbe de flambaj ca și pentru profilele formate la cald (ENV1993-1-3; NP012-1997).

1.3 Probleme specifice în proiectarea elementelor formate la rece

1.3.1 Probleme specifice de stabilitate

Elementele metalice cu pereți subțiri pot fi supuse la unul dintre modurile generice de flambaj: local, distorsional sau global, și la interacțiunea acestora. Flambajul local sau voalarea pereților secțiunii transversale, respectiv distorsiunea sau strâmbarea secțiunii, sunt întâlnite la profilele din oțel formate la rece care, de regulă, au pereți subțiri.

Termenul de "flambaj global" desemnează flambajul prin încovoiere (Euler) precum și flambajul prin încovoiere-răsucire sau flambajul lateral, prin încovoiere și răsucire, al grinzilor.

Flambajul distorsional, așa cum sugerează și denumirea, este modul de pierdere a stabilității care apare ca o consecință a distorsiunii secțiunii transversale. În cazul profilelor din oțel formate la rece, acesta este caracterizat de deplasarea relativă a pereților profilului, care se rotesc în jurul axelor colțurilor secțiunii. Mărirea lungimii de semiundă a flambajului distorsional este în general între cea a flambajului local și a celui global. Ca o consecință a creșterii complexității formelor secțiunilor transversale ale profilelor formate la rece, calculul caracteristicilor eficace ale secțiunii transversale în urma flambajului local devine tot mai complicat, iar flambajul distorsional crește în importanță.

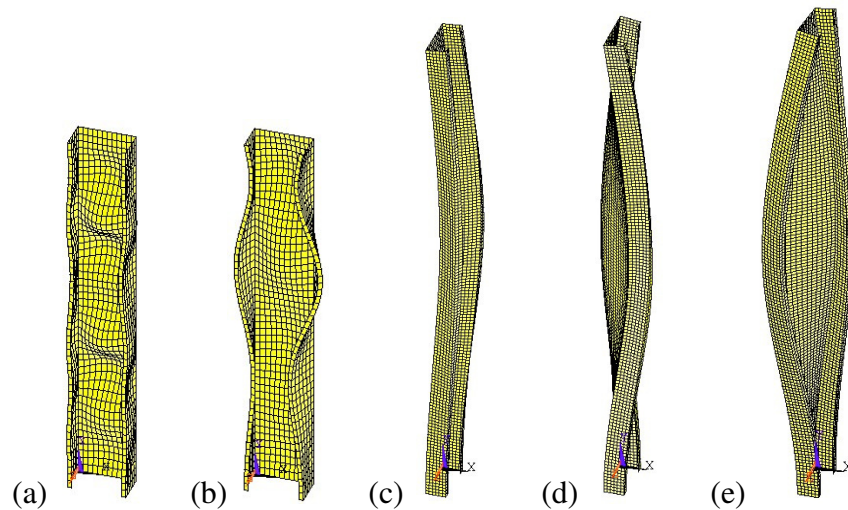
Flambajul local și cel distorsional pot fi considerate ca fiind moduri de flambaj "secționale" și pot interacționa atât între ele cât și cu celelalte moduri globale. (Dubină, 1996).

Figura 12 arată câteva moduri de flambaj simple și în interacțiune, sau cuplate, pentru un profil cu secțiune C comprimat. Rezultatele au fost obținute utilizând Metoda Elementului Finit și analiza de stabilitate cu valori proprii (bifurcarea echilibrului elastic).

Pentru o secțiune dată, diferitele moduri de pierdere a stabilității barei comprimate centric depind de lungimea de flambaj, așa cum se arată în Figura 13 (Hancock, 1998).

Graficul arătat în Figura 13 a fost obținut în urma unei analize utilizând Metoda Fâșiilor Finite și descrie modificarea forței critice de flambaj funcție de lungimea de semiundă. Primul minim (Punctul A) apare pe curbă la o lungime de semiundă de 65mm și reprezintă voalarea. Voalarea constă în deformarea inimii elementului, fără deplasarea liniei de joncțiune între talpă și rigidizarea de capăt. Un al doilea minim apare în punctul B la o lungime de semiundă de 280mm. Acesta este un mod de flambaj distorsional, cu deplasarea liniei de joncțiune dintre talpă și rigidizarea de capăt, dar fără o deplasare de ansamblu a secțiunii transversale. În anumite articole de specialitate, acest tip de flambaj mai este numit și mod "local-distorsional". Tensiunea corespunzătoare flambajului distorsional este ușor mai mare decât tensiunea corespunzătoare flambajului local în punctul A, deci atunci când un profil cu lungime mare stabilizat pentru flambajul global este supus la compresiune, este de așteptat să-și piardă stabilitatea prin voalare, mai repede decât prin flambajul distorsional.

Elementul își pierde stabilitatea generală prin încovoiere sau încovoiere-răsucire la lungimi de semiundă mari (punctele C, D și E). În particular, pentru secțiunea considerată în Figura 13, pierderea stabilității prin încovoiere-răsucire apare până la lungimi de semiundă de aproximativ 1800mm. La lungimi de semiundă mai mari, apare flambajul prin încovoiere.



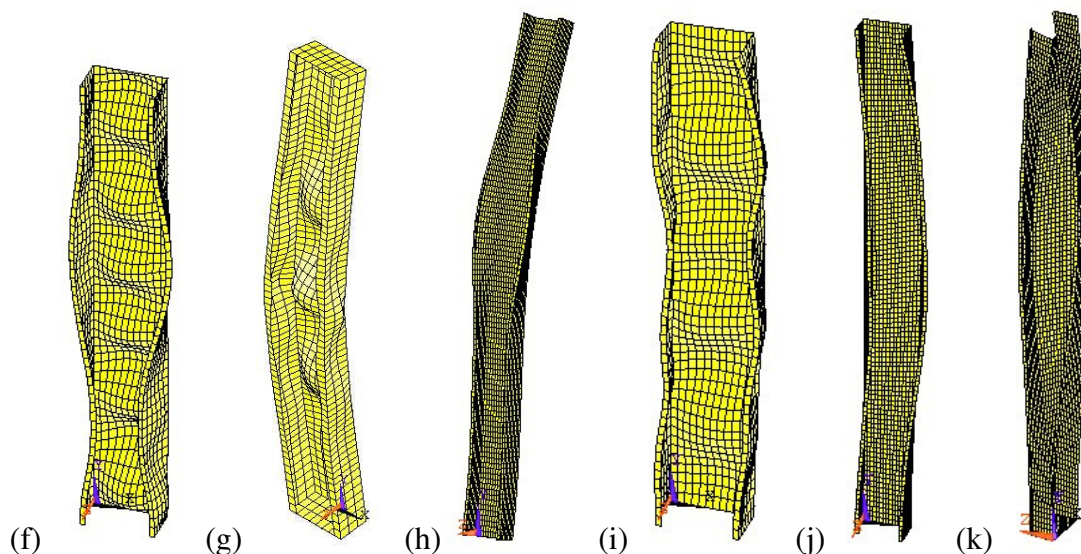


Fig. 12: Moduri de flambaj pentru un profil C format la rece comprimat
Moduri simple: (a) local (L); (b) distorsional (D); (c) încovoiere (F); (d) torsional (T);
(e) încovoiere-răsucire (FT)

Moduri cuplate (în interacțiune): (f) L + D; (g) F + L; (h) F + D; (i) FT + L; (j) FT + D;
(k) F + FT

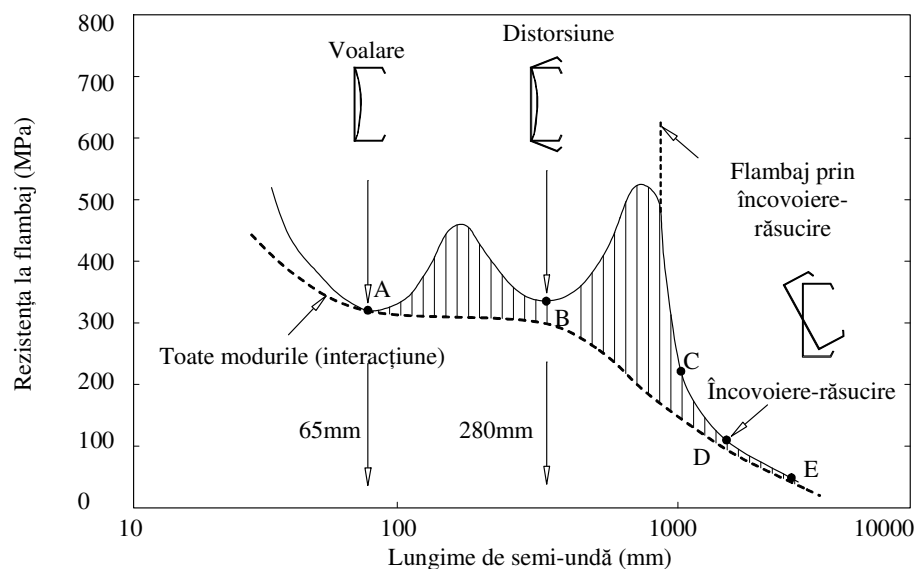


Fig. 13: Rezistența funcție de lungimea de semiundă pentru un profil C comprimat
(Hancock, 1998)

Linia punctată din Figura 13, adăugată figurii originale a lui Hancock (1998), arată în mod calitativ zona în care apare cuplarea modurilor.

Efectul interacțiunii dintre modurile de flambaj secțional și global consistă în creșterea sensibilității elementului la imperfecțiuni, conducând la eroziunea tensiunilor teoretice de

flambaj (zonele hașurate în Figura 13). De fapt, datorită prezenței inerente a imperfecțiunilor, interacțiunea modurilor de pierdere a stabilității apare întotdeauna în cazul profilelor formate la rece cu pereți subțiri.

Figura 14 arată diferența de comportament dintre un element din oțel cu secțiune obișnuită și un element de aceeași lungime cu pereți subțiri. Atât cazul barei ideale cât și cazul barei cu imperfecțiuni sunt prezentate.

