



Education and Culture DG

Lifelong Learning Programme

LEONARDO DA VINCI – FRACOF+
INNOVATION TRANSFER ON FIRE RESISTANCE ASSESSMENT OF
PARTIALLY PROTECTED COMPOSITE FLOOR

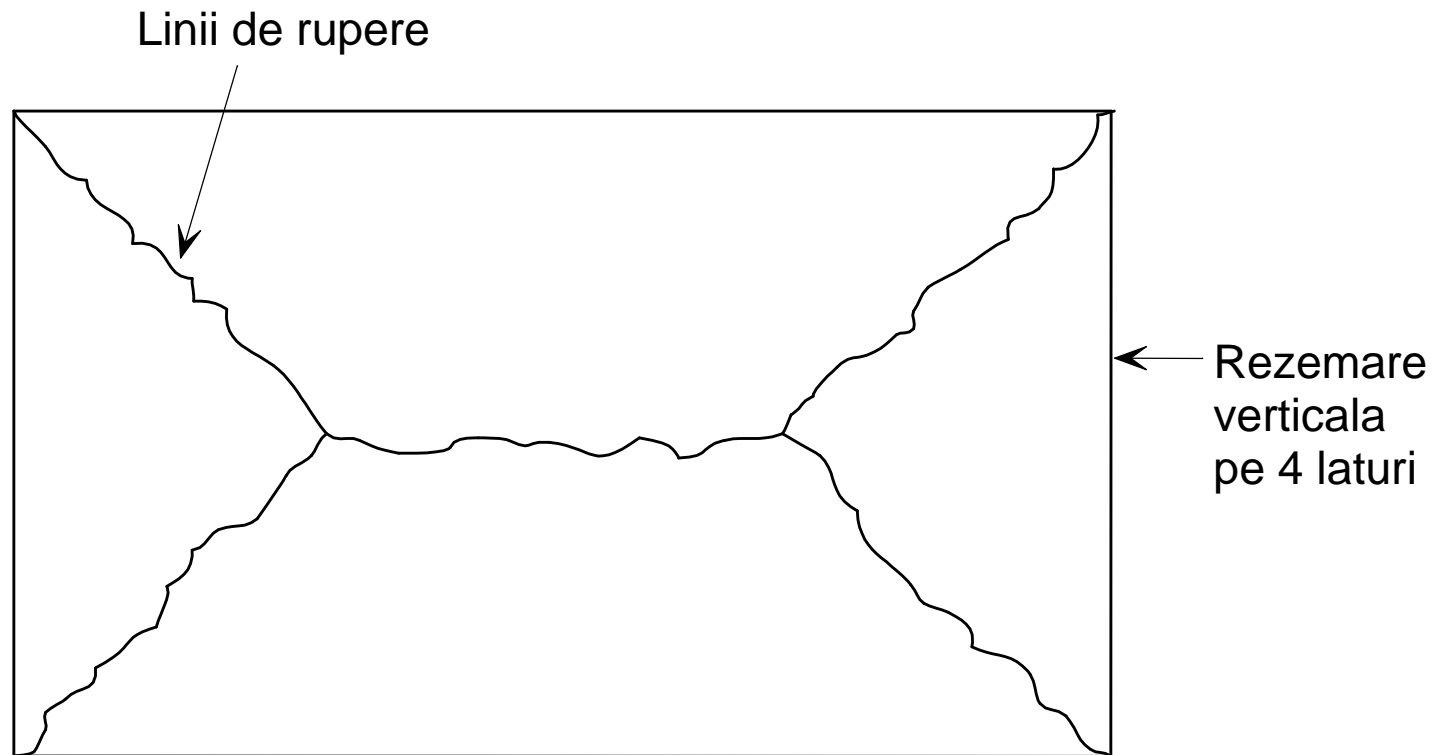
Metoda de proiectare la foc a planseelor compuse

