



Universitatea Politehnica Timișoara

Facultatea de Construcții

Departamentul de Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor

CONSTRUCȚII MIXTE OȚEL - BETON

- CURS 4-b -

Stâlpi cu secțiune compusă oțel-beton

Conf.dr.ing Adrian CIUTINA

Notele de curs pot fi descărcate de pe pagina de web
<http://www.ct.upt.ro/users/AdrianCiutina/>

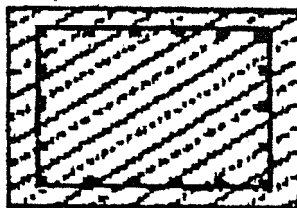
CAPITOLUL III–STÂLPI CU SECȚIUNE COMPUSĂ OȚEL-BETON

§ 3.1 Introducere

- **Stâlpii cu secțiune compusă** oferă multiple avantaje în comparație cu stâlpii metalici sau cei din beton și sunt folosiți tot mai des pentru structurile multietajate înalte.
- Un avantaj particular al folosirii stâlpilor cu secțiune compusă oțel-beton este reducerea secțiunii transversale, aceasta fiind de dorit în special în cazul structurilor înalte în care există încărcări mari și în care există cerința de spațiu.
- O considerație specială este atribuită rezistenței la foc a acestor secțiuni.

Exemplu de
avantaj al
secțiunii
compuse

Secțiune din
beton



80 / 120

Secțiune
compusă



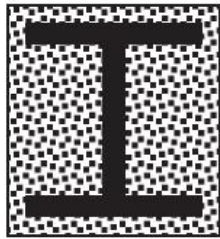
70 / 70

§ 3.1 Introducere

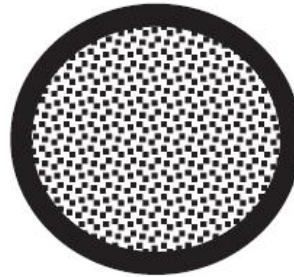
- Stâlpii cu secțiune compusă sunt realizabili în diferite tipuri de secțiuni transversale, unele fiind exemplificate mai jos.
- Între aceste tipologii, secțiunea metalică înglobată în beton (fig. a) reprezintă cea mai veche soluție de secțiune compusă. Inițial, datorită calității mai slabe a betonului, acesta a fost folosită doar pentru a spori rezistența la foc a secțiunii. Cercetări ulterioare au demonstrat faptul că prin folosirea unui beton cu rezistență superioară rezultă o secțiune cu rezistență sporită, permițând diminuarea secțiunii profilului metalic.
- În timpurile moderne, datorită aspectului dar și a faptului că înglobarea în beton are nevoie de cofrare, secțiunile metalice înglobate în beton sunt mai rar folosite decât țevile umplute cu beton (fig. b). Acestea permit folosirea profilului metalic pentru cofrare și prin urmare viteza de execuție va crește.

§ 3.1 Introducere

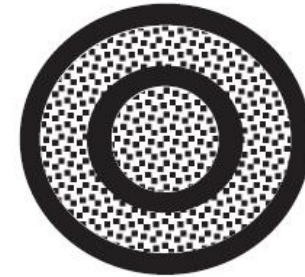
Tipuri de stâlpi cu secțiune compusă oțel-beton



a) Secțiune înglobată în beton



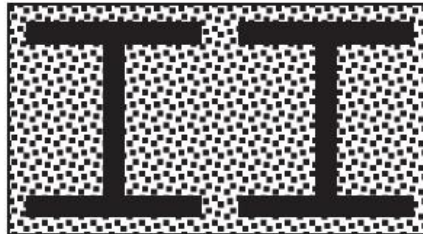
b) Țeavă (tub) umplută cu beton



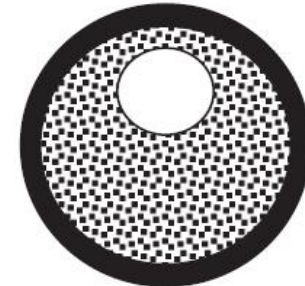
c) Țeavă în țeavă



d) Secțiune parțial înglobată în beton



e) Secțiune multiple înglobate în beton



f) Secțiuni nesimetrice

§ 3.1 Introducere

- Datorită inerentei rezistențe sporite la foc a țevelor umplute cu beton, protecția la foc a elementului metalic poate să nu fie necesară în multe cazuri iar oțelul expus să ofere doar rezistența pentru combinațiile SLU. În plus, datorită faptului că în domeniul construcțiilor viteza de execuție reprezintă un avantaj, în multe cazuri nu este dispusă o armătură interioară. Atunci când este necesar însă, se va dispune o armare corespunzătoare interioară, iar pentru cazurile de încărcare severă, se poate introduce chiar un tub interior în cel exterior (vezi figura c).
- O alternativă folosită în cazul secțiunilor total înglobate o reprezintă secțiunile parțial înglobate (vezi figura d), în care realizarea cofrajului este mult mai ușoară. În această tipologie, betonul este turnat între tălpile secțiunii metalice. Datorită faptului că inima profilului este protejată de acțiunea focului, rezistența la foc a acestei secțiuni este în mod semnificativ sporită.