Pentru primul element se poate observa că ruina începe cu îndepărtarea de la curba elastică în punctul B, când prima fibră atinge limita de curgere și se atinge capacitatea portantă ultimă, N_u , în punctul C, după care tinde asimptotic spre curba teoretică de comportament rigid-plastic. Teoria elastică este capabilă să determine deplasările și tensiunile până în punctul în care se atinge limita de curgere. Poziția curbei rigid-plastice determină limita absolută a capacității portante.

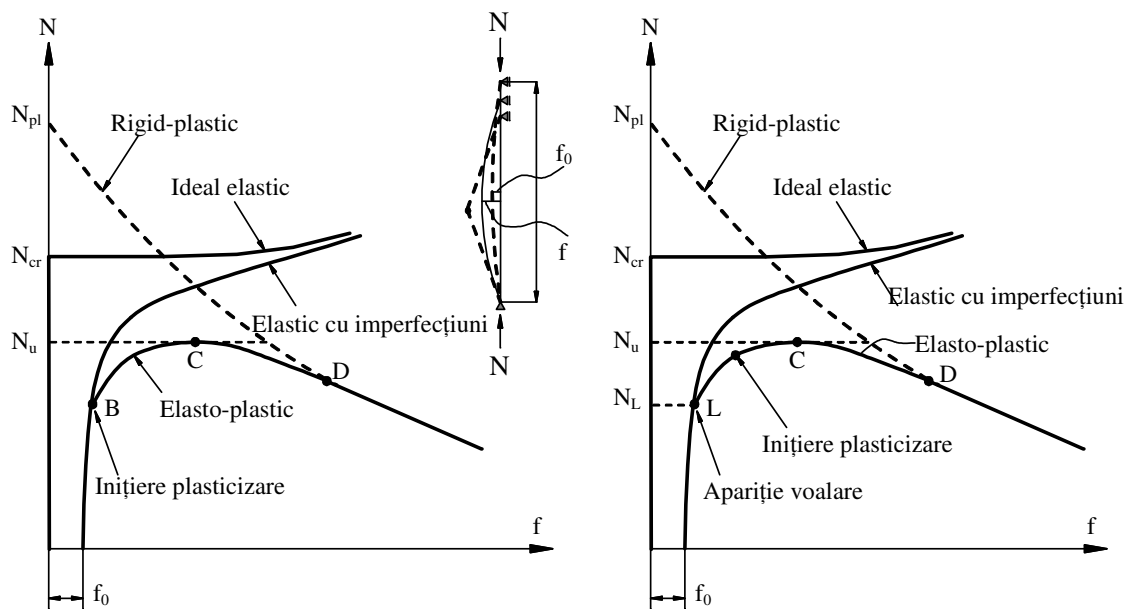


Fig. 14: Comportarea unui profil comprimat cu secțiune obișnuită (a) și, respectiv, cu pereți subțiri (b)

În cazul în care elementul este constituit dintr-un profil metalic cu pereți subțiri, modurile de flambaj secțional apar înaintea inițierii plasticizării. Flambajul secțional este caracterizat printr-o comportare post-critică stabilă și nu produce cedarea elementului; acesta, însă, pierde în mod semnificativ din rigiditate. Plasticizarea începe la colțurile secțiunii transversale, cu puțin înainte de ruina elementului, când flambajul secțional se transformă într-un mecanism plastic local cvasi-simultan cu producerea flambajului global (Dubină, 2000). Figura 15, obținută printr-o analiză neliniară elasto-plastică cu element finit, arată clar mecanismul de cedare al unui profil cu pereți subțiri comprimat (Dubină și Ungureanu, 2000).

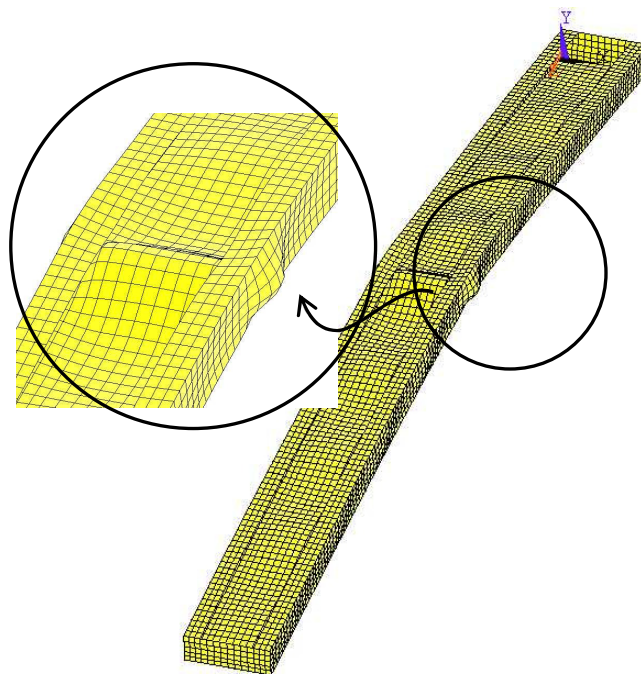


Fig. 15: Mod de cedare al unui profil C comprimat

Pentru a ține seama de reducerea rigidității, atunci când flambajul secțional apare înaintea flambajului global, în practica proiectării se operează cu caracteristici geometrice reduse ale secțiunii transversale a profilului.

În Figura 16 se arată comparația dintre curbele de flambaj pentru un profil C solicitat la compresiune, calculate în conformitate cu norma europeană (ENV, 1993), considerând caracteristicile brute ale secțiunii transversale (fără considerarea flambajului local) și caracteristicile reduse ale secțiunii (caz în care are loc interacțiunea dintre modul secțional și cel global).

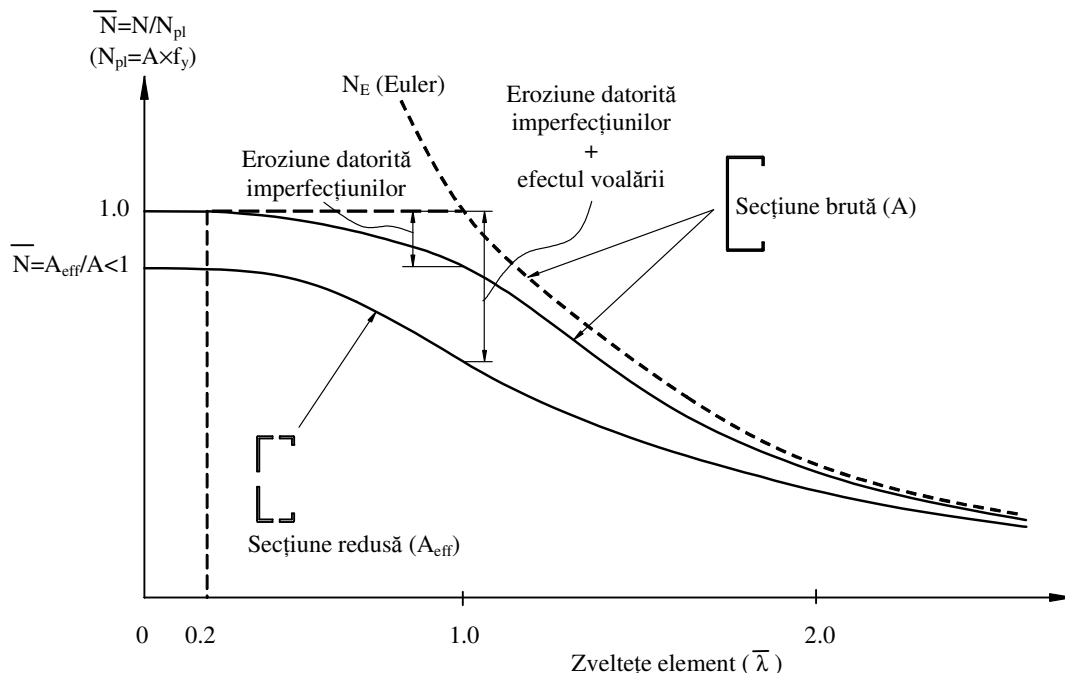


Fig. 16: Efectul voalării pereților secțiunii asupra capacității portante a unui profil comprimat

1.3.2 Rigiditatea la torsiune

Profilele formate la rece au, de regulă, pereți subțiri și în consecință, o rigiditate la torsiune redusă. Multe profile produse la rece sunt cu secțiuni monosimetrice, având centrul de tăiere excentric față de centrul de greutate, așa cum se arată în Figura 17a. Pentru a produce încovoiere fără răsucire linia forței trebuie să treacă prin centrul de tăiere a secțiunii. Orice excentricitate a încărcării față de axa centrului de tăiere va produce deformații de răsucire considerabile într-o grindă cu pereți subțiri, așa cum se arată în Figura 17a. În consecință, grinzile încovoiate necesită legături suplimentare amplasate la diferite intervale, sau în mod continuu, pentru împiedicarea răsucirii. Aceste legături se impun în mod aproape curent în cazul grinzilor din profile C sau Z, care își pot pierde stabilitatea generală datorită legăturilor laterale insuficiente.

Pentru elemente solicitate la compresiune, excentricitatea încărcării față de centrul de tăiere poate provoca flambajul prin încovoiere-răsucire, la o forță inferioară celei corespunzătoare pierderii stabilității prin încovoiere, așa cum se arată în Figura 17b.

