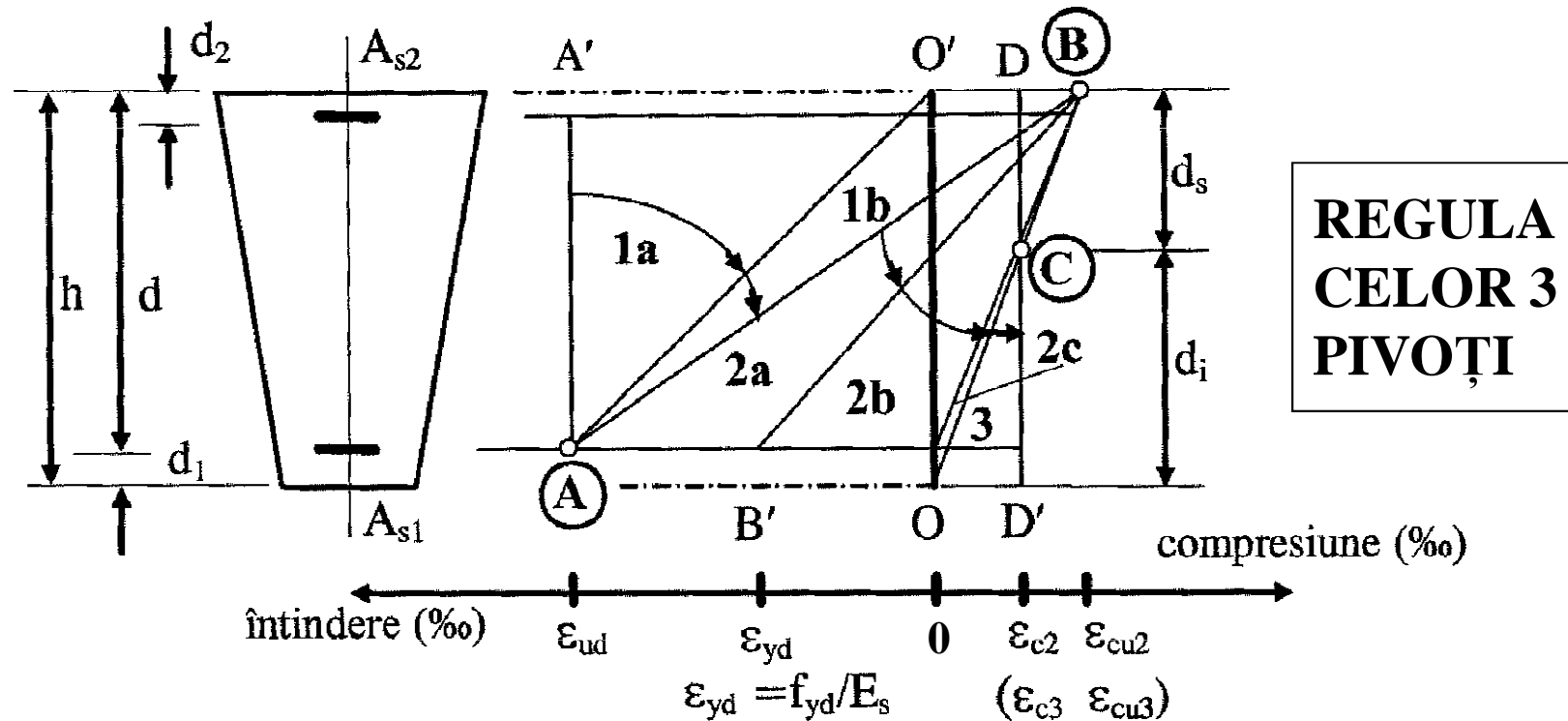


Calculul la starea limită ultimă la încovoiere cu/fără forță axială se face pe baza ipotezelor simplificatoare:

- secțiunile plane rămân plane și după deformare
- armătura și betonul înconjurător au aceeași deformație specifică
- contribuția betonului întins dintre fisuri se neglijează
- distribuția eforturilor specifice de compresiune din beton rezultă din diagramele caracteristice $\sigma_c - \varepsilon_c$ de proiectare
- deformația specifică a betonului la compresiune se limitează la ε_{c2} sau ε_{c3}
- eforturile specifice în armături rezultă din diagrama caracteristică $\sigma_s - \varepsilon_s$ de proiectare
- deformațiile specifice din armături se limitează la ε_{ud}

STAREA DE DEFORMAȚII LA STAREA LIMITĂ ULTIMĂ

Diagrame de deformațiilor specifice posibile:



Pivot A – limita deformațiilor specifice de întindere din oțel

Pivot B – limita deformațiilor specifice de compresiune din beton

Pivot C – limita deformațiilor specifice de compresiune pură din beton

STAREA DE DEFORMAȚII LA STAREA LIMITĂ ULTIMĂ

- La proiectarea S.T. solicitată la compresiune axială deformația specifică de compresiune din beton se limitează la: $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$ sau $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3}$.
Funcție de diagrama de proiectare luată în considerare pentru beton (diagrama parabolă-dreptunghi sau diagrama biliniară).
- La proiectarea S.T. care prezintă și zonă întinsă deformația specifică de compresiune din beton se limitează la: $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$ sau $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu3}$.
Funcție de diagrama de proiectare luată în considerare pentru beton (diagrama parabolă-dreptunghi sau diagrama biliniară).
- În situații de proiectare intermediare ale S.T. deformația specifică de compresiune din beton este calculată din rotirea S.T. în jurul PIVOT C.
- În cazul utilizării diagramei pentru oțel $\sigma_s - \varepsilon_s$ cu ramura superioară înclinată (ecruisare) \Rightarrow deformația specifică a oțelului $\varepsilon_s \leq \varepsilon_{ud} = 0.9 \varepsilon_{uk}$ (recomandat).
- În cazul utilizării diagramei pentru oțel $\sigma_s - \varepsilon_s$ cu ramura superioară orizontală \Rightarrow nu este necesară verificarea deformației specifice limită.

STAREA DE DEFORMAȚII LA STAREA LIMITĂ ULTIMĂ

PIVOT A (zona 1) = deformație specifică excesivă a armăturii A_{s1} .

- **Zona 1a:**
 - reprezintă întinderea centrică sau întinderea excentrică cu mică excentricitate
 - S.T. este sollicitată în întregime la întindere și fisurată
 - dreapta A-A' = întindere centrică
 - A.N. este poziționată în afara S.T.
 - capacitatea portantă este dată de curgerea armăturii cea mai întinsă A_{s1}
- **Zona 1b:**
 - reprezintă întinderea excentrică cu mare excentricitate sau încovoierea elementelor cu arii de armătură mici
 - A.N. este poziționată în interiorul S.T.
 - deformația max. de compresiune din beton < limita def.
 - capacitatea portantă este dată de curgerea armăturii cea mai întinsă A_{s1}
- **Limita dintre zonele 1-2 (dreapta A-B)** este dată de deformațiile ultime ale ambelor materiale, beton și oțel.

STAREA DE DEFORMAȚII LA STAREA LIMITĂ ULTIMĂ

PIVOT B (zona 2) = zdrobirea betonului comprimat la încovoiere preponderentă

- principalele caracteristici: A.N. este în interiorul S.T.

- **Zona 2a:**
 - reprezintă încovoierea și întinderea sau compresiunea excentrică cu mare excentricitate
 - capacitatea portantă este dată de curgerea armăturii întinse A_{s1} ($\epsilon_{ud} > \epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$) și zdrobirea betonului comprimat ($\epsilon_c = \epsilon_{cu2}$ or ϵ_{cu3})
- **Zona 2b:**
 - nu se mai produce curgerea armăturii întinse A_{s1}
 - capacitatea portantă este dată zdrobirea betonului comprimat și curgerea armăturii comprimate A_{s2} fără curgerea armăturii întinse A_{s1}
- **Zona 2c:**
 - toate armăturile sunt comprimate
- **Limita dintre zonele 2a-2b (dreapta B-B') = starea de balans :** inițierea curgerii armăturii întinse A_{s1} simultan cu zdrobirea betonului comprimat și curgerea armăturii comprimate.

STAREA DE DEFORMAȚII LA STAREA LIMITĂ ULTIMĂ

PIVOT C (zona 3) = zdrobirea betonului comprimat la compresiune preponderentă

- **Zona 3:**
 - S.T. este solicitată în întregime la compresiune
 - linia D-D' = compresiune centrică
 - A.N. este poziționată în afara S.T.

- Poziția PIVOT C se obține prin proporționalitatea triunghiurilor:

$$\frac{\varepsilon_{cu2}}{h} = \frac{\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2}}{d_s} \Rightarrow d_s = \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}\right)h \quad \text{și} \quad d_i = \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{cu2}}h$$

$$\frac{\varepsilon_{cu3}}{h} = \frac{\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{c3}}{d_s} \Rightarrow d_s = \left(1 - \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}}\right)h \quad \text{și} \quad d_i = \frac{\varepsilon_{c3}}{\varepsilon_{cu3}}h$$