§ 3.1 Introducere

- În cazul în care încărcarea aplicată este în mod particular mare, spre exemplu la nivelele inferioare ale clădirilor multietajate, stâlpii pot fi executați prin înglobarea a două sau mai multe profile metalice în beton, prin cofrare, sau chiar prin folosirea unor țevi largi, executate din table sudate (vezi figura e).
- Secțiunile compuse ale stâlpilor de mai sus sunt toate simetrice. De multe ori însă, secțiunile compuse nesimetrice nu pot fi evitate. Spre exemplu, atunci când este cerut ca anumite conducte sau servicii tehnologice să treacă prin interiorul betonului stâlpilor compuși, sau în condițiile în care secțiunea metalică trebuie poziționată într-o anumită parte a secțiunii compuse (vezi figura f).

§ 3.1 Introducere

METODE DE PROIECTARE A STÂLPILOR CU SECȚIUNE COMPUSĂ OȚEL-BETON

- Eurocode 4 prezintă 2 metode de calcul a stâlpilor:
 - n O **metodă generală**, valabilă pentru toate tipurile de stâlpi, inclusiv cei cu secțiuni variabilă pe înălțime. Această metodă ia în calcul efectele de flambaj de ordinul doi, imperfecțiunile, comportamentul neliniar al materialelor etc. Metoda generală de calcul necesită însă resurse de calcul importante și se face de obicei cu ajutorul elementelor finite și a programelor de calcul automat.
 - n O **metodă simplificată**, care este folosită în calculul uzual al stâlpilor cu secțiuni compuse, aplicabilă secțiunilor de stâlpi cu simetrie dublă și cu secțiuni uniformă pe înălțimea stâlpului. Această metodă folosește curbele europene de flambaj date în Eurocode 3.

§ 3.1 Introducere

- Eurocode 4 este aplicabil pentru betoanele cu rezistențe normale, care au o rezistență cilindrică de maximum 50N/mm^2 . Datorită faptului că stâlpii sunt proiectați în principal pentru a prelua încărcări mari de compresiune, de multe ori este mai economic să se folosească betoane de înaltă rezistență, cu rezistența cilindrică de până la 100N/mm^2 .
- Deși betonul cu rezistență înaltă poate fi utilizat cu succes pentru a îngloba secțiunile metalice, acesta prezintă cedări fragile, de aceea betoanele cu rezistențe înalte sunt mai potrivite pentru umplerea țevelor. Cercetări recente au demonstrat faptul că Eurocode 4 ar putea fi modificat cu ușurință pentru a permite folosirea uzuală a betoanelor de înaltă rezistență pentru umplerea țevelor.

§ 3.2 Stâlpi cu secţiune compusă solicitati axial

VOALAREA ELEMENTELOR DIN OȚEL

- Pentru a folosi în întregime rezistența oțelului, trebuie împiedecată voalarea locală, astfel încât aceasta să se producă doar după ce este atinsă rezistența de curgere a oțelului. Astfel, secțiunea elementului metalic trebuie să fie de clasă 3 (semi-compactă) sau mai mică. Pentru stâlpii compuși, deformația relativă a betonului la rupere este aproximativ 0,0035, în timp ce deformația relativă a oțelului la curgere este de numai 0,00175.
- De aceea, atunci când o secțiune compusă este supusă la compresiune, și atât oțelul cât și betonul sunt supuse aceleiași deformații, oțelul va curge înainte ca betonul să-și dezvolte întreaga rezistență la compresiune. Pentru ca betonul să poată ajunge la deformația de cedare este nevoie ca elementele metalice să poată continua deformația (plastică) fără pierderea stabilității locale. În acest mod betonul poate prelua deformații suplimentare, până la atingerea deformației de cedare. Prin urmare, în conformitate cu definițiile claselor de secțiuni transversale, elementele metalice trebuie să fie de clasă 2 (compacte), pentru a preveni voalarea locală în interiorul secțiunii compuse oțel-beton.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

VOALAREA ELEMENTELOR DIN OȚEL

- Datorită acestui fapt, cerințele de control ale voalării sunt mult mai severe în cazul secțiunilor compuse decât în cazul secțiunilor metalice.
- Cu toate acestea, datorită faptului că betonul împiedică în mod eficient voalarea profilelor metalice din secțiunile compuse, raporturile lățime/grosime admisibile ale plăcilor metalice sunt semnificativ mai mari decât în cazul elementelor metalice simple.
- Eurocode 4 este aplicabil numai stâlpilor cu secțiune compusă pentru care voalarea plăcilor metalice este împiedecată. Pentru elementele metalice total înglobate în beton, pentru care raporturile lățime/grosime sunt inferioare celor cerute de normă, voalarea nu se produce și prin urmare se poate folosi întreaga rezistență plastică a secțiunii.
- Pentru alte tipuri de secțiuni compuse, tabelul de mai jos oferă valorile maxime ale raporturilor lățime/grosime pentru a preveni voalarea. Aceste valori sunt oferite comparativ cu cerințele pentru elementele metalice, date în Eurocode 3 1-1.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

