



Universitatea Politehnica Timișoara

Facultatea de Construcții

Departamentul de Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor

COMPOSITE STEEL-CONCRETE STRUCTURES

- CURS 3 -

Grinzi compuse(2)

Conf.dr.ing Adrian CIUTINA

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

- Pentru calculul plastic al grinzilor compuse se consideră faptul că în starea limită ultimă de rezistență există o distribuție plastică a eforturilor.
- În consecință, eforturile din zona solicitată la întindere a profilului metalic și din zona comprimată a dalei din beton armat se consideră că sunt uniform distribuite pe secțiunea transversală. Acest lucru este posibil prin respectarea următoarelor condiții (ipoteze de calcul):
 - n Rezistența la forfecare verticală este asigurată doar de către secțiunea profilului din oțel.
 - n În ecuațiile pentru calculul momentului rezistent plastic, se admite că dala din beton armat este plină sau turnată pe un cofraj din tablă profilată. În cazul în care este folosită o tablă profilată, eforturile din betonul de pe înălțimea acesteia sunt în general ignorate în calculul plastic.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

- n Se acceptă o distribuție plastică uniformă de eforturi, egală cu limita de curgere f_y/γ_a în secțiunea grinzii metalice (la întindere sau compresiune). În cazul în care axa neutră plastică este în secțiunea metalică, aceasta trebuie să fie de clasă 1 sau 2).
- n Distribuția eforturilor normale în betonul comprimat este uniformă, având valoarea $0,85f_{ck}/\gamma_c$.
- n Rezistența la întindere a betonului este neglijată.
- n În calculul momentului rezistent plastic pozitiv, se va ignora prezența armăturilor în dala din beton comprimată. Ele vor fi luate în considerare numai în zonele de moment negativ.
- n Armăturile întinse (la momente negative) sunt sollicitate la un efort plastic f_{sk}/γ_s .
- n Conexiunea din secțiunea de calcul se consideră completă (nu există deplasări relative între dala din beton / armături / profilul metalic).

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

- În cazul secțiunii supuse la momente încovoietoare pozitive, fibrele inferioare ale grinzii compuse sunt întinse, cele superioare fiind comprimate.
- Determinarea momentului capabil plastic pozitiv se face diferit în funcție de poziția axei neutre plastice.

CAZUL I: ANP se găsește în dala din beton armat

- Pentru stabilirea cu exactitate a **Axei Neutre Plastice (ANP)**, se calculează rezultantele eforturilor uniforme plastice din dala din beton armat F_c respectiv din profilul metalic F_a a grinzii compuse, ANP rezultând din comparația acestor două valori:

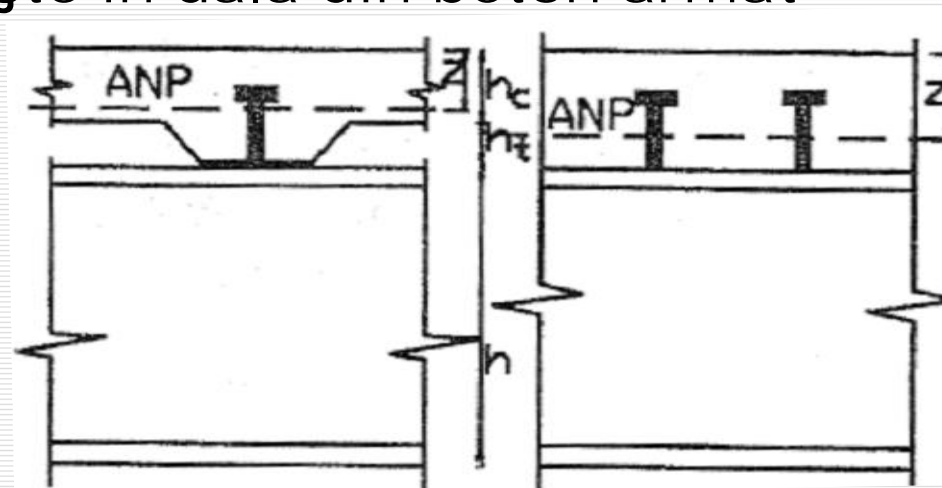
- n Dacă $F_c > F_a$, ANP se găsește în dala din beton armat;
- n Dacă $F_c < F_a$, ANP se găsește în profilul metalic.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

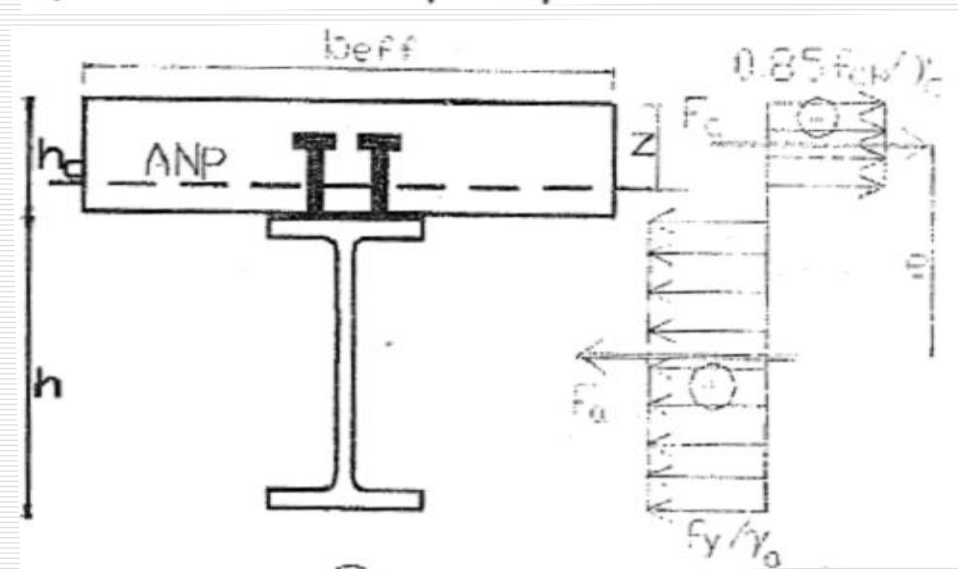
SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL I: ANP se găsește în dala din beton armat

- Poziția axei neutre în placa din beton:
exemplu pentru o dală cu tablă profilată, respectiv placă plină din beton.