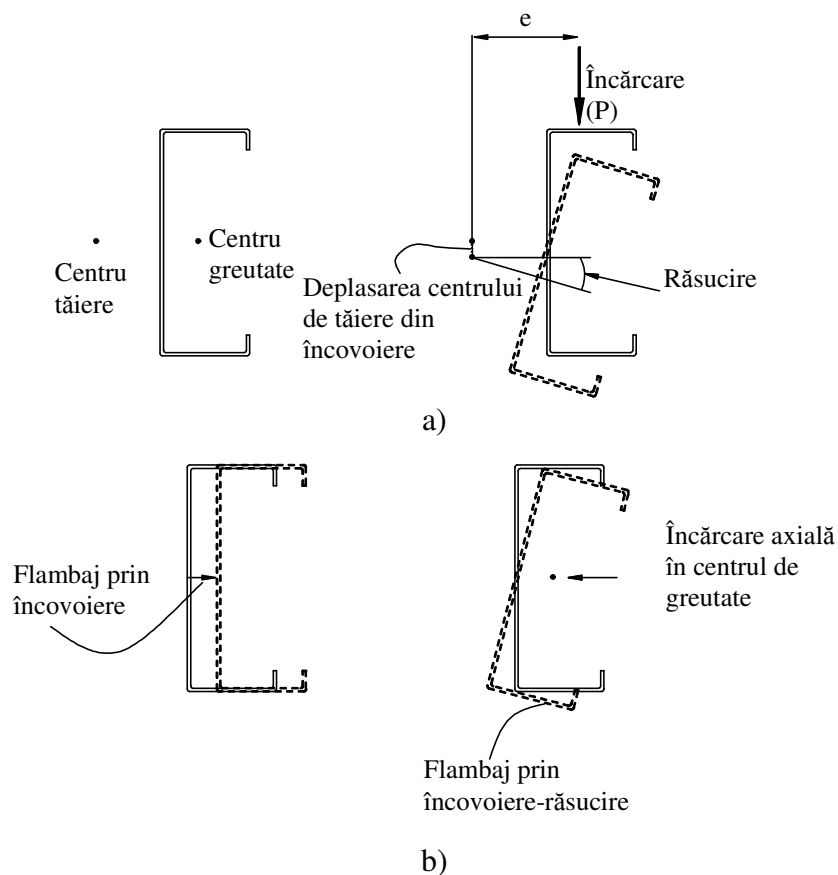


Fig. 17: Deformații de răsucire

1.3.3 Strivirea locală a inimii

Fenomenul de strivire locală a inimii profilelor se produce în dreptul încărcărilor concentrate sau al reazemelor. Fenomenul reprezintă o problemă importantă pentru profilele și tablele formate la rece, având în vedere următoarele:

- În proiectarea profilelor formate la rece nu se prevăd în mod uzual rigidizări suplimentare pe pereții secțiunilor în dreptul concentrărilor de forțe. Un exemplu în acest sens sunt tablele cutate pentru acoperiș sau pentru planșee, care sunt continue la trecerea peste pane și grinzi;
- Zveltețea pereților secțiunilor transversale și implicit a inimilor acestora este în mod obișnuit mult mai mare decât în cazul profilelor formate la cald;
- În multe cazuri inimile secțiunilor sunt înclinate;
- Sunt situații numeroase în care elementul de legătură, prin intermediul căruia se aplică încărcarea transversală, este excentric față de inima profilului.

Strivirea locală a inimii este o problemă specifică, care apare în comportarea profilelor formate la rece, și de aceea normele de calcul conțin prevederi în scopul controlării acestui fenomen.

WEB CRIPPLING

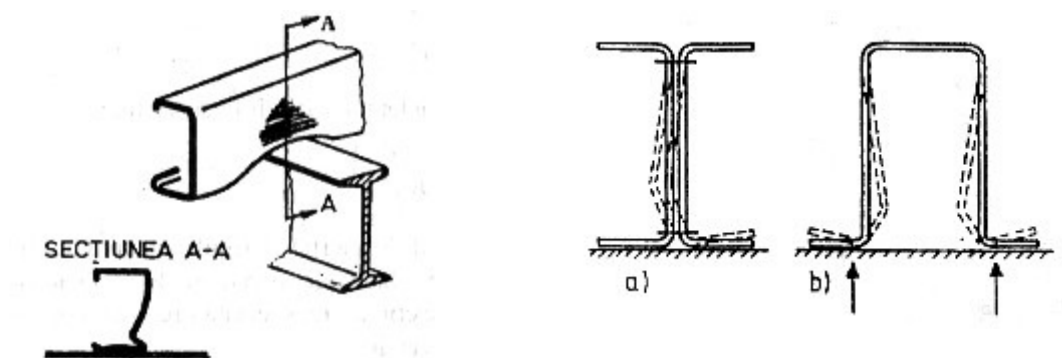
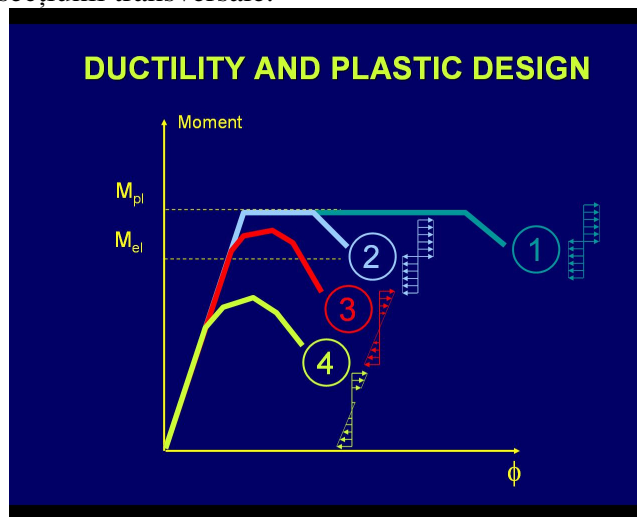


Fig.3.19: Web crippling

1.3.4 Ductilitatea și comportarea în domeniul plastic

Ca efect al flambajului secțional, dar și datorită ecruisării în urma procesului de fabricație, profilele formate la rece posedă o ductilitate redusă. În general, nu se acceptă un calcul plastic pentru profilele cu pereți subțiri formate la rece. Așa cum s-a arătat și în paragraful 1.3.1, după inițierea plasticizării, la aceste profile rezerva de capacitate portantă este foarte scăzută. Cu toate acestea, pentru elementele încovoiate, normele de proiectare acceptă considerarea rezervei de capacitate portantă în domeniul plastic pentru porțiunea întinsă a secțiunii transversale.



Profilele formate la rece pot fi utilizate în structurile supuse la acțiuni seismice importante, deoarece există beneficii structurale importante ca urmare a forțelor inițiale reduse, masa structurii fiind mică, dar nu se poate conta pe zone plastice disipative în această situație. În proiectarea antiseismică, dacă se utilizează profile formate la rece, se aplică un factor de reducere $\psi=1$, așa cum se prevede în normativul de proiectare antiseismică P100-92 (P100, 1992). În noua versiune a normei europene, EUROCODE 8

(EN1998-1) se prevede pentru structurile metalice cu capacitate de disipare redusă un factor de comportare $q=1.5$ (în P100-1/2006 $q=1$). Dacă structura, prin proiectare, asigură suficientă redundanță (suprarezistență de proiectare și capacitate de redistribuire a eforturilor în urma unor cedări locale) poate fi, în principiu, aplicat acest factor de reducere.

1.3.5 Îmbinări

Datorită grosimilor reduse ale pereților profilelor formate la rece, metodele convenționale de îmbinare, prin sudare sau cu șuruburi, deși posibile, sunt, în general, mai puțin utilizate, accentul punându-se pe tehnologiile specifice mai potrivite materialelor cu grosime redusă. În cazul tehnologiilor aplicate curent, specifice profilelor cu pereți subțiri formate la rece, se evidențiază îmbinările cu nituri oarbe și cele cu șuruburi autoperforante și/sau autofiletante. Bolțurile aplicate prin împușcare sunt, de asemenea, utilizate în mod curent pentru prinderea unei table subțiri de profile cu grosime de perete mai mari (de exemplu: profile laminate la cald).

Mai recent, au apărut și alte metode de îmbinare, specifice profilelor cu pereți subțiri, cum ar fi îmbinările cu adezivi sau cele prin presare și/sau ștanțare.

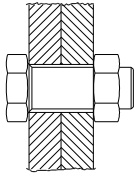
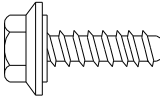
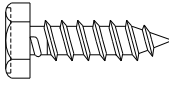
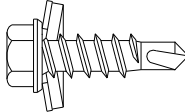
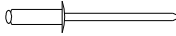
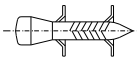
Îmbinările cu adezivi folosesc rășini epoxidice sau adezivi acrilici. Avantajul îmbinărilor cu adezivi constă într-o bună repartizare a eforturilor în zona îmbinării, însă necesită o tratare atentă a suprafețelor de contact din îmbinare, și timp de întărire a adezivului. Prezintă o rezistență bună la solicitări de forfecare însă sunt slabe pentru solicitări de întindere. Este discutabilă comportarea lor în timp și la sarcini repetate și/sau reversibile.

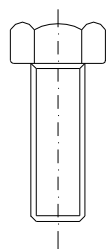
Îmbinările prin presare (press-joining) sau ștanțare, de tip "Rosette" (Makelainen și Kesti, 1999), reprezintă o metodă nouă de îmbinare a profilelor cu pereți subțiri.

Pot exista și îmbinări mecanice speciale, specifice anumitor tipuri de structuri, cum ar fi structurile de depozitare, la care grinzile de susținere a platformelor de depozitare au la capete dispozitive speciale de fixare. La aceste tipuri de structuri, în general, stâlpii sunt alcătuiți din profile cu pereți perforați, pentru a permite fixarea grinzilor la diferite nivele.