VOALAREA ELEMENTELOR DIN OȚEL

Tabel: Limitele maxime ale raporturilor lățime/grosime

Tipul secțiunii	Eurocode 4 partea 1.1: Cerințe pentru secțiuni compuse	Eurocode 3 partea 1.1: Secțiuni metalice
Țevi rectangulare	52ε	42ε
Țevi rotunde	$90\varepsilon^2$	$90\varepsilon^2$
Profile I parțial înglobate	44ε	30ε

- Umplerea țevelor rectangulare cu beton îmbunătățește sensibil rezistența la voalare a elementelor metalice. Aceasta datorită modului de voalare a țevelor rectangulare care constă în unde de voalare atât interioare cât și exterioare în lungul tubului. Atunci când tubul este umplut, undele de voalare interioare sunt împiedicate, forțând apariția modurilor superioare de voalare.
- În schimb, jumătățile undelor de voalare pentru țevile circulare metalice sunt mici și constau în principal din unde circumferențiale exterioare. În acest caz umplerea cu beton nu îmbunătățește rezistența la voalare a elementului din oțel.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ A UNEI SECȚIUNI COMPUSE

- Dacă voalarea elementului din oțel este împiedecată, astfel încât oțelul ajunge la efortul maxim, rezistența la compresiune a unei secțiuni compuse este calculată cu:

$$N_{pl,Rd} = A_a f_y / \gamma_a + \alpha A_c f_{ck} / \gamma_c + A_s f_{sk} / \gamma_s$$

- Notățiile folosite în formula de mai sus:
 - n A – aria secțiunii, f – rezistența de calcul a materialului;
 - n indicii a , c și s se referă la oțel, beton, respectiv armătură;
 - n α – factor care se aplică betonului, care se ia:
 - $\alpha = 1.0$ pentru țevile umplute cu beton,
 - $\alpha = 0.85$ pentru secțiuni înglobate în beton (pentru luarea în considerare a deteriorării betonului la acțiunea mediului și a fisurării).

Obs: Așa cum se poate observa, în cazul betonului se aplică un factor de 0,85 care ia în considerare deteriorarea rezistenței datorită expunerii acestuia la mediu și a fisurării. În cazul betonului din interiorul țevilor, în care betonul este protejat, rezistența la compresiune a acestuia nu se deteriorează în timp, iar factorul 0,85 poate fi omis.

§ 3.2 Stâlpi cu secţiune compusă solicitaţi axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

- Ecuația de mai sus este general aplicabilă secțiunilor transversale compuse. În cazul țevilor circulare umplute cu beton, trebuie inclusă confinarea betonului. Odată cu atingerea rezistenței plastice, coeficientul lui Poisson crește drastic. Această dilatare laterală rapidă este împiedicată de țeava metalică, care are o rezistență mult mai mare și un coeficient al lui Poisson mult mai mic. Acest fenomen se numește confinare, care conduce la creșterea rezistenței de cedare a betonului.
- Atât țevile dreptunghiulare cât și cele circulare pot confina betonul, însă efectul confinării în țevile dreptunghiulare este neuniform și neînsemnat și pentru siguranță poate fi ignorat. În proiectare, avantajul confinării este considerat doar pentru țevile circulare umplute cu beton. În cazul în care oțelul împiedică dilatarea betonului este produs și un efect de întindere în direcție circumferențiară, care conduce la o reducere a rezistenței în direcție longitudinală. În ciuda acestui fapt, efectul global este o creștere netă a rezistenței axiale a secțiunii compuse oțel-beton.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

○ Pentru stâlpii lungi sau stâlpii care sunt supuși la momente încovoietoare importante, deformația relativă de cedare este mică iar coeficientul lui Poisson caracteristic este similar cu cel al oțelului. De aceea, atât betonul cât și oțelul vor fi supuse aceleiași dilatări laterale iar oțelul nu va confina betonul. În general, forța critică la flambaj a țevelor circulare umplute cu beton, incluzând confinarea se calculează cu relația:

$$N_{pl,Rd} = \eta_2 A_a f_y / \gamma_a + A_c f_{ck} \left(1 + \eta_1 \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) / \gamma_c + A_s f_{sk} / \gamma_s$$

În care:

$$\eta_1 = \eta_{10} \left(1 - \frac{10e}{D} \right) \text{ dar } > 0.0 \text{ cu } \eta_{10} = 4.9 - 18.5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2$$

iar

$$\eta_2 = \left(\eta_{20} + (1 - \eta_{20}) \frac{10e}{D} \right) \text{ dar } < 1.0 \text{ cu } \eta_{20} = 0.25(3 + 2\bar{\lambda})$$

unde e este excentricitatea, D diametrul exterior al secțiunii metalice, iar $\bar{\lambda}$ este zveltețea adimensională a stâlpului.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

- În formula e mai sus, $\bar{\lambda}$ este calculat cu:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{cr}}}$$

unde:

- n $N_{pl,R}$ reprezintă valoarea $N_{pl,Rd}$ definită mai sus, dar calculată folosind factorii parțiali de siguranță γ_a , γ_c și γ_s egali cu 1.
- n N_{cr} forța critică de flambaj (efortul lui Euler), calculată cu:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 (EI)_e}{L_e^2}$$

- n $(EI)_e$ este rigiditatea eficace la încovoiere a secțiunii compuse, iar L_e este lungimea eficace a stâlpului.