- Secțiune transversală și diagramele de eforturi plastice.



§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL I: ANP se găsește în dala din beton armat

- Rezultanta eforturilor de compresiune din dala de beton, pe toată grosimea acesteia h_c este:

$$F_c = b_{eff} \cdot h_c \cdot 0.85 f_{ck} / \gamma_c$$

- Rezultanta eforturilor de întindere din profilul metalic este:

$$F_a = A_a \cdot f_y / \gamma_a$$

unde: b_{eff} este lățimea eficace a dalei din beton;

h_c este grosimea dalei din beton;

f_{ck} - rezistența caracteristică a betonului la compresiune;

γ_a, γ_c sunt coeficienții parțiali de siguranță ai oțelului structural, respectiv ai betonului;

A_a este aria profilului din oțel.

- Dacă $F_c > F_a$, ANP se găsește în dala din beton armat.
-

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL I: ANP se găsește în dala din beton armat

- Pentru a determina poziția exactă a ANP, exprimată prin intermediul distanței z față de fibra superioară a plăcii din beton, se va scrie rezultanta eforturilor de compresiune pentru porțiunea de deasupra ANP și se egalează cu rezultanta eforturilor de întindere din profilul metalic:

$$b_{eff} \cdot z \cdot 0.85 f_{ck} / \gamma_c = A_a \cdot f_y / \gamma_a$$

- De unde rezultă distanța z :

$$z = \frac{A_a \cdot f_y}{0.85 f_{ck} \cdot b_{eff}} \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_a} \leq h_c$$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL I: ANP se găsește în dala din beton armat

- Momentul plastic rezistent se determină prin produsul dintre rezultanta eforturilor de întindere din profilul metalic F_a și distanța e (momentul calculat față de centrul de greutate al dalei comprimate):

$$M_{pl.Rd}^+ = F_a \cdot e$$

- unde e este distanța de la centrul de greutate al profilului metalic la centrul de greutate al zonei comprimate din beton:

$$e = \frac{h}{2} + h_c - \frac{z}{2} = \frac{1}{2}(h + 2h_c - z)$$

- Momentul plastic rezistent pozitiv se poate scrie:

$$M_{pl.Rd}^+ = A_a \cdot f_y / \gamma_a \cdot \frac{1}{2}(h + 2h_c - z) \quad \text{sau:} \quad M_{pl.Rd}^+ = \frac{1}{2\gamma_a} A_a \cdot f_y \cdot (h + 2h_c - z)$$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL II: ANP se găsește în inima profilului metalic

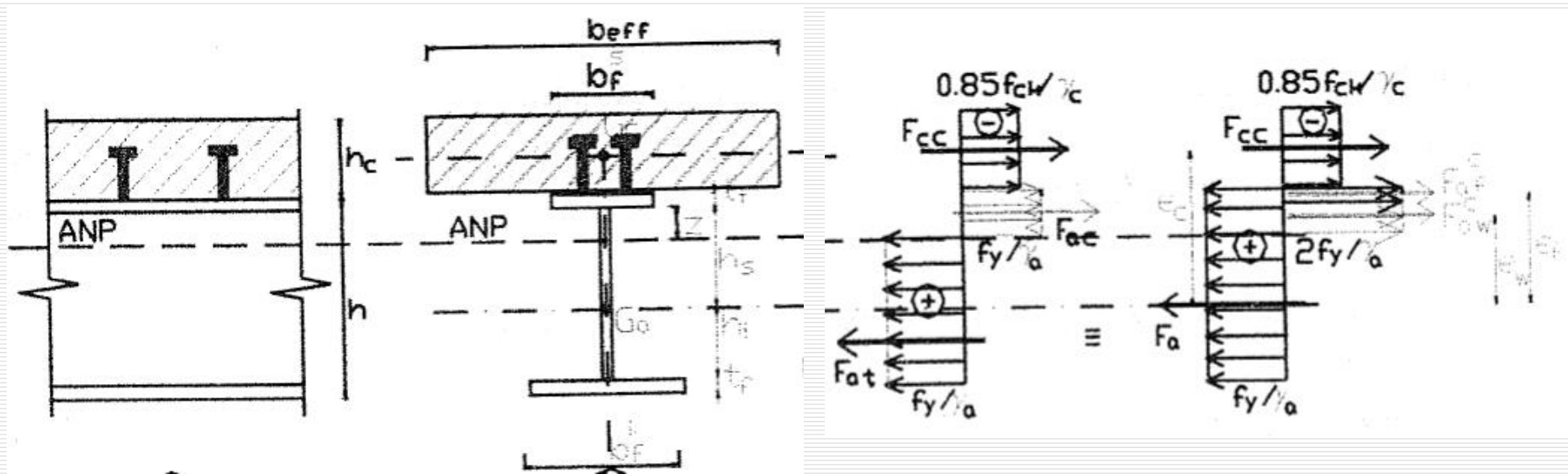
- Dacă rezultanta eforturilor de întindere din profilul metalic F_a este mai mare decât rezultanta eforturilor de compresiune F_c , atunci ANP se regăsește în inima profilului metalic.
- Pentru a determina poziția ANP, se pornește de la diagrama de eforturi plastice din figura de mai jos, în care eforturile de compresiune apar în dala din beton, talpa superioară a grinzii metalice, precum și pe o porțiune a inimii profilului metalic (distanța z).
- Ultima diagramă de eforturi este echivalentă cu cea reală, prin dublarea eforturilor de compresiune din partea comprimată a profilului și respectiv considerarea întregii secțiuni metalice întinse.