Teorie si aplicații



Metoda de proiectare

Introducere în teoria liniilor de rupere și a efectului de membrană

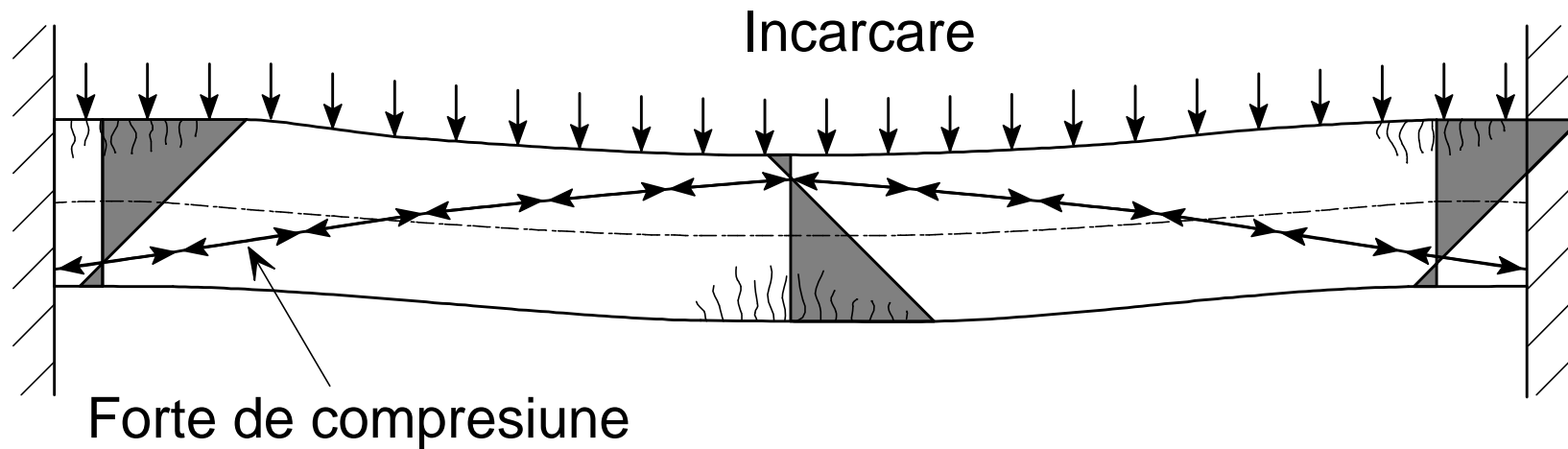


*Modelul clasic al liniilor de rupere pentru o placă dreptunghiulară
simplu rezemată pe patru laturi*