- Rigiditatea eficace la încovoiere a secțiunii compuse este dată de:

$$(EI)_e = E_a I_a + 0.8 E_{cd} I_c + E_s I_s$$

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

○ În formula de mai sus:

n E este modulul de elasticitate al materialului

n I este momentul de inerție al materialelor componente (a , c și s) calculat față de axa principală de inerție a secțiunii compuse.

○ Modulul de elasticitate redus al betonului E_{cd} este obținut prin:

$$E_{cd} = E_{cm} / \gamma_m = E_{cm} / 1.35$$

unde:

n E_{cm} este modulul de elasticitate secant al betonului

n γ_m (= 1.35) factorul parțial de siguranță de material.

○ Acest factor de 1.35, în combinație cu factorul de 0.8 folosit în ecuația rigidității eficace la încovoiere este utilizat pentru luarea în considerare a efectului de fisurare a betonului, astfel încât calculul să poată fi efectuat pe secțiunea nefisurată.

§ 3.2 Stâlpi cu secţiune compusă solicitaţi axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

- Dacă un stâlp cu o secţiune ideală compusă ar fi supus la compresiune axială, stâlpul s-ar comprima uniform, fără a produce momente încovoietoare adiționale.
- În cazul stâlpilor reali, datorită imperfecțiunilor inițiale, sunt generate momente încovoietoare de ordinul doi. Aceste momente încovoietoare produc creșteri ale tensiunilor (curburi) ale secțiunilor compuse. Sub influența efectelor de contracție și curgere lentă, creșterile tensiunilor sunt accentuate, conducând la momente încovoietoare amplificate și cedări premature ale stâlpilor cu secțiune compusă.
- Pentru a lua în considerare efectele de contracție și curgere lentă, rigiditatea eficace de calcul a betonului este redusă în Eurocode 4, și prin urmare E_{cd} din ecuația corespunzătoare este înlocuit cu E_c :

$$E_c = E_{cd} \left(1 - 0.5 \frac{N_{G,Sd}}{N_{Sd}} \right)$$

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

unde:

- n $N_{G,Sd}$ este fracțiunea permanentă a încărcării (de lungă durată);
- n N_{Sd} este încărcarea de calcul.

○ Efectele de contracție și curgere lentă a betonului induc momente încovoietoare secundare în stâlpii cu secțiune compusă prin amplificarea deformațiilor laterale datorită imperfecțiunilor. În funcție de zveltețea stâlpului și a excentricității, efectele de contracție și curgere lentă pot fi suficient de mici pentru a fi ignorate. Prin urmare, la folosirea ecuației de mai sus, pot fi observate următoarele domenii de aplicare:

- n Dezvoltarea momentelor încovoietoare de ordinul II depinde în primul rând de zveltețea stâlpului. Cu cât un stâlp este mai zvelt, cu atât este mai mare momentul de ordinul II. În acest mod, efectele produse de contracție și curgere lentă sunt mai pronunțate în cazul stâlpilor mai zvelți. În cazul stâlpilor scurți, efectele produse de contracție și curgere lentă sunt mai mici și pot fi ignorate. Eurocode 4 are anumite limite ale zvelteții a stâlpilor cu secțiune compusă, sub care efectele produse de contracție și curgere lentă nu vor fi considerate în calcul.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

FORȚA CRITICĂ DE FLAMBAJ

Importanța momentelor încovoietoare de ordinul II depinde de mărimea momentelor încovoietoare principale. Atunci când momentele încovoietoare sunt minore, momentele încovoietoare secundare sunt relativ importante, iar efectele $P-\delta$ induse de curgerea lentă trebuie considerate. În schimb, atunci când momentele încovoietoare principale sunt importante, momentele încovoietoare secundare induse de curgerea lentă sunt mici și pot fi ignorate. Eurocode 4 a stabilit o limită superioară a excentricității la dublul dimensiunii secțiunii transversale, peste care momentele încovoietoare secundare pot fi ignorate. De notat că aceasta limită este relativ mare și nu se întâlnesc foarte des stâlpi care să poată susține momente încovoietoare atât de importante.