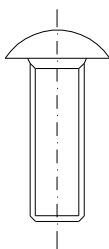
Table 7.2: Usual mechanical fasteners for common applications [3]

Thin-to-thick	Steel-to-wood	Thin-to-thin	Fasteners	Remark
---------------	---------------	--------------	-----------	--------

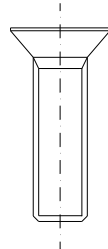
X		X		Bolts M5-M16
X				Self-tapping screw $\phi 6.3$ with washer ≥ 16 mm, 1 mm thick with elastomer
	X	X		Hexagon head screw $\phi 6.3$ or 6.5 with washer ≥ 16 mm, 1 mm thick with elastomer
X		X		Self-drilling screws with diameters: - $\phi 4.22$ or 4.8 mm - $\phi 5.5$ mm - $\phi 6.3$ mm
X				Thread-cutting screw $\phi 8$ mm with washer ≥ 16 mm, 1 mm thick with or without elastomer
		X		Blind rivets with diameters: - $\phi 4.0$ mm - $\phi 4.8$ mm - $\phi 6.4$ mm
X				Shot (fired) pins
X				Nuts



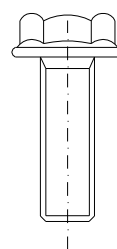
Hexagon



Cup



Countersunk



Hexagon flanged

Fig.7.1 Bolt head shapes

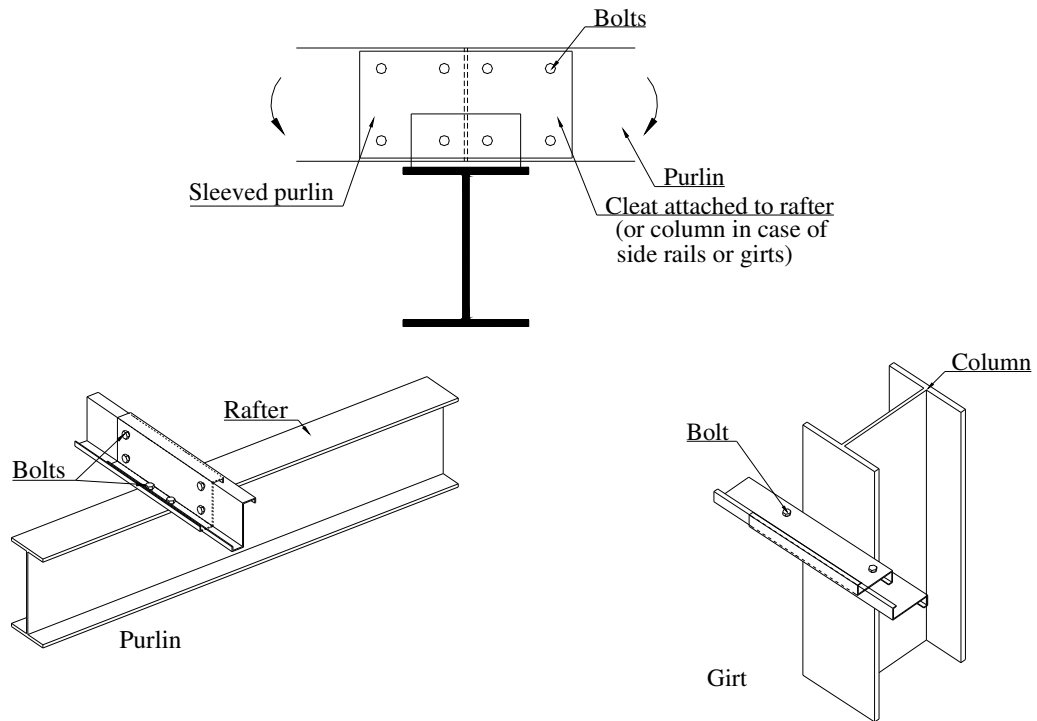


Fig.7.2 Bolted continuous fixation for purlins and side rails

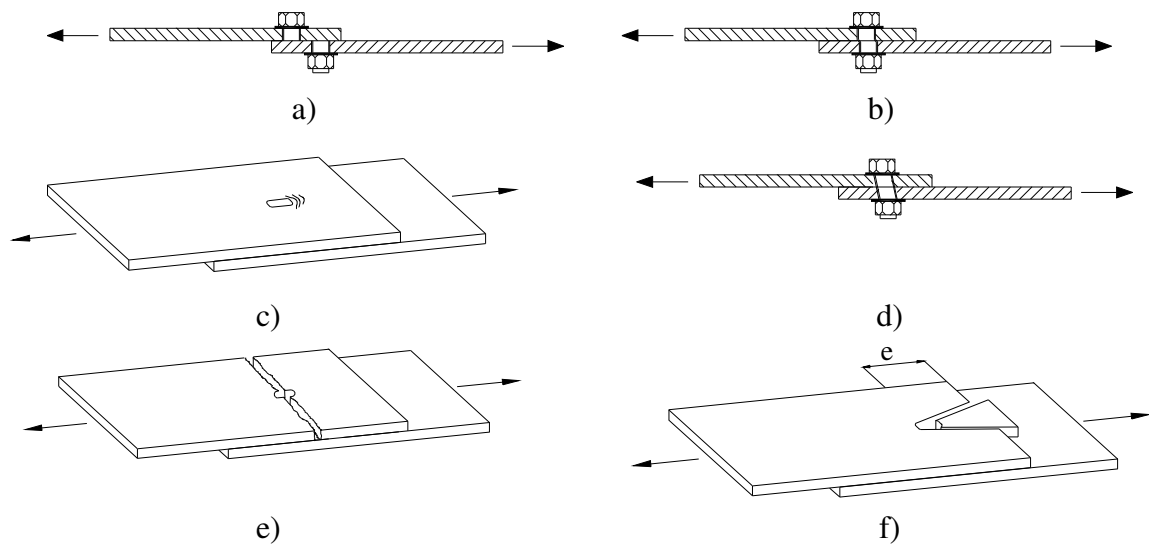


Fig.7.3 Failure modes for bolted connections in shear



Fig.7.4 Possible failure modes for bolted connections in tension

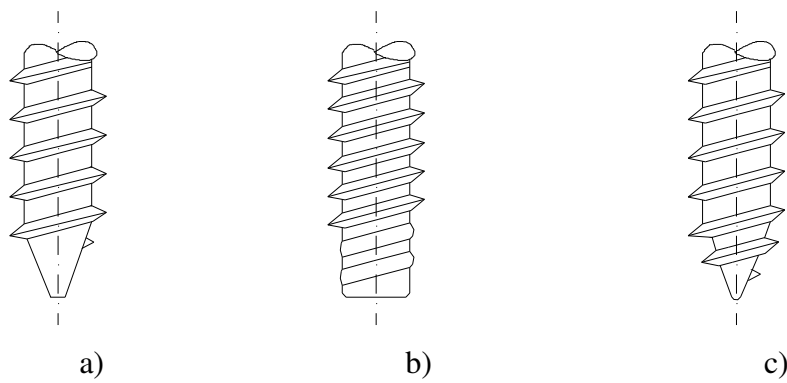


Fig.7.5 Thread types for thread-forming screws

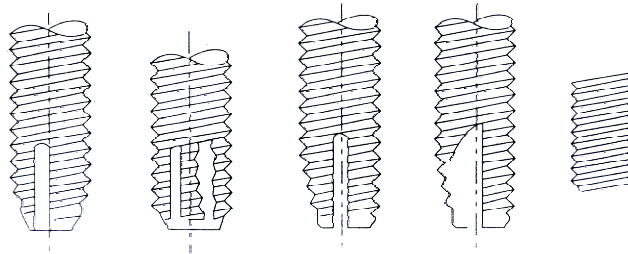


Fig.7.6 Thread and points of thread-cutting screws

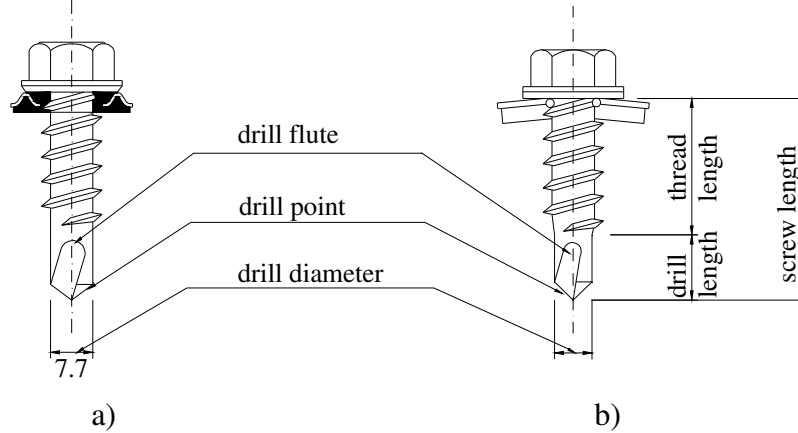


Fig. 7.7 Self-drilling screws: a) drill diameter equal to body diameter for thin-to-thick connections; b) drill diameter smaller than body diameter for thin-to-thin connections

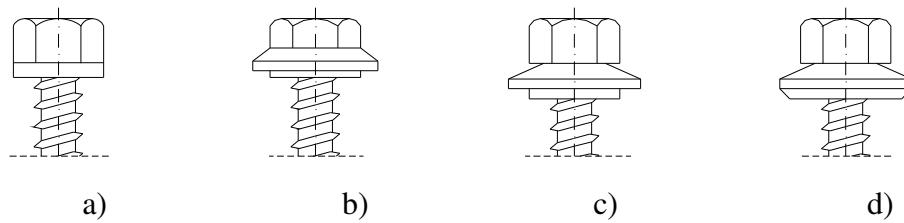
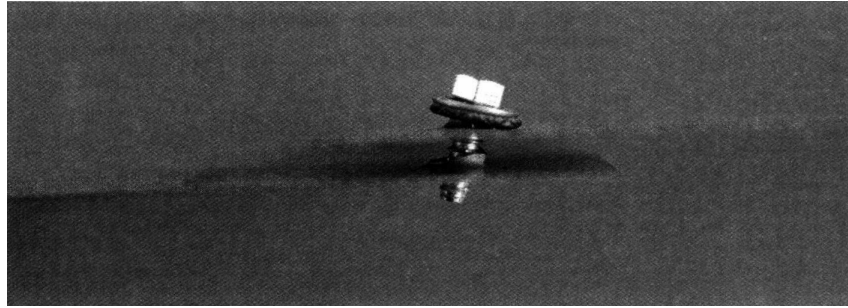
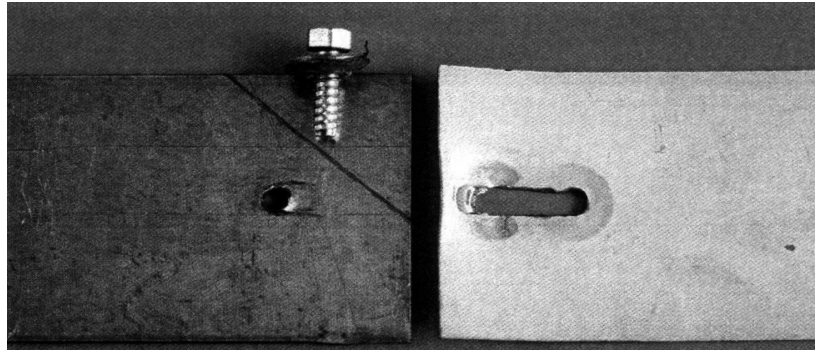