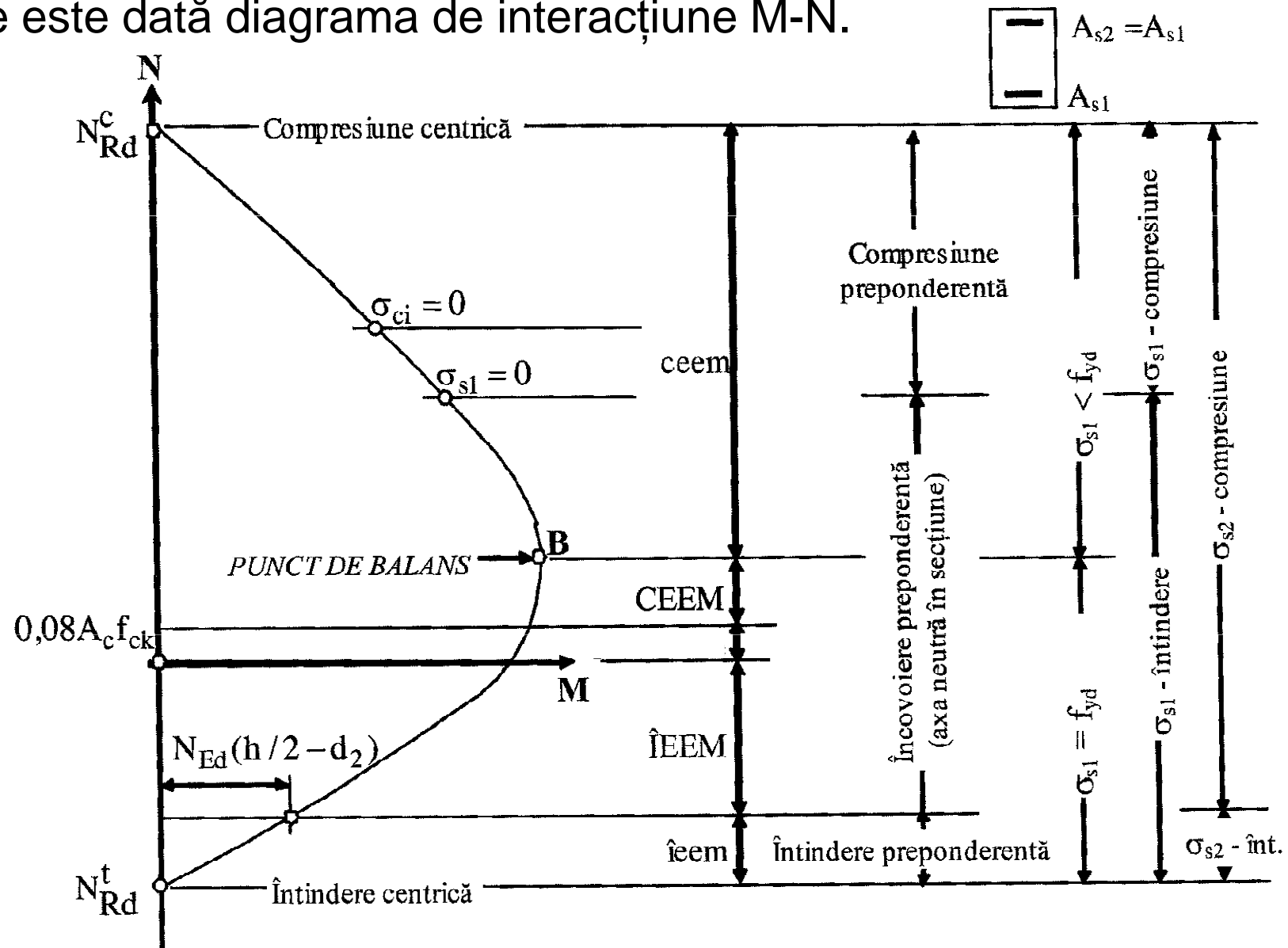
STAREA DE DEFORMAȚII LA STAREA LIMITĂ ULTIMĂ

POSSIBILITĂȚI DE CEDARE ALE S.T. DIN BETON ARMAT

Analizând diagramele posibile de deformații în corelație cu poziția axei neutre, modalitățile de cedare posibile sunt:

- **întindere preponderentă (zona 1a):**
întindere centrică sau excentrică cu mică excentricitate
- **încovoiere preponderentă (zonele 1b, 2a, 2b, 2c):**
întindere excentrică cu mare excentricitate; încovoiere;
compresiune excentrică cu mare excentricitate
- **compresiune preponderentă (zona 3):**
compresiune excentrică cu mică excentricitate

- Ruperea depinde de relația dintre perechea de eforturi (M ; N). Această relație este dată diagrama de interacțiune M-N.