REZISTENȚA DE CALCUL LA COMPRESIUNE

Rezistența la compresiune și forța critică de flambaj a secțiunii compuse reprezintă valorile maxime ale rezistenței secțiunii compuse. În condițiile reale, diferitele tipuri de imperfecțiuni vor genera momente încovoietoare secundare, iar rezistența secțiunii transversale va fi mai mică. Pentru calculul stâlpilor compuși, pot fi folosite atât abordările calculului betonului cât și a oțelului.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

REZISTENȚA DE CALCUL LA COMPRESIUNE

- Eurocode 4 folosește abordarea caracteristică elementelor metalice, iar rezistența stâlpului compus este calculată prin:

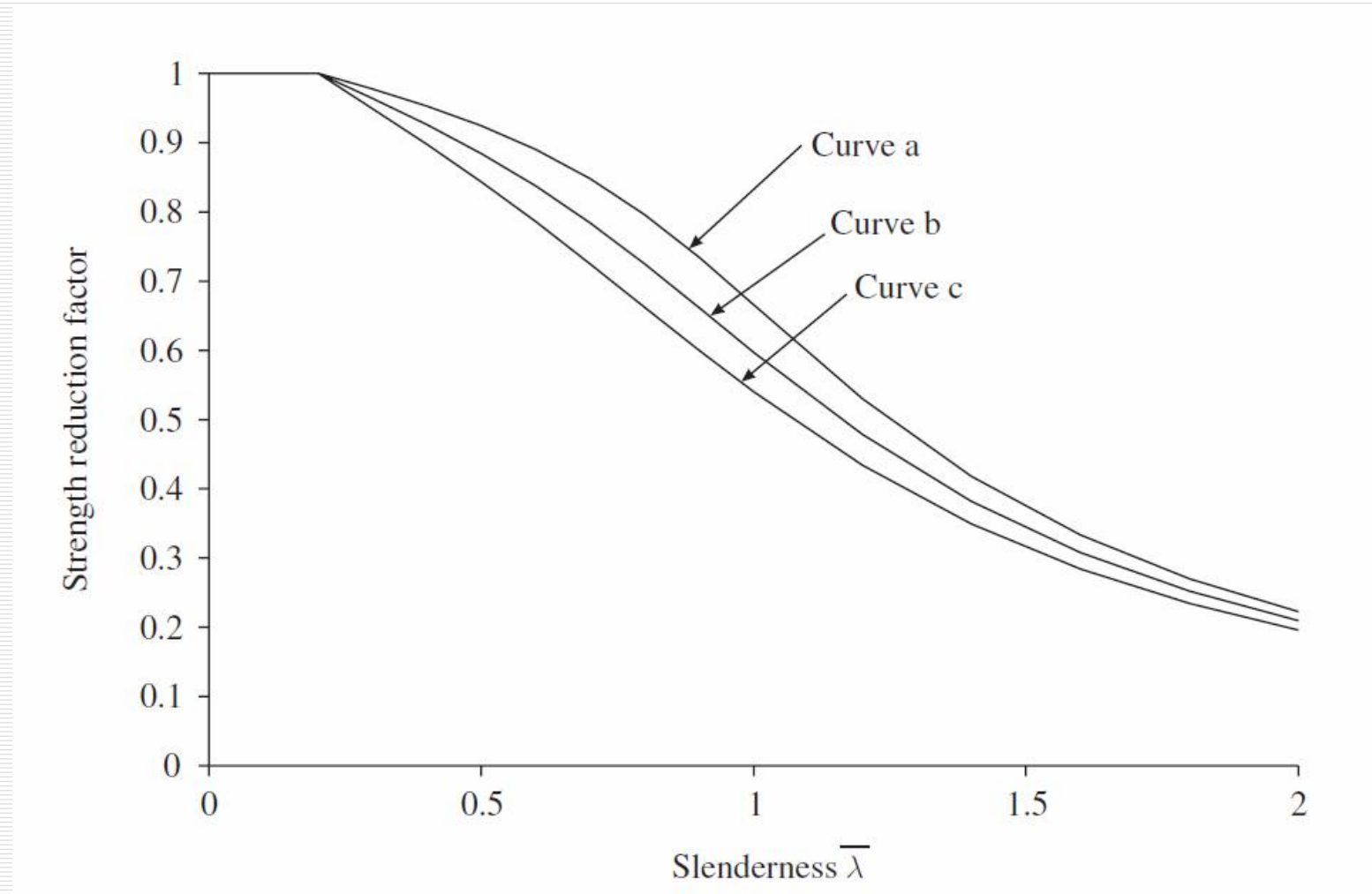
$$N_{Rd} = \chi N_{pl,Rd}$$

unde χ este factorul de reducere a rezistenței stâlpului și este dat în funcție de zveltețea adimensională $\bar{\lambda}$ a acestuia.

- Legătura dintre factorul de reducere a rezistenței stâlpului χ și zveltețea adimensională este dată prin intermediul unei curbe de flambaj. Figura de mai jos exemplifică trei curbe de flambaj folosite în Eurocode 4. Alegerea unei curbe de flambaj depinde de tipul secțiunii transversale a stâlpului și de axa pe care acesta flambează. Bazată pe teste de calibrare, curba de flambaj “a” poate fi folosită pentru țevi metalice umplute cu beton, iar curbele “b” și “c” pentru profile metalice înglobate în beton, încovoiate după axa maximă, respectiv axa minimă de inerție a secțiunii metalice.