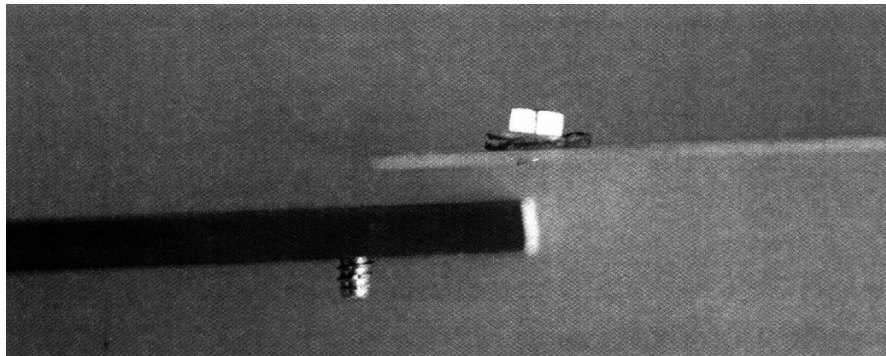
Fig. 7.8 Washers for self-tapping screws: a) metal washer; b) elastomeric washer; c) and d) elastomeric or vulcanised to metal washer



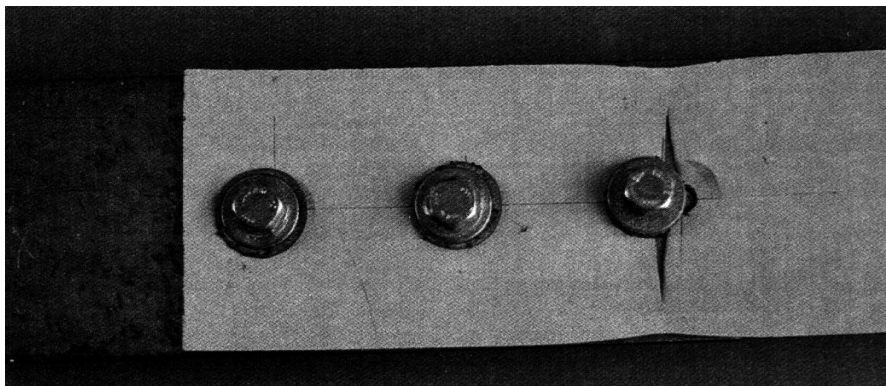
a)



b)

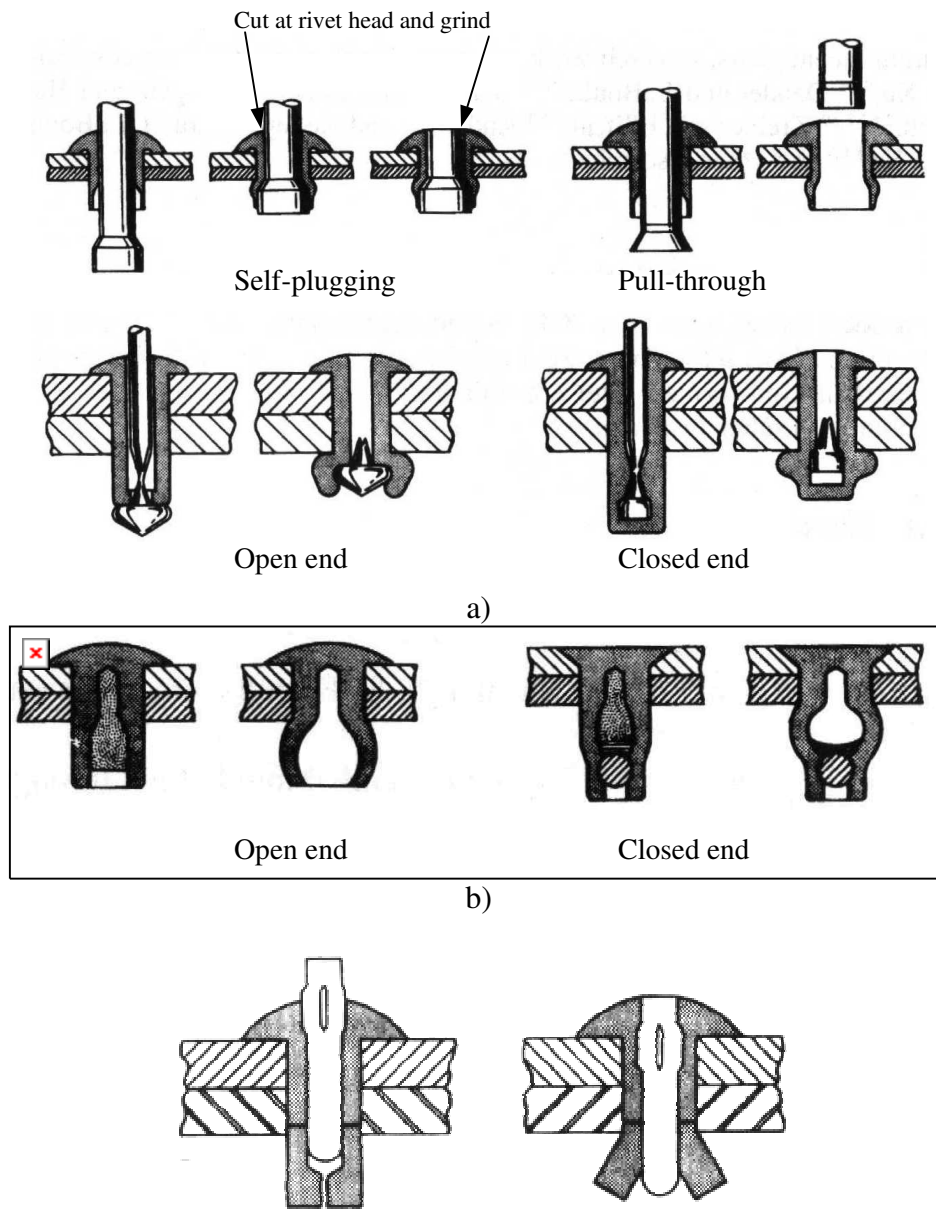


c)



d)

Fig.7.12 Test evidence for failure modes of screwed connections: a) Tilting and pull-out of screw; b) upper sheet tearing; c) screw shearing;



c)
Fig.7.13 Different types of blind rivets

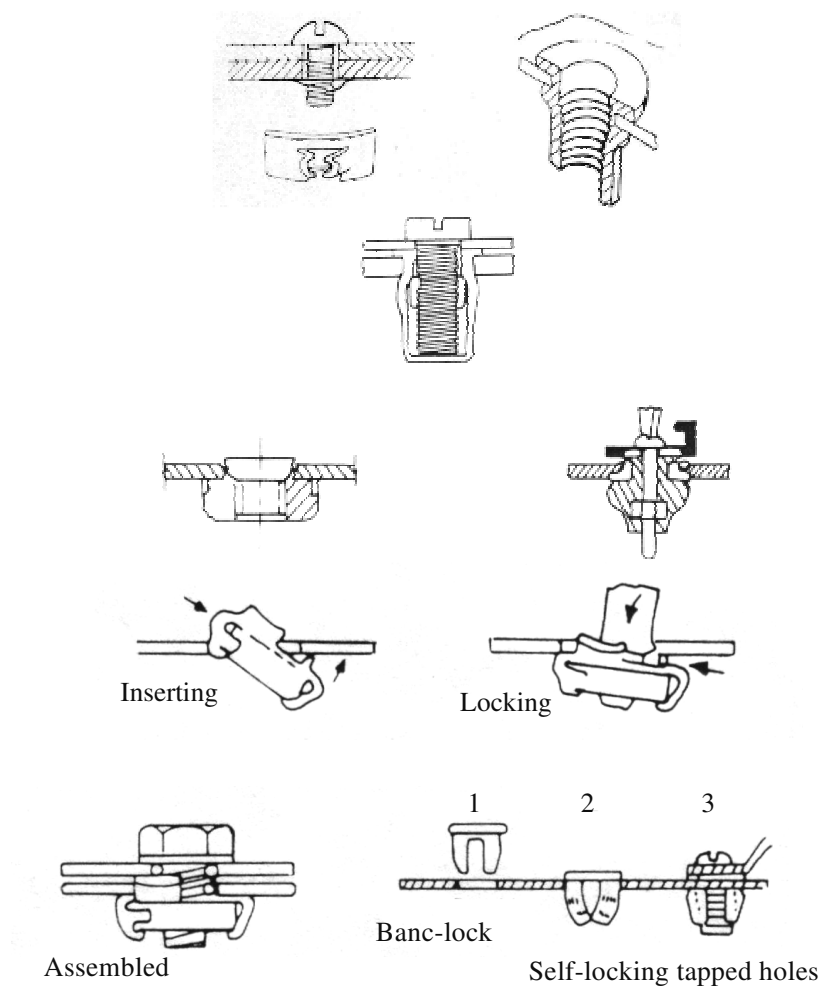
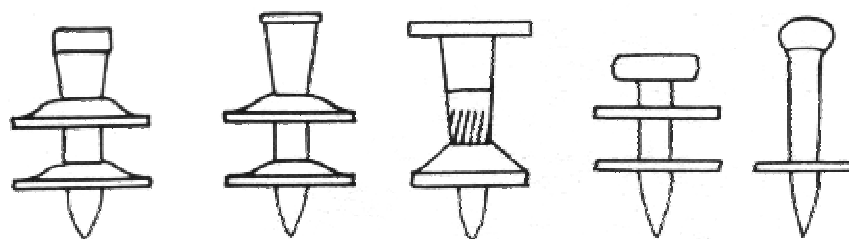
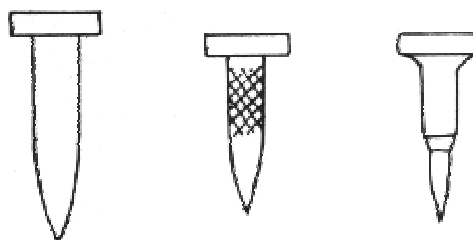