Metoda de proiectare

Introducere în teoria liniilor de rupere și a efectului de membrană

Planșeu cu marginile încastrate

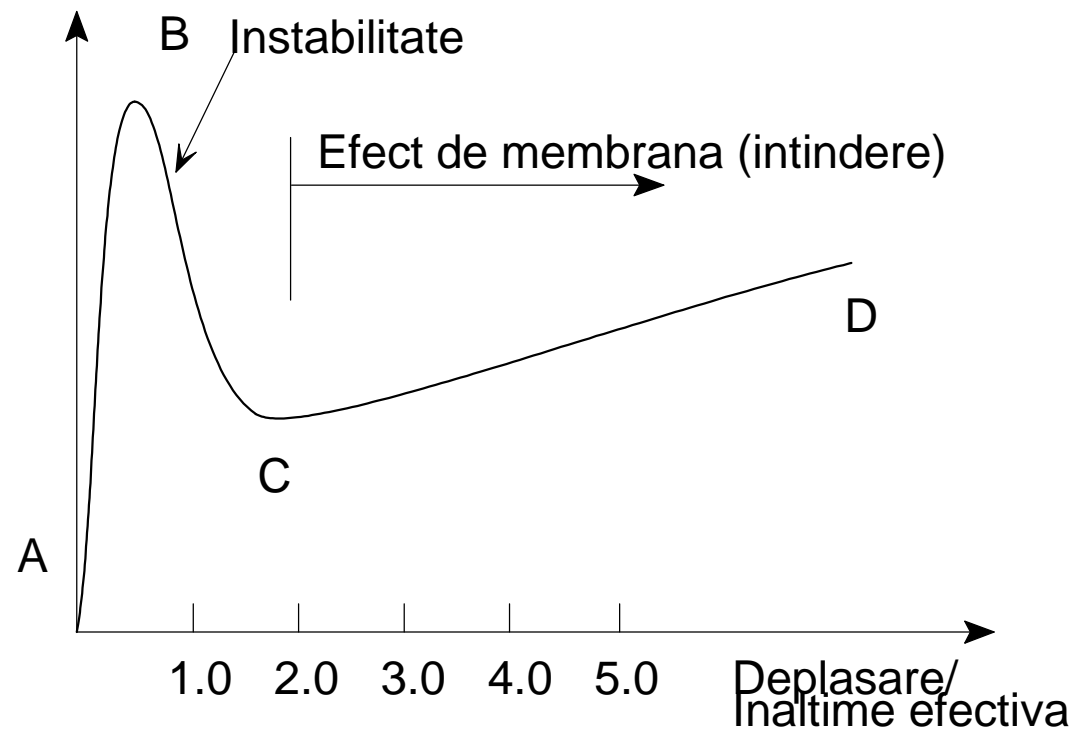


Comportamentul unui planșeu încastrat

Metoda de proiectare

Introducere în teoria liniilor de rupere și a efectului de membrană

Planșeu cu marginile încastate

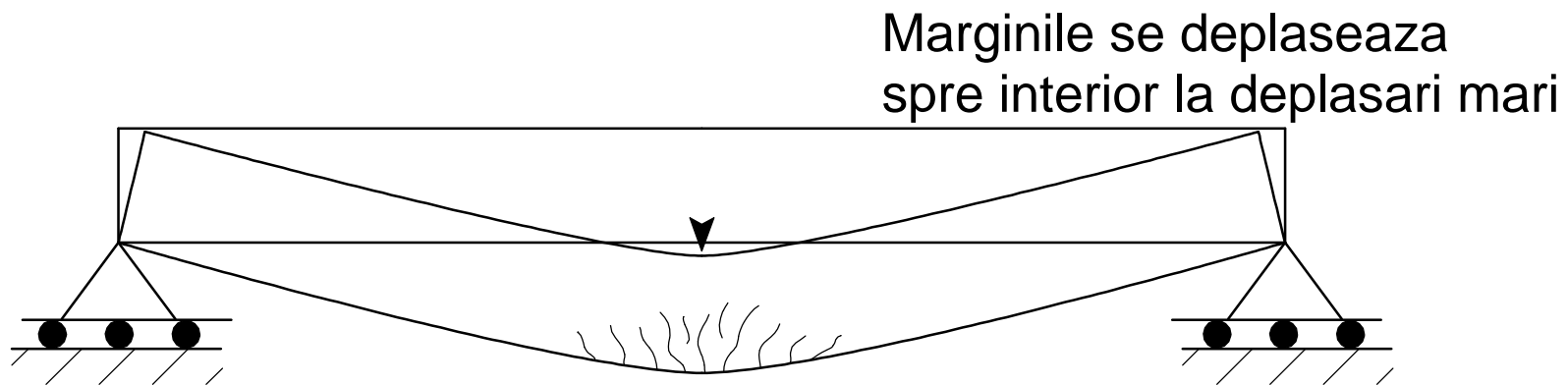


Efectul de membrană într-un planșeu încastat

Metoda de proiectare

Introducere în teoria liniilor de rupere și a efectului de membrană

Planșeu simplu rezemat