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă solicitați axial

REZISTENȚA DE CALCUL LA COMPRESIUNE



Curbele de flambaj pentru stâlpii cu secțiune compusă

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă sollicitați axial

SECȚIUNI NESIMETRICE

- Metoda de calcul de mai sus este adecvată doar pentru stâlpii cu secțiune compusă dublu-simetrică. Totuși, ea poate fi aplicată și pentru stâlpii cu secțiune nesimetrică. Însă în acest caz, chiar și pentru compresiunea pură, un stâlp cu secțiune nesimetrică trebuie calculat la acțiunea combinată la compresiune și moment încovoietor. Aceasta se datorează faptului că rezultanta forțelor de compresiune acționează în centrul elastic al secțiunii compuse, conform distribuției rigidității axiale, în timp ce rezistența de calcul la compresiune acționează în centrul plastic, în conformitate cu distribuția rezistențelor plastice. Aceste centre nu coincid în cazul secțiunilor nesimetrice.
- Pentru secțiunile nesimetrice se poate folosi o metoda de calcul simplificată, în locul calculului complet la compresiune și încovoiere. În această metodă, rezistența la compresiune a stâlpului, calculată în raport cu centrul plastic de compresiune ($N_{Rd,pl}$) se calculează cu:

§ 3.2 Stâlpi cu secțiune compusă sollicitați axial

SECȚIUNI NESIMETRICE

$$N_{Rd,pl} = \chi_{pl} N_{pl,Rd}$$

unde factorul de reducere a rezistenței față de centrul plastic de compresiune (χ_{pl}) este dat în funcție de centrul elastic de compresiune (χ_{el}) prin:

$$\chi_{pl} = \left(\frac{\alpha}{2} - \sqrt{\frac{\alpha^2}{4} - \frac{\chi_{el}}{\bar{\lambda}^2}} \right)$$

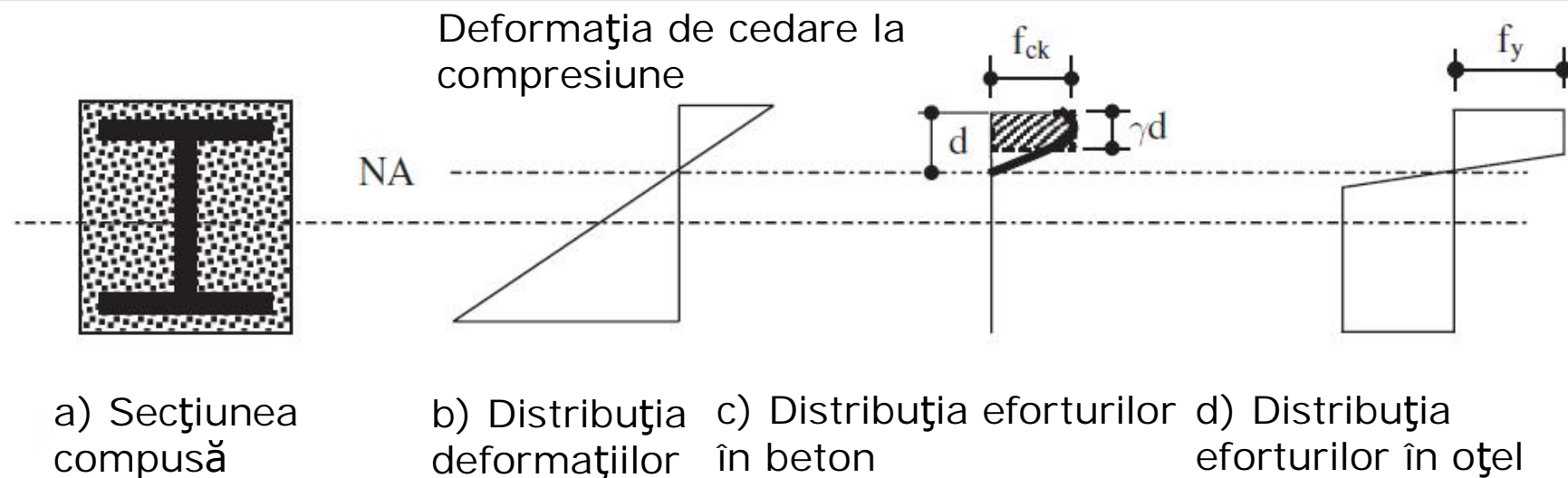
unde α este
dat de:

$$\alpha = \left(\chi_{el} + \frac{1.1}{\bar{\lambda}^2} \right)$$

○ În formulele de mai sus, zveltețea adimensională a stâlpului $\bar{\lambda}$ și factorul de reducere a rezistenței față de centrul elastic de compresiune (χ_{el}) sunt calculate în mod identic cu cele utilizate în cazul secțiunilor simetrice.