Obs: În cazul în care ANP se regăsește în talpa superioară a profilului se poate conduce un calcul asemănător.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL II: ANP se găsește în inima profilului metalic



○ Poziția axei neutre în profilul metalic.

○ Diagramele de eforturi plastice.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL II: ANP se găsește în inima profilului metalic

○ În acest caz, ecuația din care se determină poziția ANP este:

$$F_c = F_a \quad \text{în care:} \quad F_c = F_{cc} + F_{af}^c + F_{aw}^c$$

unde: F_c este rezultanta eforturilor de compresiune;

F_a este rezultanta eforturilor de întindere din întreg profilul metalic;

F_{cc} este rezultanta eforturilor de compresiune din întreaga dală de beton;

F_{af}^c este rezultanta eforturilor de compresiune din talpa superioară a profilului metalic;

F_{aw}^c este rezultanta eforturilor de compresiune din înălțimea z a inimii profilului metalic.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL II: ANP se găsește în inima profilului metalic

- Eforturile care intră în relația de mai sus sunt următoarele:

$$F_{cc} = 0.85b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

$$F_{aw}^c = z \cdot t_w \cdot 2f_y / \gamma_a$$

$$F_{af}^c = b_f^s \cdot t_f \cdot 2f_y / \gamma_a$$

$$F_a = A_a \cdot f_y / \gamma_a$$

- Înlocuind aceste relații în ecuația de egalitate a eforturilor plastice rezultă:

$$A_a \cdot f_y / \gamma_a = 0.85b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{ck} / \gamma_c + b_f^s \cdot t_f \cdot 2f_y / \gamma_a + z \cdot t_w \cdot 2f_y / \gamma_a$$

- De unde se obține distanța z de la fibra superioară a profilului metalic la ANP:

$$2z \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a = A_a \cdot f_y / \gamma_a - (0.85b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{ck} / \gamma_c + 2b_f^s \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a)$$

de unde
rezultă:

$$z = \frac{A_a - 2b_f^s \cdot t_f}{2t_w} - \frac{0.85b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{ck} / \gamma_c}{2t_w \cdot f_y / \gamma_a}$$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL II: ANP se găsește în inima profilului metalic

- Momentul plastic rezistent se determină pe baza diagramei reale de eforturi însă se calculează mai ușor pe baza eforturilor din diagrama completă, prin ecuația de momente față de centrul de greutate al dalei din beton:

$$M_{pl.Rd}^+ = F_a \cdot e_c - F_{aw}^c (e_c - e_w) - F_{af}^c (e_c - e_f)$$

- unde distanțele e_c , e_w și e_f sunt determinate cu relațiile de mai jos (considerând profilul metalic nesimetric):

$$e_c = h_s + t_f + \frac{h_c}{2} = \frac{1}{2}(2h_s + 2t_f + h_c) \quad e_f = h_s + \frac{t_f}{2} = \frac{1}{2}(2h_s + t_f)$$

$$e_w = h_s - \frac{z}{2} = \frac{1}{2}(2h_s - z)$$

- unde: h_s este înălțimea inimii profilului metalic deasupra centrului de greutate al acestuia.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

CAZUL II: ANP se găsește în inima profilului metalic
 z este distanța de la marginea superioară a inimii
 profilului metalic la ANP:

$$z = \frac{A_a - 2b_f^s \cdot t_f}{2t_w} - \frac{0.85b_{eff} \cdot h_c \cdot f_{ck} / \gamma_c}{2t_w \cdot f_y / \gamma_a}$$

○ Momentul plastic rezistent se rescrie ca:

$$M_{pl,Rd}^+ = A_a \cdot f_y / \gamma_a \cdot \frac{1}{2} (2h_s + 2t_f + h_c) - 2z \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a \left[\frac{1}{2} (2h_s + 2t_f + h_c) - \frac{1}{2} (2h_s - z) \right] \\ - 2b_f^s \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a \left[\frac{1}{2} (2h_s + 2t_f + h_c) - \frac{1}{2} (2h_s + t_f) \right]$$

sau:

$$M_{pl,Rd}^+ = \frac{1}{2} \frac{f_y}{\gamma_a} \left[A_a (2h_s + 2t_f + h_c) - 2z \cdot t_w (2t_f + h_c + z) - 2b_f^s \cdot t_f (t_f + h_c) \right]$$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT POZITIV

- În cazul calculului plastic la momente pozitive, **verificarea secțiunii** se face cu relația:

$$M_{Sd}^+ \leq M_{pl,Rd}^+$$

cu M_{Sd}^+ - momentul încovoietor pozitiv rezultat din calculul static.