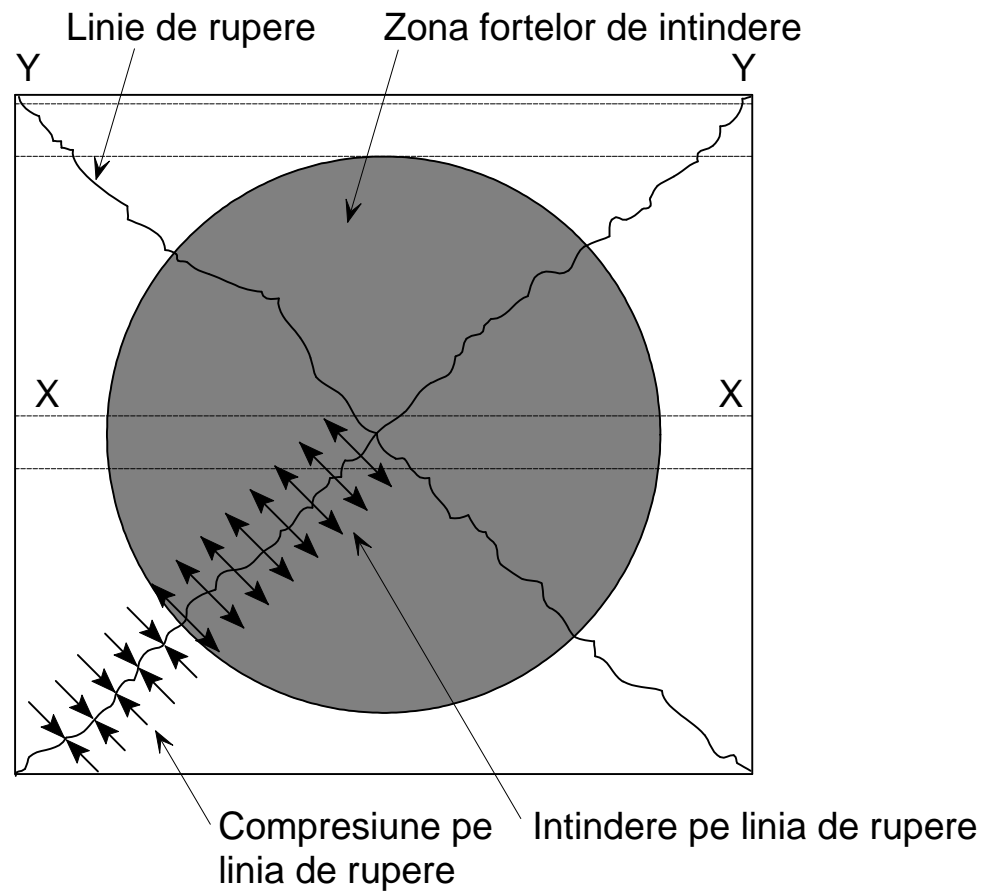


Planșeu armat pe o direcție

Metoda de proiectare

Introducere în teoria liniilor de rupere și a efectului de membrană

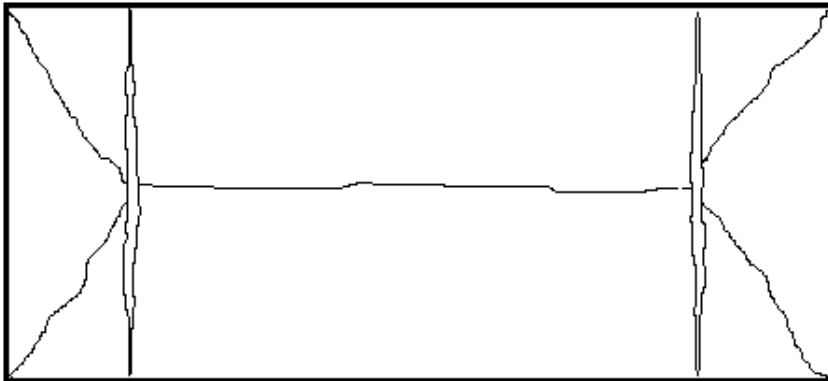
Planșeu simplu rezemat



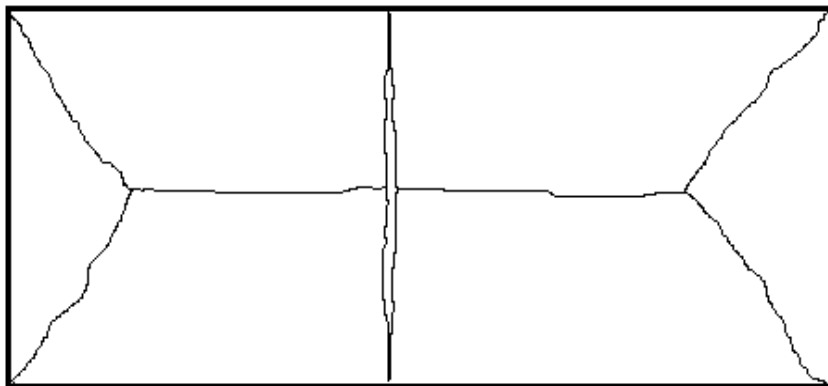
Efectul de membrană

Metoda de proiectare

Efectul tensiunilor de membrană asupra liniilor de rupere



Fisuri formate la intersecția liniilor de rupere



Fisuri formate în centrul planșeului

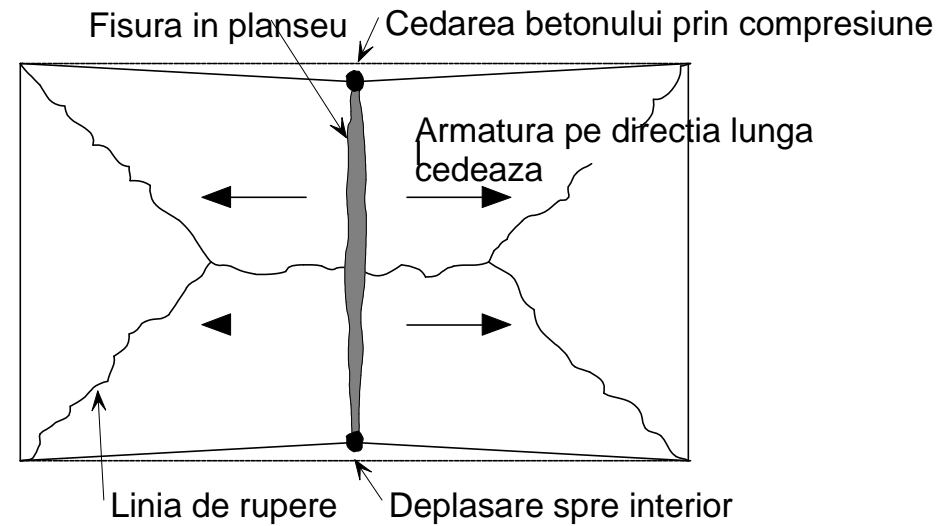
Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