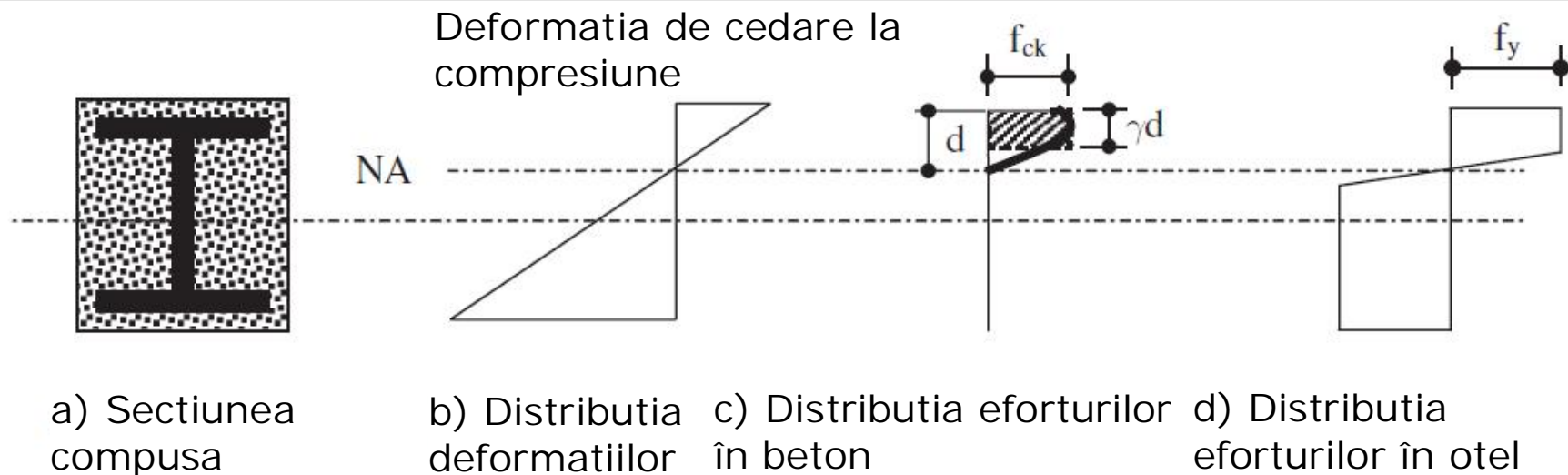
§ 3.3 Acțiunea compusă la compresiune cu moment încovoietor

○ Pentru calculul unei unui stâlp cu secțiune compusă la acțiunea combinată a momentului încovoietor cu forță axială, este necesară evaluarea diagramei de interacțiune $N-M$ (forță axială-moment încovoietor) a întregii secțiuni compuse. Această diagramă oferă condițiile de cedare a acțiunii combinate a momentului încovoietor cu forță axială și reprezintă baza de proiectare pentru stâlpii cu secțiune compusă.



§ 3.3 Compresiune cu încovoiere

CURBA DE INTERACȚIUNE N-M

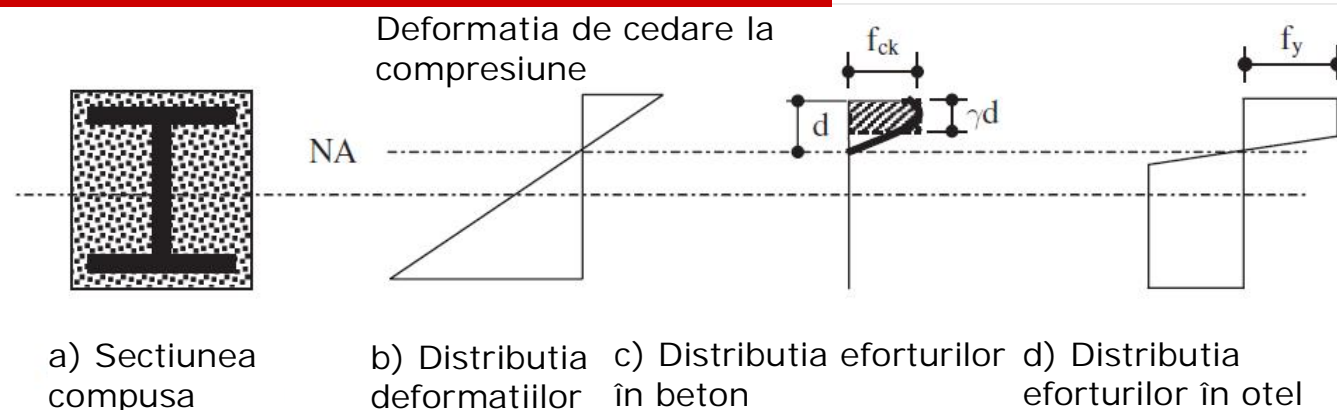


○ Figura de mai sus oferă procedura generală folosită pentru evaluarea diagramei de interacțiune $N-M$ a unei secțiuni compuse:

- n Se stabilește deformația din fibra cea mai comprimată a betonului la valoarea de cedare.
- n Este aleasă o poziție arbitrară a axei neutre (AN). Considerând faptul că deformația relativă a betonului este liniară, poate fi determinată variația deformației pe înălțimea secțiunii transversale (figura b).