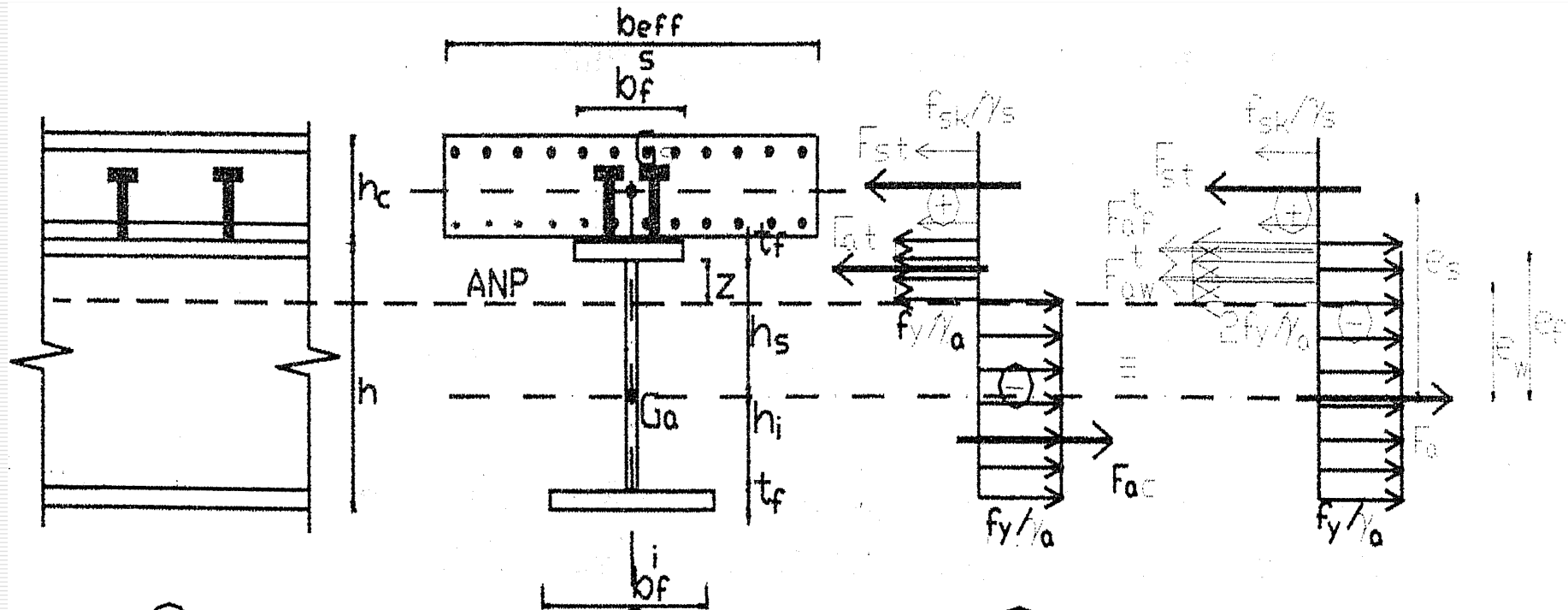
§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

- În cazul secțiunii supuse la momente încovoietoare negative, fibrele inferioare ale grinzii compuse sunt comprimate, cele superioare fiind întinse.
- Astfel, dala din beton armat (întinsă) se neglijează, în conformitate cu ipotezele făcute (betonul întins se neglijează).
- În consecință, în aproape toate cazurile, ANP se va regăsi în profilul metalic al grinzii compuse.
- Figura de mai jos prezintă secțiunea transversală a grinzii compuse (lățimea eficace b_{eff} și diagramele de eforturi plastice pe secțiunea transversală).

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV



Poziția axei neutre în profilul metalic (secțiune transversală).

Diagramele de eforturi plastice.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

- Pentru a determina poziția ANP se va porni de la diagrama de eforturi plastice, în care vor apărea eforturi de întindere în armăturile dalei din beton și în partea superioară a profilului metalic (talpă + inimă pe înălțimea z).
- Și în acest caz diagrama de eforturi este transpusă într-o diagramă echivalentă, astfel încât profilul metalic să poată fi considerat comprimat pe întreaga înălțime la efortul f_y/γ_a .
- Pentru a echilibra aceste eforturi, eforturile de întindere din partea superioară a profilului metalic sunt dublate la valoarea $2f_y/\gamma_a$.

- Ecuația care determină poziția ANP este dată de:

$$F_t = F_a$$

- În care: $F_t = F_{st} + F'_{af} + F'_{aw}$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

În expresiile de mai sus:

F_t este rezultanta eforturilor de întindere;

F_a este rezultanta eforturilor de compresiune din întreg profilul metalic;

F_{st} este rezultanta eforturilor de întindere din armăturile flexibile situate în dala din beton;

F_{af}^t este rezultanta eforturilor de întindere din talpa superioară a profilului metalic;

F_{aw}^t este rezultanta eforturilor de întindere pe înălțimea z a inimii profilului metalic.

○ Eforturile care intră în relațiile de mai sus se determină prin:

$$F_a = A_a \cdot f_y / \gamma_a$$

$$F_{af}^t = b_f^s \cdot t_f \cdot 2f_y / \gamma_a$$

$$F_{st} = A_s \cdot f_{sk} / \gamma_s$$

$$F_{aw}^t = z \cdot t_w \cdot 2f_y / \gamma_a$$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

○ Înlocuind aceste relații în ecuația de echilibru rezultă:

$$F_t = A_s \cdot f_{sk} / \gamma_s + b_f^s \cdot t_f \cdot 2f_y / \gamma_a + z \cdot t_w \cdot 2f_y / \gamma_a$$

Sau,

înlocuind F_t :

$$A_a \cdot f_y / \gamma_a = A_s \cdot f_{sk} / \gamma_s + b_f^s \cdot t_f \cdot 2f_y / \gamma_a + z \cdot t_w \cdot 2f_y / \gamma_a$$

De unde rezultă
valoarea z :

$$z = \frac{A_a - 2b_f^s \cdot t_f}{2t_w} - \frac{A_s \cdot f_{sk} / \gamma_s}{2t_w \cdot f_y / \gamma_a}$$

unde:

t_w este grosimea inimii profilului metalic;

b_f^s și t_f sunt lățimea și grosimea tălpii superioare a profilului metalic;

b_{eff} și h_c sunt lățimea eficace și grosimea dalei din beton;

f_{ck} și f_y sunt rezistențele caracteristice ale betonului la compresiune respectiv oțelului la întindere.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

- Momentul plastic rezistent negativ se determină pe baza diagramei reale de eforturi, însă se poate calcula mai ușor pe baza eforturilor din diagrama echivalentă, scriind ecuația de momente față de centrul de greutate al armăturilor (poate sau nu să coincidă cu centrul de greutate al dalei din beton):

$$M_{pl.Rd}^{-} = F_a \cdot e_s - F'_{aw} (e_s - e_w) - F_{af}^s (e_s - e_f)$$

- unde distanțele e_s , e_w și e_f sunt determinate cu relațiile de mai jos (considerând profilul metalic nesimetric):

$$e_c = h_s + t_f + \frac{h_c}{2} = \frac{1}{2}(2h_s + 2t_f + h_c)$$

$$e_f = h_s + \frac{t_f}{2} = \frac{1}{2}(2h_s + t_f)$$

$$e_w = h_s - \frac{z}{2} = \frac{1}{2}(2h_s - z)$$

- unde: h_s este înălțimea inimii profilului metalic deasupra centrului de greutate al acestuia.