Fig.7.14 Nut systems



Five types of powder actuated fasteners



Three types of air driven fasteners

Fig.7.17 Shot fired pins

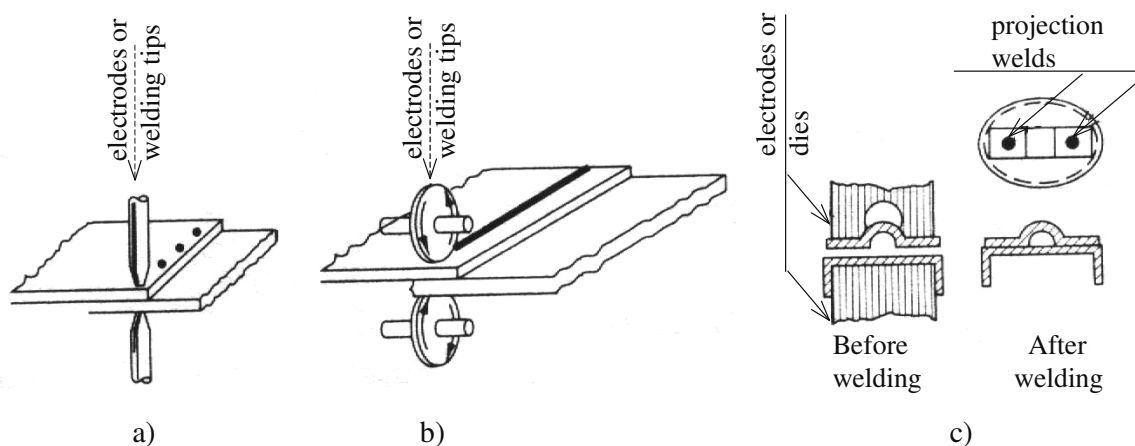


Fig.7.21 Resistance welding procedures: a) spot welding; b) seam welding; c) projection welding

1.3.6 Proiectarea asistată de experiment

Deși tehnologia formării la rece prezintă avantajul de a permite obținerea unor profile cu secțiuni variate, din punct de vedere al proiectării, calculul acestor elemente poate fi deosebit de complex. Sistemele structurale alcătuite din diferite tipuri de profile formate la rece care conlucrează între ele (cum ar fi învelitoarea acoperișurilor, realizată din pane cu secțiune Z și panouri de tablă cutată) pot conduce la situații de proiectare dificil de controlat prin relații de calcul analitice. Bineînțeles, analiza numerică cu ajutorul unui program de calcul cu element finit reprezintă întotdeauna o posibilitate de rezolvare a unor astfel de situații, dar de cele mai multe ori modelarea este complicată și costisitoare din punct de vedere al timpului de lucru. Pentru astfel de probleme, normele de proiectare moderne permit utilizarea de proceduri experimentale pentru evaluarea performanțelor structurale. Analiza experimentală poate fi utilizată integral, înlocuind proiectarea prin calcul, sau poate fi utilizată în combinație cu calculul numeric. Evident, doar laboratoarele acreditate pot efectua astfel de programe experimentale și eliberează certificate de conformitate.

1.3.7 Norme de calcul

În paragraful 1.1 s-a făcut deja referire la normele pentru proiectarea elementelor din oțel formate la rece existente în Europa, Statele Unite ale Americii și Australia. În continuare se vor face câteva precizări referitoare la norma românească de profil "Normativ pentru calculul elementelor din oțel cu pereți subțiri formate la rece" indicativ NP012-1997 (Este tradusa si in curs de aplicare SREN 1993-1-3). Prevederile generale din SREN 1993-1-1,1-5,1-8 se aplica si in acest caz. se poate face trimitere la NP042-2000.

Normativul NP012-1997 reprezintă versiunea tradusă și adaptată a normei europene EUROCODE 3, Partea 1.3 (ENV1993-1-3, 1996) care este norma europeană unificată pentru proiectarea elementelor din oțel formate la rece cu pereți subțiri. Prevederile normei europene sunt limitate la elemente din oțel cu grosimile cuprinse între 1.0-8.0 mm pentru profile, respectiv 0.5-4.0 mm pentru table. Normativul folosește în exclusivitate metoda stărilor limită. Prescripțiile de proiectare nu sunt mult diferite de cele conținute în norma americană AISI (AISI, 2001) însă includ, în general, metode de calcul mai avansate. Pentru calculul caracteristicilor eficace ale profilelor comprimate, spre exemplu, norma europeană conține prevederi de calcul mult mai complexe. Cu toate acestea, în comparație cu norma americană (AISI, 2001) respectiv norma australiană (AS/NZS, 1996, 1998) nu sunt prezentate formule de calcul pentru flambajul distorsional.

Normativul românesc introduce, de asemenea, în plus față de norma europeană, Capitolul 5.4 "Bare cu secțiune compusă din elemente formate la rece". În acest capitol sunt prezentate formulele de calcul pentru verificarea rezistenței și stabilității barelor cu secțiune transversală compusă, obținută prin metode de solidarizare specifice, a două sau mai multor profile formate la rece cu pereți subțiri.

Pentru considerarea efectului de diafragmă a pereților și învelitorii din table cutate, în România există normativul NP041-2000, care este redactat în conformitate cu prevederile corespunzătoare ale Convenției Europene de Construcții Metalice.

1.3.8 Rezistența la foc

Un parametru important pentru determinarea rezistenței la foc a unui anumit element structural este factorul de masivitate, definit prin raportul dintre perimetrul secțiunii transversale a profilului supus acțiunii focului și aria secțiunii transversale. În cazul profilelor formate la rece, datorită grosimilor reduse ale pereților, acest factor are valori ridicate, ceea ce conduce la rezistențe la foc reduse. Din același motiv, în cazul profilelor formate la rece, protecția la foc cu vopsea intumescentă nu este eficientă.

Aplicarea sprayurilor grele, deși eficientă în mod obișnuit, nu este o soluție uzuală pentru profilele formate la rece zincate. De obicei, pentru protecția la foc a acestui tip de profile se recomandă izolarea cu vată minerală sau alte materiale similare și îmbrăcarea lor cu un

sistem de plăci de gips-carton. Această protecție asigură o rezistență la foc adecvată cerințelor de proiectare impuse de norme.

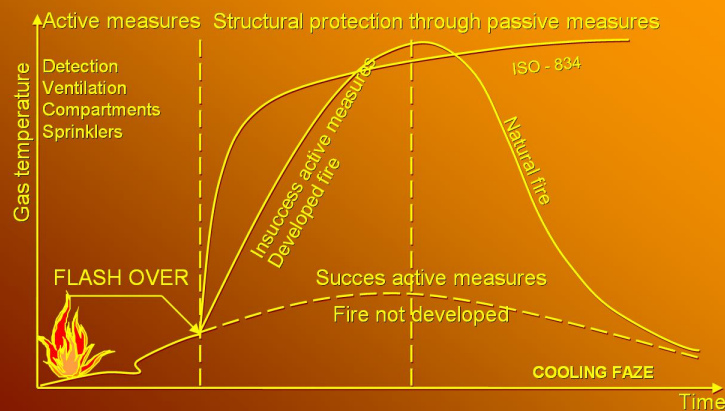
Funcție de numărul de straturi de plăci și de izolația termică suplimentară, acest tip de protecție poate asigura o rezistență la foc de până la 120 de minute.

Light Gauge Metal Structures: Recent Advances

Fire Design of Steel Elements



Fire resistance



1.3.9 Protecția anticorozivă

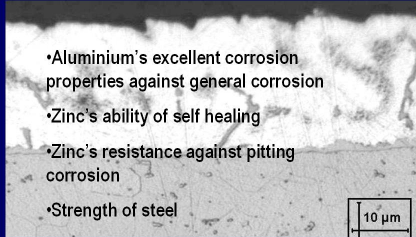
Rezistența la coroziune a profilelor formate la rece depinde de agresivitatea mediului și de tipul și grosimea tratamentului de protecție aplicat. Procedeul de fabricare la rece permite ca protecția anticorozivă să poată fi aplicată pe tabla de bază înainte de laminare. În consecință, tabla zincată și/sau vopsită poate fi trecută prin rolele de laminare și nu mai necesită alte tratamente.

Galvanizarea uzuală se execută cu o cantitate de 275 grame de zinc pe metru pătrat (Zn 275), care corespunde unei grosimi a stratului de zinc de 20 μm pe fiecare parte a tablei. Protecția prin zincare este suficientă pentru asigurarea rezistenței la coroziune pentru toată durata de viață a unei clădiri, cu condiția ca aceasta să fi fost construită în mod adecvat. Protecția anticorozivă poate fi ușor distrusă ca urmare a manipulării și transportului profilelor. În cazul efectuării unor găuri în profilele zincate, în mod obișnuit nu mai este necesar un tratament ulterior, din moment ce stratul de zinc se transferă pe suprafețele neprotejate.

Un alt tip de protecție anticorozivă utilizat în cazul profilelor formate la rece cu pereți subțiri este protecția cu film pe bază de materiale plastice. Acest tip de protecție constă în acoperirea suprafeței oțelului cu un strat de material plastic, care poate fi aplicat prin proiectarea pe suprafața de protejat a unui strat de material plastic topit în stare lichidă, prin scufundarea elementului din oțel în suspensii de pulberi protectoare, care se întăresc ulterior, sau prin aplicarea directă a unor folii. Materialul plastic se poate aplica pe banda de oțel înainte de formarea profilului. Acoperirea benzilor cu un strat de zinc sau de material plastic are ca efect și prelungirea duratei de exploatare a instalațiilor de formare la rece prin reducerea uzurii, deoarece aceste materiale de protecție sunt mai moi decât oțelul.