§ 3.3 Compresiune cu încovoiere

CURBA DE INTERACȚIUNE N-M



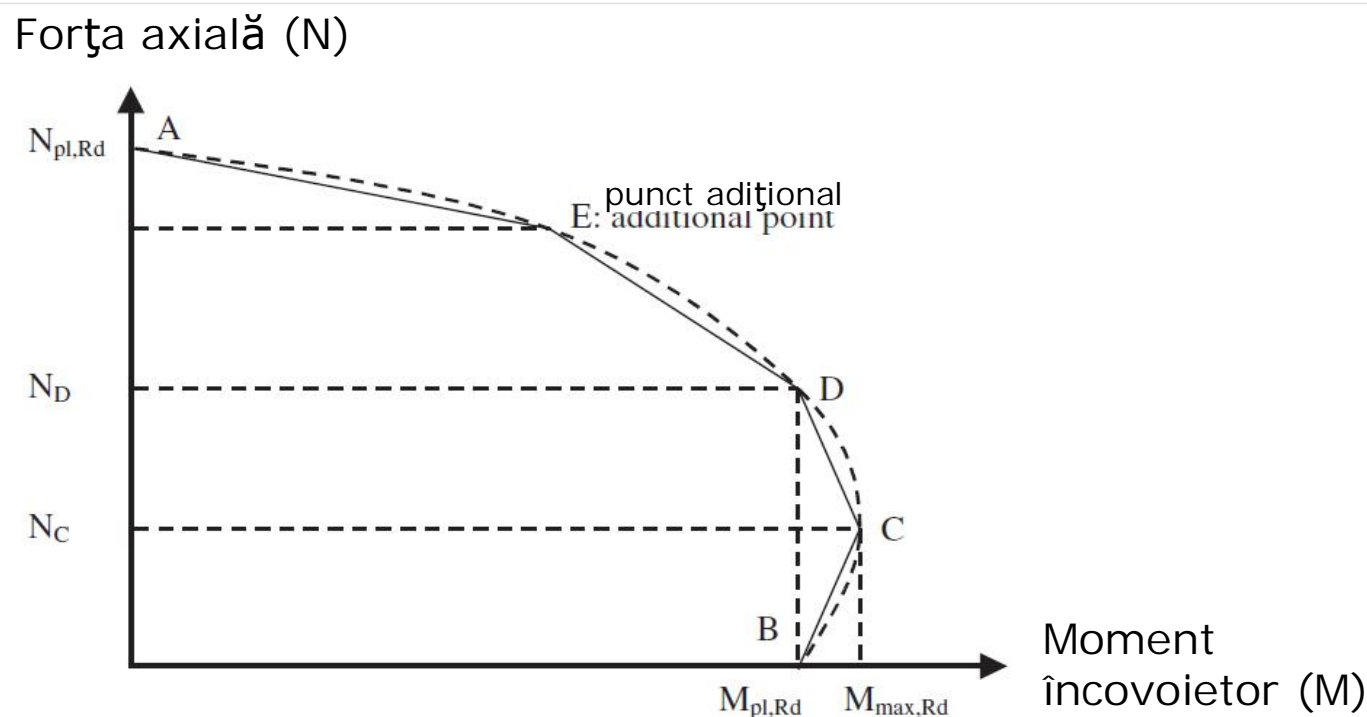
- n Este evaluată distribuția eforturilor pentru secțiunea compusă, în conformitate cu distribuția deformațiilor și a legii de comportament efort-deformație a materialelor constitutive. Se presupune faptul că betonul nu oferă nici o rezistență la întindere. Distribuția eforturilor poate fi obținută din figurile c și d.
- n Forța axială se poate obține prin integrarea eforturilor pe întreaga secțiune compusă. Momentul încovoietor este obținut prin produsul dintre forța axială și brațul acesteia față de centrul plastic de compresiune al secțiunii transversale. Această pereche (N și M) determină un punct pe curba de interacțiune $N-M$.
- n Schimbând poziția axei neutre, se vor obține alte puncte de pe curba de interacțiune $N-M$ a secțiunii compuse.

§ 3.3 Compresiune cu încovoiere

CURBA DE INTERACȚIUNE N–M

- Datorită ipotezei conform căreia betonul nu prezintă rezistență la întindere, curba de interacțiune N – M este convexă, după cum se poate observa în figura de mai jos:

Curba de interacțiune forță axială – moment încovoietor pentru secțiunile compuse oțel-beton



Obs: Procedura generală descrisă mai sus este destul de laborioasă și cel mai bine este efectuată prin intermediul programelor automate de calcul. Pentru un calcul simplificat, distribuția eforturilor din beton poate fi aproximată printr-o distribuție uniformă în blocuri plastice, cu o înălțime de comprimare redusă, ca în figura c.