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

z este distanța de la marginea superioară a inimii profilului metalic la ANP:

$$z = \frac{A_a - 2b_f^s \cdot t_f}{2t_w} - \frac{A_s \cdot f_{sk} / \gamma_s}{2t_w \cdot f_y / \gamma_a}$$

○ Momentul plastic rezistent se rescrie ca:

$$M_{pl,Rd}^- = A_a \cdot f_y / \gamma_a \cdot \frac{1}{2} (2h_s + 2t_f + h_c) - 2z \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_a \left[\frac{1}{2} (2h_s + 2t_f + h_c) - \frac{1}{2} (2h_s - z) \right] \\ - 2b_f^s \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a \left[\frac{1}{2} (2h_s + 2t_f + h_c) - \frac{1}{2} (2h_s + t_f) \right]$$

sau:
$$M_{pl,Rd}^- = \frac{1}{2} \frac{f_y}{\gamma_a} \left[A_a (2h_s + 2t_f + h_c) - 2z \cdot t_w (2t_f + h_c + z) - 2b_f^s \cdot t_f (t_f + h_c) \right]$$

§ 2.9 Momentul rezistent plastic

SECȚIUNEA SUPUSĂ LA MOMENT NEGATIV

- În cazul calculului plastic la momente negative, **verificarea secțiunii** se face cu relația:

$$M_{Sd}^{-} \leq M_{pl.Rd}^{-}$$

cu M_{Sd}^{-} - momentul încovoietor negativ rezultat din calculul static.

§ 2.10 Verificarea la acțiunea forței tăietoare

- În cazul grinzilor compuse oțel-beton, calculul la forță tăietoare verticală se face conform prevederilor Eurocode 3, considerând faptul că întreaga forță tăietoare acționează asupra profilului metalic, neglijând aportul plăcii din beton.
- Condiția de verificare la acțiunea forței tăietoare este:

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd}$$

unde: V_{Sd} reprezintă forța tăietoare de calcul determinată din calculul static, din încărcările de calcul;

$V_{pl,Rd}$ reprezintă rezistența admisă la forfecare (forța tăietoare capabilă), rezultată din relația:

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\gamma_a}$$

§ 2.10 Verificarea la acțiunea forței tăietoare

○ În formula de mai sus:

- n $f_y/\sqrt{3}$ este rezistența de calcul la forfecare a oțelului;
- n A_v este secțiunea de forfecare a profilului metalic care se ia:
 - Pentru profile I sau H reconstituite din table sudate:

$$A_v = \sum dt_w$$

- Pentru profile I sau H laminate: $A_v = A - 2b_f t_f + (t_w + 2r)t_f$

unde:

- n d și t_w sunt distanța liberă între suduri, respectiv grosimea inimii profilului reconstituit;
- n A aria profilului laminat;
- n b_f și t_f sunt lățimea, respectiv grosimea tălpilor profilului laminat;
- n r este raza racordului dintre talpa și inima profilului laminat.

§ 2.10 Verificarea la acțiunea forței tăietoare

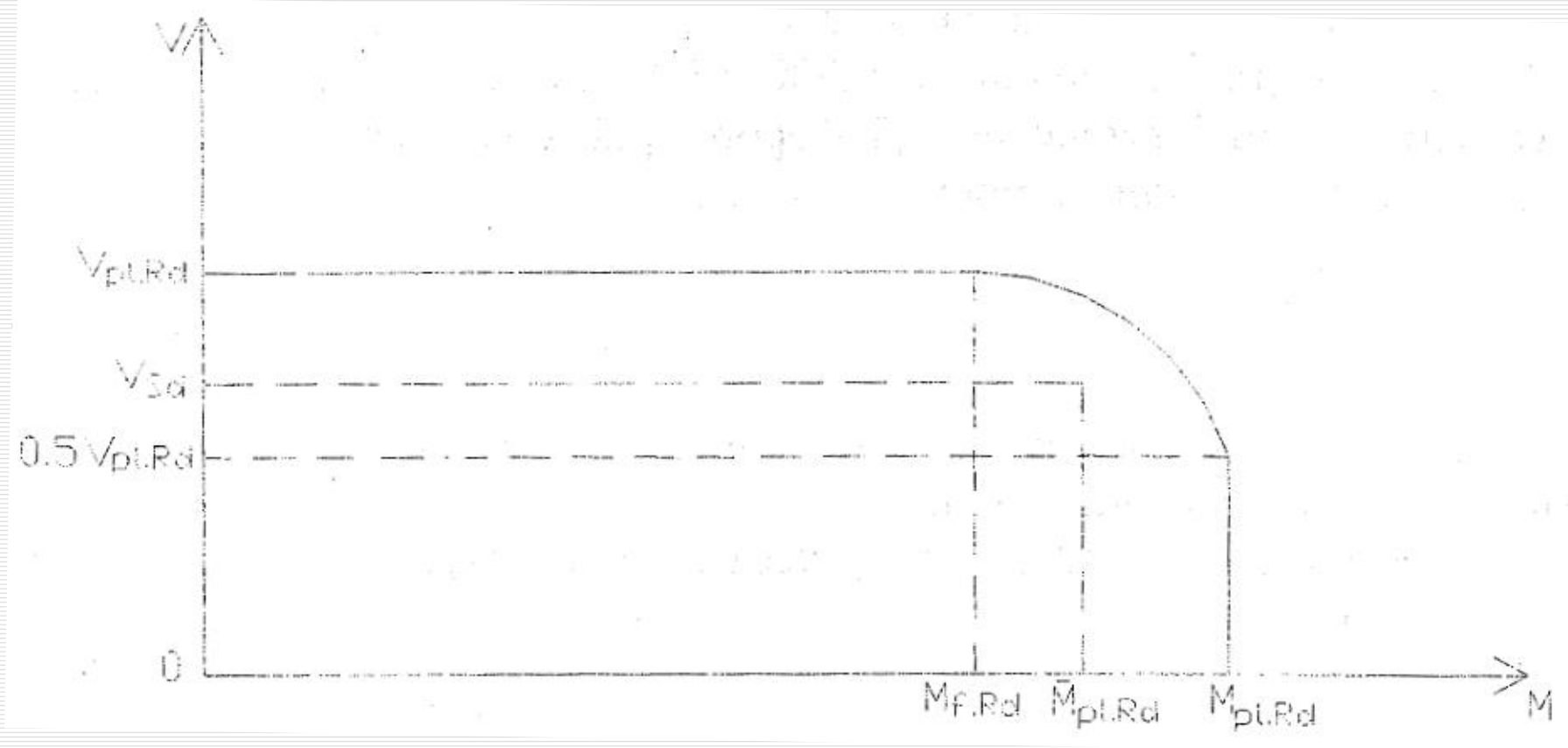
- În practică, inegalitatea de verificare a forței tăietoare ia următoarea formă:

$$V_{Sd} \leq 0.5V_{pl,Rd}$$

- Această formulă se folosește pentru a putea neglija influența forței tăietoare asupra momentului plastic rezistent $M_{pl,Rd}$.
- Dacă inegalitatea de mai sus nu este respectată, trebuie să se țină cont de interacțiunea moment încovoietor – forță tăietoare, în evaluarea momentului plastic rezistent.
- Curba de interacțiune moment încovoietor – forță tăietoare este dată în figura de mai jos:
- În noile condiții, verificarea la moment încovoietor se face cu relația:

$$M_{Sd} \leq M_{pl,Rd(reduc)}$$

§ 2.10 Verificarea la acțiunea forței tăietoare



Curba de interacțiune moment – forță tăietoare

§ 2.10 Verificarea la acțiunea forței tăietoare

În formula de mai sus:

- M_{sd} este momentul încovoietor de calcul, rezultat din calculul static;
- $M_{pl,Rd(red)}$ este momentul plastic rezistent redus de influența forței tăietoare, determinat prin interpolare, între $M_{pl,Rd}$ și $M_{f,Rd}$ prin relația:

unde:

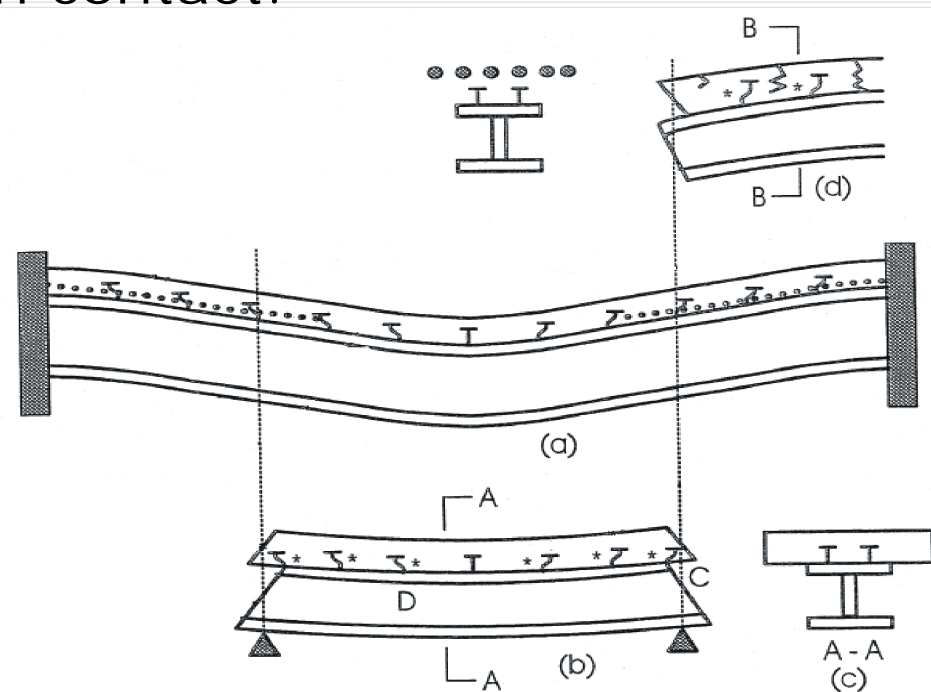
$$M_{pl,Rd(redus)} = M_{f,Rd} + (M_{pl,Rd} - M_{f,Rd}) \left[1 - \left(\frac{2V_{sd}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \right]$$

- V_{sd} este forța tăietoare de calcul, determinată din calculul static;
- $V_{pl,Rd}$ este rezistența admisă la forfecare (forța tăietoare rezistentă);
- $M_{f,Rd}$ este momentul plastic rezistent al grinzii compuse, în care profilul metalic este format doar din tălpi, neglijându-se aportul inimii grinzii metalice (lățimea eficace este identică cu cea folosită la calculul momentului rezistent plastic $M_{pl,Rd}$).

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

- În cazul grinzilor compuse oțel-beton, conectorii și armăturile transversale din placa de beton trebuie prevăzuți pe toată lungimea grinzii, pentru a transmite efortul longitudinal de forfecare dintre dala din beton și elementul metalic, neglijând efectul aderenței (prin efecte fizico-chimice) dintre cele două materiale aflate în contact.

Modul de deformare
al unei grinzi
compuse
(încastate).



§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

- Numărul conectorilor rezultă din raportul dintre efortul longitudinal de calcul și rezistența de calcul a unui conector P_{Rd} .
- În același timp, conectorii trebuie să fie capabili să prezinte o rezistență suficientă la ridicarea (desprinderea) dalei de beton de pe grinda metalică. În acest sens, conectorii trebuie concepuți și calculați la un efort de tracțiune nominal, perpendicular pe talpa profilului din oțel de cel puțin 10% din rezistența de calcul la forfecare a conectorilor.