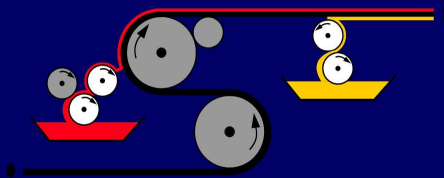
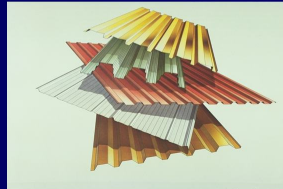
Aluzink - three metals – one material! Combining all good properties of the three materials

- Aluminium's excellent corrosion properties against general corrosion
- Zinc's ability of self healing
- Zinc's resistance against pitting corrosion
- Strength of steel



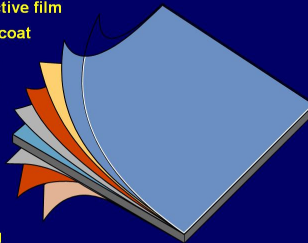
Protective very thin not visual aluminium oxide/ zinc carbonate layer (a number of molecule layers thickness)

PAINT COATING



PRELAQ PAINTED SHEET

Opt. protective film
Top coat
Primer
Passivation layer
Metal coating
Steel
Metal coating
Passivation layer
Reverse side coating



Tehnicile de protecție descrise pot fi și combinate între ele. De exemplu, există posibilitatea aplicării unei protecții 'duplex' care constă dintr-un strat inițial de zinc depus prin galvanizare și acoperit ulterior în mod suplimentar cu un strat de vopsea sau

de material plastic. Spre exemplu, în cazul tablelor cutate de tip LINDAB, tabla de oțel este zincată la cald și protejată în sistem multistrat. Stratul final de protecție cu Poliester (PE) sau High built poliester (HBPE) conferă o rezistență deosebită la coroziune și o bună stabilitate la acțiunea razelor UV. Partea inferioară este protejată cu un strat special de lac. Opțional, acesta poate fi înlocuit cu strat NoConDrop, strat ce reține condensul și nu permite picurarea. Tabla astfel protejată are durată de viață de peste 50 de ani.

2. Aplicații ale profilelor din oțel formate la rece în construcții

2.1 Avantajele utilizării profilelor din oțel formate la rece în construcții

Într-o serie de publicații intitulată “Light Steel”, Steel Construction Institute (SCI) a publicat un ghid de proiectare a construcțiilor utilizând profilele din oțel formate la rece (Grub, 1997). În conformitate cu acest ghid se prezintă următoarele avantaje ale utilizării acestor materiale în construcții.

Avantaje în timpul execuției

- Asamblare ușoară într-o largă gamă de forme structurale și arhitecturale;
- Există metode de îmbinare și montaj bine puse la punct;
- Există posibilitatea prefabricării subansamblelor; elementele pot fi livrate la lungimea necesară și cu toate găurile pentru șuruburi realizate din fabrică;
- Asamblarea și montajul se realizează cu ușurință și în timp scurt pe șantier; elementele individuale, chiar și subansamblele se pot manipula și monta manual, fără utilaje de ridicare; manopera este redusă și nu necesită o calificare deosebită;
- Eventualele modificări ale structurii se pot realiza pe șantier mult mai ușor decât în cazul profilelor laminate la cald; aceasta evident cu aprobarea proiectantului;
- Protecția la foc se realizează cu ușurință; sistemele de protecție cu izolație și gips-carton permit obținerea unei rezistențe la foc de până la 120 minute;
- Erorile de montaj pe șantier sunt reduse la minim;
- Se obțin construcții competitive, performante din punct de vedere tehnico-economic.

Avantaje în timpul exploatarei

- Se pot realiza structuri mai ușoare și eficiente, într-o mare varietate de forme;
- Se pot obține deschideri mai mari decât în cazul utilizării elementelor din lemn;
- Sistemul structural permite, în general, obținerea de spații tehnice pentru cabluri electrice și instalații sanitare;
- Materialele de protecție la foc pot fi înlocuite cu ușurință în urma unui eventual incendiu;
- Realizează o bună protecție termică și evită formarea condensului, în cazul respectării detaliilor de realizare;
- Nu afectează mediul înconjurător, sunt reciclabile, demolarea se face cu pierderi minime (Burstand, 2000).

Greutatea scăzută a acestor construcții este un avantaj deosebit de important în cazul terenurilor de fundare slabe sau a lucrărilor de supraetajare sau mansardare.

Profilele formate la rece pot fi utilizate în cadrul aceleiași structuri împreună cu profilele laminate la cald, acolo unde apar deschideri sau încărcări mari. De asemenea, la clădirile multietajate, realizate din profile laminate la cald, se poate profita de rezistența la acțiuni orizontale a panourilor de închidere realizate din profile formate la rece și tablă cutată (Mazzolani și Piluso, 1996).

2.2 Aplicații

În acest paragraf se prezintă câteva aplicații ale elementelor din oțel formate la rece în construcții, în care s-au utilizat produse LINDAB.

- Structura de susținere a învelitorii

În mod tradițional, prima utilizare structurală a profilelor din oțel formate la rece a fost ca pane pentru acoperiș sau rigle de susținere a tablei cutate pentru pereți (Figura 18). În general sunt folosite secțiuni Z, care permit suprapunerea peste grinzi în scopul creșterii eficienței structurale.



a)



b)

Fig. 18: Profile Z și C utilizate pentru: a) pane de acoperiș (ALCATEL-DATATIM, Timișoara) și b) rigle de perete (ARBEMA, Arad)

- Cadre pentru structura de rezistență

Din ce în ce mai mult, în ultimii ani, profilele formate la rece sunt utilizate și pentru structurile de rezistență principale ale clădirilor. Astfel, se obțin cadre cu stâlpi și rigle alcătuite din secțiuni compuse din profile de oțel formate la rece de tipul celor arătate în Figura 19.



Fig. 19: Cadre transversale pentru structura de rezistență, alcătuite din secțiuni compuse (ARBEMA, Arad)

- Pereți despărțitori

O aplicație specială o constituie pereții despărțitori pentru clădiri de locuit sau administrative. Acești pereți sunt realizați din plăci de gips-carton montate pe profile C așa cum se arată în Figura 20.



Fig. 20: Perete despărțitor în interiorul unei clădiri

- Panouri de perete prefabricate (sistem "wall-stud")

Panourile de perete pot fi preasamblate în fabrică și montate pe șantier, așa cum se arată în Figura 21.



Fig. 21: Sistem de panouri prefabricate pentru pereți și acoperiș din lemn

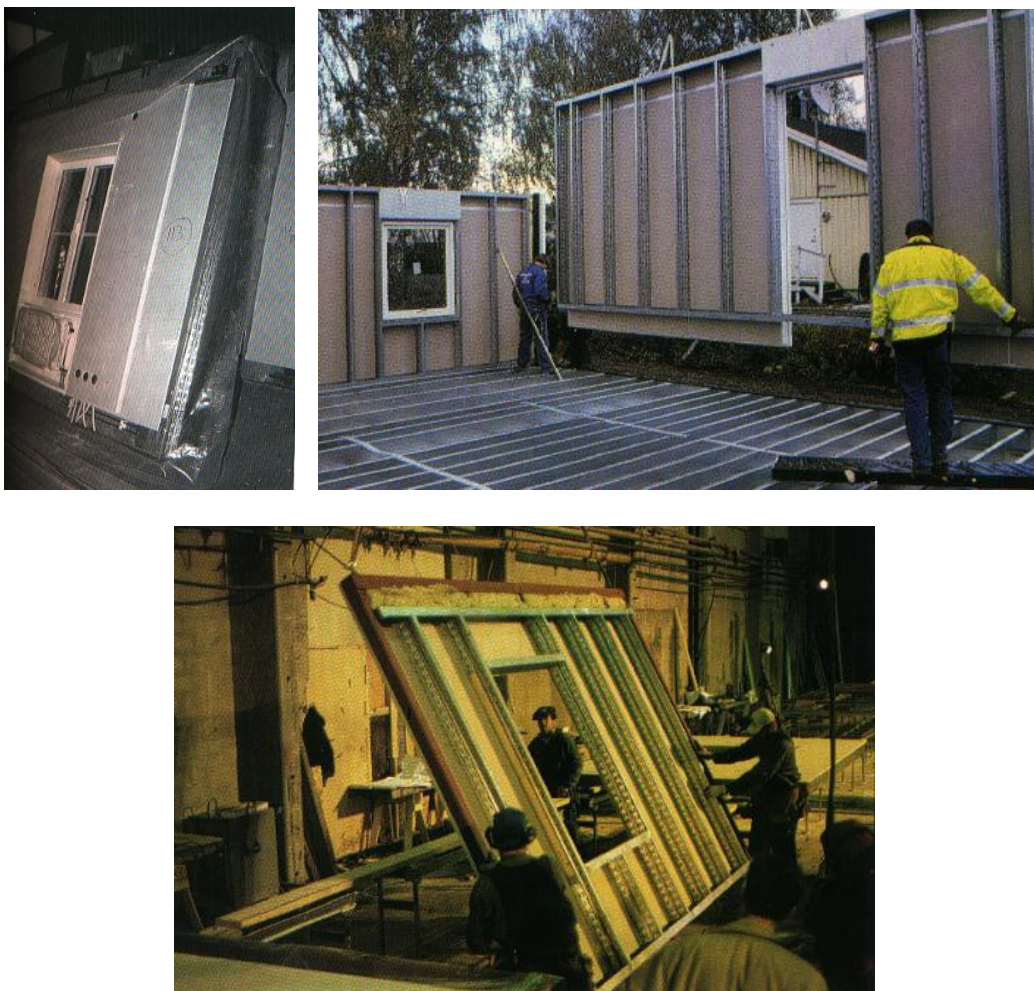


Fig. 22: Instalarea elementelor prefabricate pentru o casă de locuit unifamilială



Fig. 23: Panouri prefabricate realizate cu profile C perforate în vederea ruperii punții termice

- Grinzi pentru planșee (Figurile 24a,b,c,d, 25)

Profilele formate la rece pot fi utilizate ca o alternativă la grinzile din lemn pentru planșee cu deschideri reduse.



a)

b)



c)

d)



Fig. 24: Grinzi pentru planșee:

- (a) Profile C amplasate pe grinzile principale ale structurii de rezistență metalice
- (b) Profile C amplasate direct pe pereții prefabricați (sistem "wall-stud")
- (c) Detaliu prindere grindă de planșeu
- (d) Montarea tablei cutate pentru un planșeu ușor



Fig. 25: Structura planșeului: grinzi din profile formate la rece și tablă cutată, amplasate pe structura de rezistență metalică

- Panouri de tablă profilată pentru planșee mixte oțel-beton (Figurile 26, 27a,b).

În această situație tabla cutată poate fi utilizată cu rol de cofraj pierdut, dar și în conlucrare cu betonul dacă dispune de amprente sau s-au prevăzut conectori, pentru preluarea eforturilor, obținându-se astfel un planșeu mixt din oțel-beton.