- Diagrama de interacțiune M-N rezultă prin reducerea lui “x” (poziția A.N.) din sistemul de ecuații de echilibru ($\Sigma N = 0$; $\Sigma M = 0$).
- Orice punct definit de eforturile exterioare (M_{Ed} ; N_{Ed}) amplasat la interior sau pe diagramă \Rightarrow secțiunea din beton armat este verificată.
- Analiza diagramei M-N :
 - relativ la încovoiere, forțele de întindere axială reduc M_{Rd}
 - relativ la încovoiere, forțele de compresiune axială măresc M_{Rd} până la punctul B apoi reduc M_{Rd}
 - punctul B – punctul de balans = inițierea curgerii armăturii întinse A_{s1} simultan cu zdrobirea betonului comprimat
 - 3 principale tipuri de comportare:
 - pivot A (întindere preponderentă)
 - pivot B (încovoiere preponderentă)
 - pivot C (compresiune preponderentă)
 - 5 tipuri de cedare: întindere excentrică cu mica (îeem) și mare excentricitate (ÎEEM); ÎNCOVOIERE; compresiune excentrică cu mică (ceem) și mare excentricitate (CEEM)

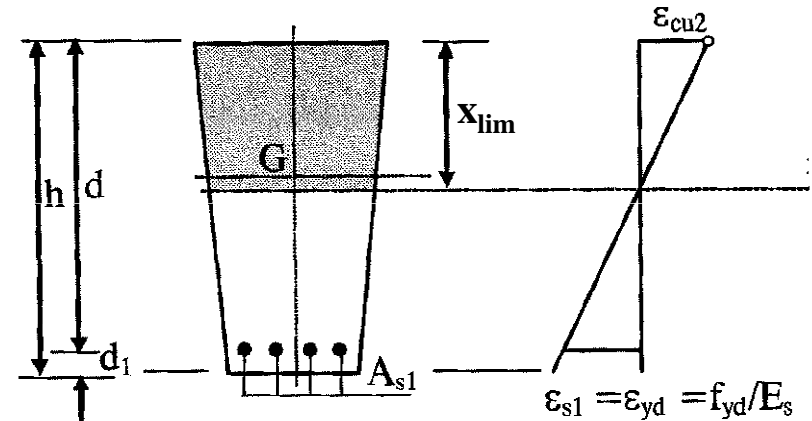
- Analiza diagramei M-N :
 - armătura A_{s1} este în principal întinsă; funcție de forța axială (magnitudine; întindere sau compresiune) A_{s1} poate atinge limita de curge sau nu; uneori A_{s1} poate fi comprimată
 - armătura A_{s2} este în principal comprimată; funcție de forța axială (magnitudine; întindere sau compresiune) A_{s2} poate atinge limita de curge sau nu; uneori A_{s2} poate fi întinsă
- Din diagrama M-N se poate observa:
 - la întindere dacă $M = 0 \Rightarrow$ capacitatea portantă la întindere centrică

$$N_{Rd}^t = (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yd}$$
 - la compresiune dacă $M = 0 \Rightarrow$ capacitatea portantă la compresiune centrică

$$N_{Rd}^c = A_c \cdot f_{cd} + (A_{s1} + A_{s2}) \cdot f_{yd}$$
 - punctul B – punctul de balans = inițierea curgerii armăturii întinse A_{s1} simultan cu zdrobirea betonului comprimat \Rightarrow capacitatea portantă maximă la încovoiere $M_{Rd \text{ lim}}$

- PUNCTUL DE BALANS este caracterizat de o anumită valoare a înălțimii zonei comprimate “ x_{lim} ” sau a înălțimii relative “ ξ_{lim} ” unde $\xi_{lim} = x_{lim} / d$

- “ ξ_{lim} ” se obține prin proporționalitatea triunghiurilor:



$$\frac{\varepsilon_{cu2}}{x_{lim}} = \frac{\varepsilon_{yd}}{d - x_{lim}} \rightarrow \xi_{lim} = \frac{x_{lim}}{d} = \frac{\varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{yd}}$$

- Pentru clase de beton $\leq C50/60 \Rightarrow \xi_{lim} = \frac{3.5}{3.5 + 1000 f_{yd} / E_s}$

Oțel	f_{yd} [MPa]	E_s [MPa]	ε_{yd} [‰]	ξ_{lim}	μ_{lim}
S400	400 / 1,15 = 348	200000	1,74	0,668	0,391
S500	500 / 1,15 = 435		2,17	0,617	0,371
PC52	345 / 1,15 = 300	210000	1,43	0,710	0,407
PC60	405 / 1,15 = 352		1,68	0,676	0,395

- Procedura de proiectare prezentată este utilizată în practică prin intermediul programelor de computer, tabele sau diagrame de calcul.
- O metodă simplificată de proiectare care se bazează de distribuția dreptunghiulară a eforturilor de compresiune din beton (BLOC DE COMPRESIUNI) va fi utilizată în continuare.
- Procedura de proiectare care se bazează pe “blocul de compresiuni” ia în considerare:
 - clasa betonului \leq C50/60
 - utilizarea unui oțel fără limită ultimă de deformație specifică