Obs: Conectorii obișnuiți de tip gujon cu cap asigură o rezistență suficientă la ridicarea dalei.

- Numărul elementelor de conectare care sunt dispuse pe elementul metalic poate sau nu să asigure o conexiune completă între cele două materiale.
- Calculul efectuat în continuare este făcut în ipoteza asigurării conexiunii totale între dala din beton și elementul metalic.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

EFORTUL LONGITUDINAL DE FORFECARE

- Calculul este prezentat în ipoteza unei conexiuni complete.
- O travee a unei grinzi compuse prezintă o **conexiune completă** (totală) atunci când creșterea numărului de conectori dispuși pe traveea respectivă nu mai conduce la creșterea rezistenței la încovoiere a secțiunii respective.
- În caz contrar, conexiunea se numește parțială.
- Pentru o conexiune completă, efortul longitudinal de forfecare V_l la care trebuie să reziste conectorii, între punctul de moment încovoietor maxim și un reazem simplu de capăt (sau un punct de inflexiune) se calculează cu relația:

$$V_l = F_{cf} = \min(F_{cf1}, F_{cf2})$$

unde:

n $F_{cf,1}$ este efortul capabil al profilului metalic

$$F_{cf1} = A_a \frac{f_y}{\gamma_a}$$

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

EFORTUL LONGITUDINAL DE FORFECARE

n $F_{cf,2}$ este efortul capabil al dalei din beton:
$$F_{cf2} = A_c \frac{0.85 f_{ck}}{\gamma_c}$$

o În formulele de mai sus:

n A_a este aria profilului metalic;

n A_c este aria secțiunii eficace a dalei din beton pe lățimea b_{eff} ;

o În cazul în care grinda este continuă, efortul longitudinal de forfecare de calcul V_l , între un punct de moment maxim pozitiv și un reazem intermediar sau un reazem încastrat se calculează cu relația:

$$V_l = F_{cf} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s} + A_{ap} \frac{f_{yp}}{\gamma_{ap}}$$

unde:

n F_{cf} este efortul capabil definit cu relațiile de mai sus (se ia egal cu zero în cazul consolelor);

n A_s este aria armăturii longitudinale din dala de beton, pe lățimea eficace negativă a acesteia;

n A_{ap} este aria tablei profilate, pe lățimea eficace negativă.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

REZISTENȚA DE CALCUL A CONECTORILOR

○ Rezistența de calcul, inclusiv capacitatea portantă a conectorilor depinde de forma geometrică a acestora.

Capacitatea portantă a gujoanelor în dalele pline

○ Rezistența de calcul la forfecare a unui conector de tip gujon cu cap, sudat printr-o sudură de tip arc electric direct se determină ca minimum dintre valorile P_{rd1} și P_{rd2} calculate ca mai jos:

$$P_{Rd1} = 0.8 f_u \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v}$$

$$P_{Rd2} = 0.29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} \frac{1}{\gamma_v}$$

În formulele de mai sus:

- n d este diametrul tijei gujonului;
- n f_u este rezistența ultimă la tracțiune ($< 500 \text{ N/mm}^2$);
- n f_{ck} este rezistența caracteristică a betonului la compresiune;
- n E_{cm} este valoarea modulului secant de elasticitate a betonului;
- n h este înălțimea totală a gujonului, inclusiv capul acestuia;

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

REZISTENȚA DE CALCUL A CONECTORILOR

Capacitatea portantă a gujoanelor în dalele pline
În formulele de mai sus:

n γ_v – coeficientul parțial de siguranță pentru conectori = 1,25;

n α – coeficient care ia valorile:

$\alpha = 0.2 \left[\left(\frac{h}{d} \right) + 1 \right]$	pentru $3 \leq h/d \leq 4$	pentru	$\alpha = 0.2 \left[\left(\frac{h}{d} \right) + 1 \right]$	pentru $3 \leq h/d \leq 4$
$\alpha = 1.0$	pentru $h/d > 4$	pentru	$\alpha = 1.0$	pentru $h/d > 4$

○ Formulele de mai sus se pot utiliza doar în cazul gujoanelor care au diametrul $d < 22mm$.

○ În plus, trebuie respectate următoarele cerințe :

n Sudura inelară trebuie să aibă o formă regulată și o depunere fără defecte a sudurii;

n Diametrul inelului de sudură nu trebuie să fie mai mic de 1,25d;

n Înălțimea medie a sudurii nu trebuie să fie mai mică de 0,2d, iar înălțimea minimă de 0,15d.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

REZISTENȚA DE CALCUL A CONECTORILOR

Capacitatea portantă a gujoanelor în dalele compuse

- Pentru dalele nervurate, rezistența de calcul la forfecare este identică cu cea pentru dalele pline, dar afectată de un coeficient k , calculat în funcție de dispoziția tablei profilate pe profilul metalic.
- În cazul în care nervurile tablei cutate sunt paralele cu inima profilului metalic, coeficientul de reducere k_l este dat de relația:

$$k_l = 0.6 \frac{b_0}{h_p} \left[\frac{h}{h_p} - 1 \right] \leq 1.0$$

- Dacă nervurile tablei profilate sunt perpendiculare pe grinzile portante din oțel, iar diametrul gujoanelor nu depășește 20mm, atunci rezistența de calcul la forfecare este afectată de coeficientul de reducere k_t , dat de relația:

$$k_t = \frac{0.7}{\sqrt{N_r}} \cdot \frac{b_0}{h_p} \left[\frac{h}{h_p} - 1 \right]$$

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

REZISTENȚA DE CALCUL A CONECTORILOR

Capacitatea portantă a gujoanelor în dalele compuse

În formulele de mai sus:

- h este înălțimea totală a gujonului, inclusiv capul acestuia ($h \leq h_p + 75 \text{ mm}$)
- N_r este numărul de gujoane pe o nervură, la intersecția acesteia cu grinda metalică ($N_r \leq 2$).