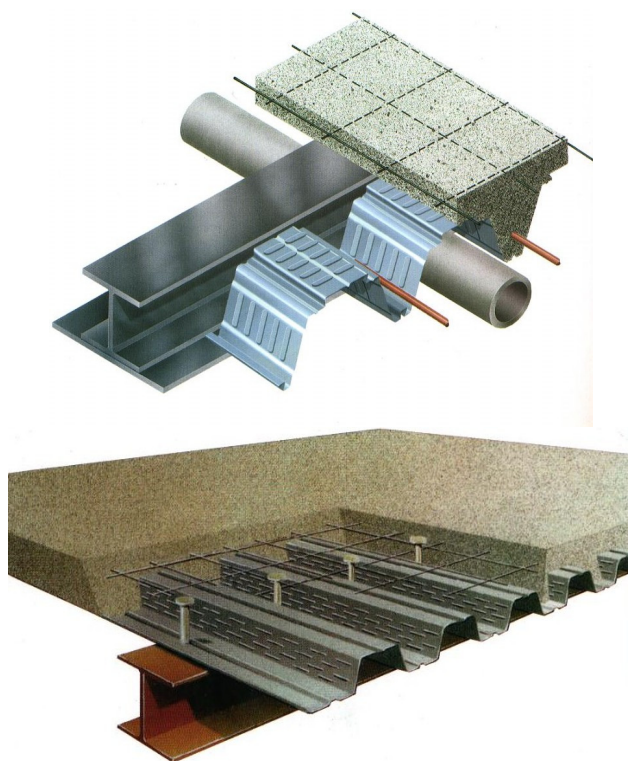


Fig. 26: Planșee din beton cu tablă cutată și grinzi metalice

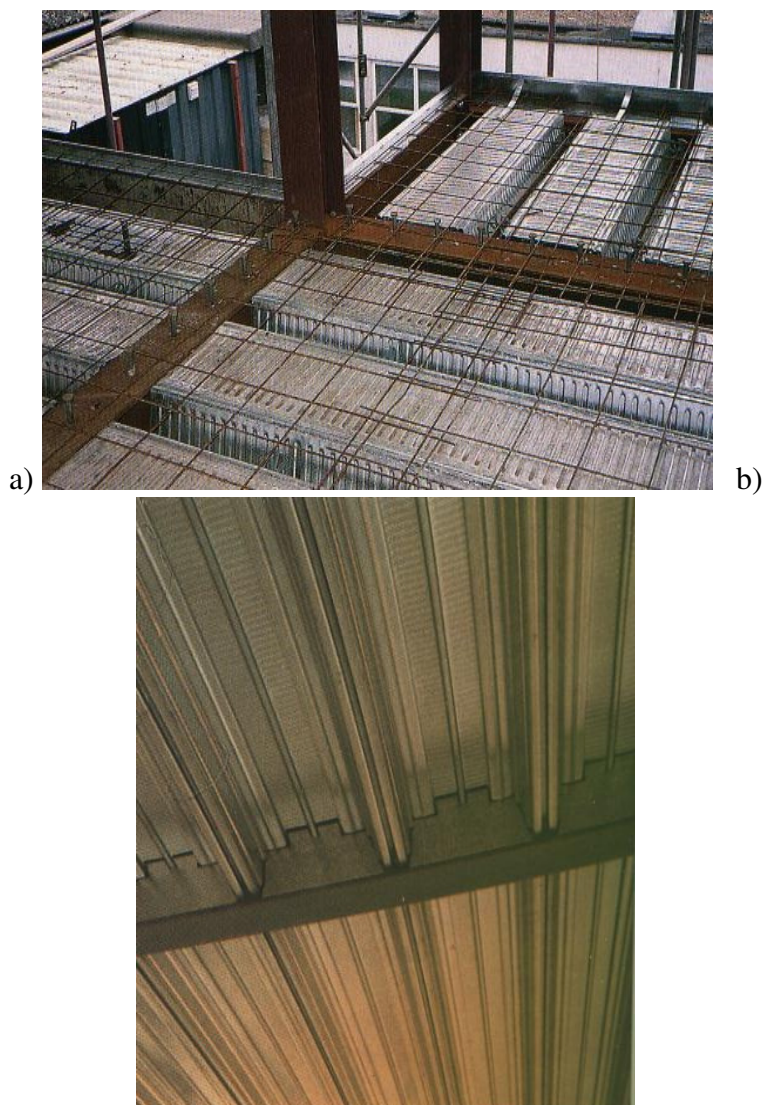


Fig. 27: Planșeu mixt din oțel-beton:
 (a) Cofrajul din tablă cutată și armături;
 (b) Poziționarea tablei cutate pe grinzile metalice.

- Ferme (Figurile 28, 29)

Fermele metalice realizate din profile formate la rece cu pereți subțiri se realizează în mod uzual folosind îmbinări cu șuruburi obișnuite. Există, de asemenea, posibilitatea realizării îmbinărilor cu șuruburi autofiletante sau prin ștanțare (sistem "Rosette").



Fig. 28: Ferme realizate din profile cu secțiune compusă din profile C de tip LINDAB, îmbinate cu șuruburi, pentru o supraetajare (ALCATEL, Timișoara)



Fig. 29: Sistem "Wall Stud" cu utilizarea fermelor pentru acoperiș (Dubina, 2002):
(a) structura de rezistență
(b) clădirea finisată

- Cadre din elemente îmbinate cu șuruburi pentru clădiri industriale (Figura 30)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 30: Structura de rezistență pentru o supraetajare, realizată din secțiuni compuse (Dubina, 2001):

(a) vedere generală; (b) secțiune compusă;
(c) detaliu îmbinare steașină d) detaliu îmbinare coamă

- Sisteme de depozitare

Sistemele de depozitare paletizate utilizează, în general, cadre din profile formate la rece perforate, și sisteme speciale de prindere, pentru a putea schimba ușor poziția pe verticală a rafturilor pentru depozitarea produselor (Figurile 31, 32).

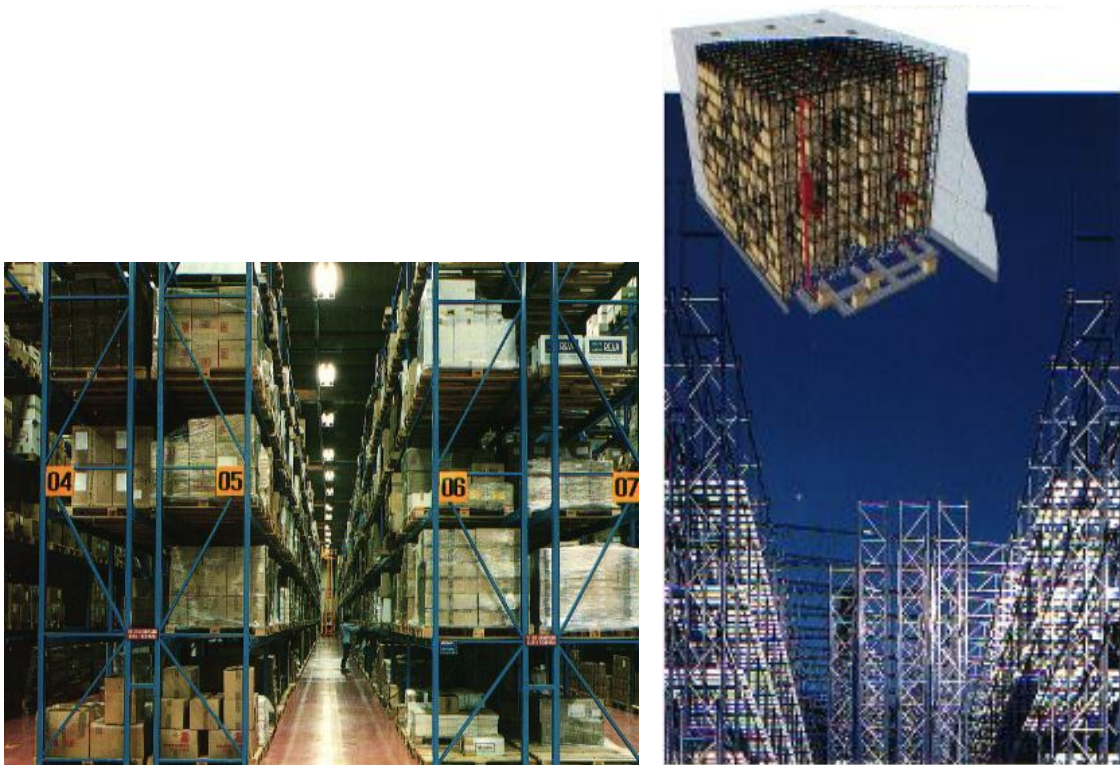


Fig. 31: Cadre pentru depozitare paletizată



Fig. 32: Profile perforate și detalii de îmbinare

- Clădiri prefabricate

O aplicație larg răspândită pentru profilele formate la rece o constituie unitățile prefabricate pentru clădirile de locuit și birouri. Acestea sunt ușor de transportat și se pot utiliza pentru construcții sezoniere sau chiar pentru clădiri definitive, așa cum se arată în Figura 33.



a)



b)



Fig. 33: Unități modulare prefabricate utilizate pentru un cămin studențesc la Universitatea din Walles, Cardiff (Lawson, 1999)
(a) Unitate modulară prefabricată; (b) Clădirea în timpul execuției;
(c) Clădirea finisată.



STANDARD ROMÂN

SR EN 1993-1-5

Aprilie 2008

**Eurocod 3: Proiectarea structurilor de oțel
Partea 1-5: Elemente structurale din plăci plane
solicitate în planul lor**

Eurocode 3 : Design of steel structures - Part 1-5 : Plated structural elements

Calcul des structures en acier - Partie 1-5 : Plaques planes

APROBARE

Aprobat de Directorul General al ASRO la 30 martie 2007
Standardul european EN 1993-1-5:2006 are statutul unui
standard român

CORESPONDENȚĂ

Acest standard este identic cu standardul european
EN 1993-1-5:2006

This standard is identical with the European Standard
EN 1993-1-5:2006

La présente norme est identique à la Norme européenne
EN 1993-1-5:2006

ASOCIAȚIA DE STANDARDIZARE DIN ROMÂNIA (ASRO)

Str. Mendeleev nr. 21-25, cod 010362, București

Director General: Tel.: +40 21 316 32 96, Fax: +40 21 316 08 70