Obs: 1. Capacitatea portantă a conectorilor depinde de geometria lor. În literatura de specialitate există numeroase formule prin care se poate calcula capacitatea portantă a conectorilor.

2. Pentru conectori nestandardizați, capacitatea portantă a conectorilor se determină pe baza testelor standardizate de tip push-out (conform anexei B a Eurocode 4).

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

DETERMINAREA NUMĂRULUI DE CONECTORI

- Numărul conectorilor necesari pentru realizarea conexiunii complete este calculat pe baza efortului de forfecare longitudinal V_l și a rezistenței de calcul a conectorilor P_{Rd} :

$$V_l = \min(F_{cf1}; F_{cf2}) \quad \text{respectiv} \quad P_{Rd} = \min\{P_{Rd1}; P_{Rd2}\}$$

(valori determinate conform formulelor anterioare)

- Numărul necesar de conectori N , pe o travee de forfecare se determină prin relația:

$$N = \frac{V_l}{P_{Rd}}$$

Obs: Termenul de “travee de forfecare” este folosit pentru o deschidere între punctele de moment maxim și cele de moment minim sau zero.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

DETERMINAREA NUMĂRULUI DE CONECTORI

- Conectorii se sudează pe talpa superioară a profilului metalic, pe unul sau două rânduri.
- În cazul în care sunt dispuși pe ambele rânduri, conectorii pot fi decalați pe rând la jumătate de pas.
- Numărul de conectori N se repartizează în mod uniform pe lungimea traveii de forfecare.

STABILIREA DISTANȚEI DINTRE CONECTORI

- În cazul în care conectorii sunt dispuși la distanțe egale (modul uzual de dispunere), distanța dintre conectori rezultă simplu, împărțind lungimea traveii de forfecare la
 - n numărul total de conectori N , în cazul în care aceștia sunt dispuși pe un singur rând;
 - n la $N/2$, în cazul în care ei sunt dispuși pe două rânduri.

Obs: trebuie asigurat un spațiu adecvat de la capătul elementului metalic la primul conector.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

STABILIREA DISTANȚEI DINTRE CONECTORI

- Distanța dintre conectori trebuie să îndeplinească și alte cerințe specifice (secțiunea 6.4.1 din Eurocode 4):
 - n Dacă stabilitatea elementului metalic este asigurată prin intermediul conexiunii dintre cele două elemente, distanța dintre conectori trebuie să fie suficient de redusă pentru a satisface această ipoteză;
 - n Dacă se admite că talpa comprimată a grinzii din oțel este de clasă 1 sau 2, considerând creșterea rigidității acesteia produsă de conectori, distanța dintre conectori nu trebuie să depășească următoarele valori:
 - în cazul în care dala din beton este în contact continuu cu grinda metalică:
$$s \leq 22t \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$
 - în cazul în care dala din beton nu este în contact continuu cu grinda metalică:
$$s \leq 15t \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$
 - în sens transversal profilului metalic, distanța netă dintre marginea tălpii comprimate și rândul de conectori cel mai apropiat:
$$s_1 \leq 9t \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

STABILIREA DISTANȚEI DINTRE CONECTORI

În formulele de mai sus t este grosimea tălpii profilului metalic;

- Distanța maximă interax între conectori, măsurată în sens
- longitudinal nu trebuie să depășească:

$$s \leq 6h_c \quad \text{și} \quad s \leq 800mm$$

h_c este grosimea dalei din beton.

ALTE RECOMANDĂRI PENTRU CONECTORI

- Următoarele recomandări sunt valabile pentru conectorii de tip gujon cu cap în grinzile compuse:
 - n Înălțimea totală a gujoanelor să fie de cel puțin $3d$ (d este diametrul gujoanelor).
 - n Distanța dintre gujoane, pe direcția efortului longitudinal de forfecare este recomandabil să fie mai mare sau cel puțin egală cu $5d$. Distanța dintre rândurile de gujoane, pe direcție transversală efortului de forfecare trebuie să fie mai mare de $2,5d$.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

ALTE RECOMNADĂRI PENTRU CONECTORI

- n Cu excepția cazului în care gujoanele sunt sudate direct deasupra inimii profilului, este recomandabil ca diametrul gujoanelor să fie mai mic decât $2,5t$ (cu t – grosimea tălpii profilului).
- n În cazul dalelor din beton turnate pe table profilate, conectorii se pot suda de talpa profilului metalic trecând prin tabla profilată. În acest caz este necesar să existe un contact riguros între talpa profilului și tabla profilată. Este recomandabil ca sudarea unui gujon să nu străbată două table profilate. Grosimea tablei nu trebuie să aibă mai mult de $1,25mm$ în cazul tablei galvanizate și $1,5mm$ pentru tablele negalvanizate. Grosimea stratului de galvanizare nu trebuie să fie mai mare de $30\mu m$ pe fiecare față a tablelor.
- n În cazul în care gujoanele sunt sudate prin tablele profilate, este recomandabil ca înălțimea totală a conectorilor să depășească cu cel puțin $2d$ fața superioară a tablelor profilate.

§ 2.11 Calculul conexiunii grinzilor compuse

ALTE RECOMANDĂRI PENTRU CONECTORI

- n Este recomandabil ca lățimea minimă a nervurilor umplute cu beton să fie de cel puțin *50mm*.
- n Se recomandă ca tablele profilate să fie fixate în fiecare nervură, pentru a avea comportamentul unei grinzi compuse. Fixarea poate fi prin gujoane, sau gujoane + sudură în puncte.

Obs: Recomandări suplimentare există și pentru alte tipuri de conectori (relativ) standardizați:

- conectori de tip bloc sau bară;
- conectori cu cârlige sau arce;
- conectori din profile U etc.