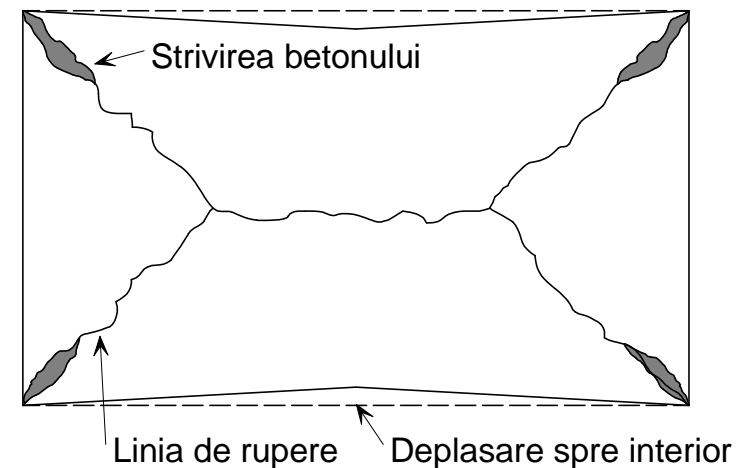
Modelul de calcul

Moduri de cedare pentru un planșeu compus

Cedarea la întindere
a plasei de armătură



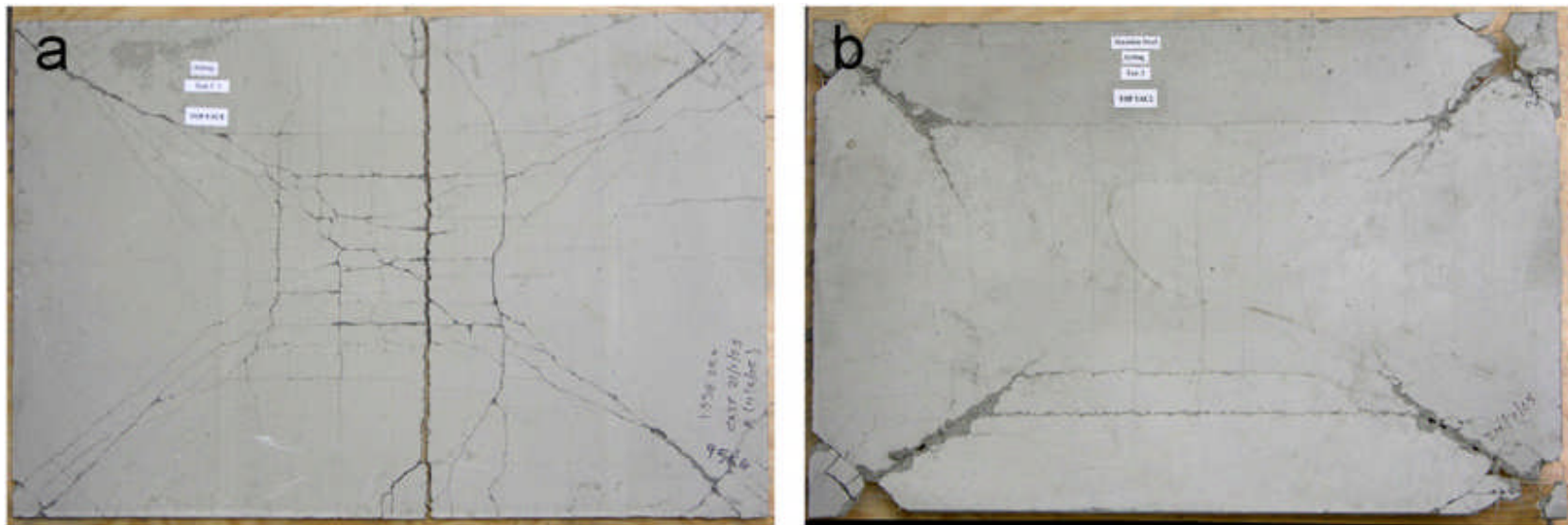
Cedarea la
compresiune
a betonului



Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Modelul de calcul



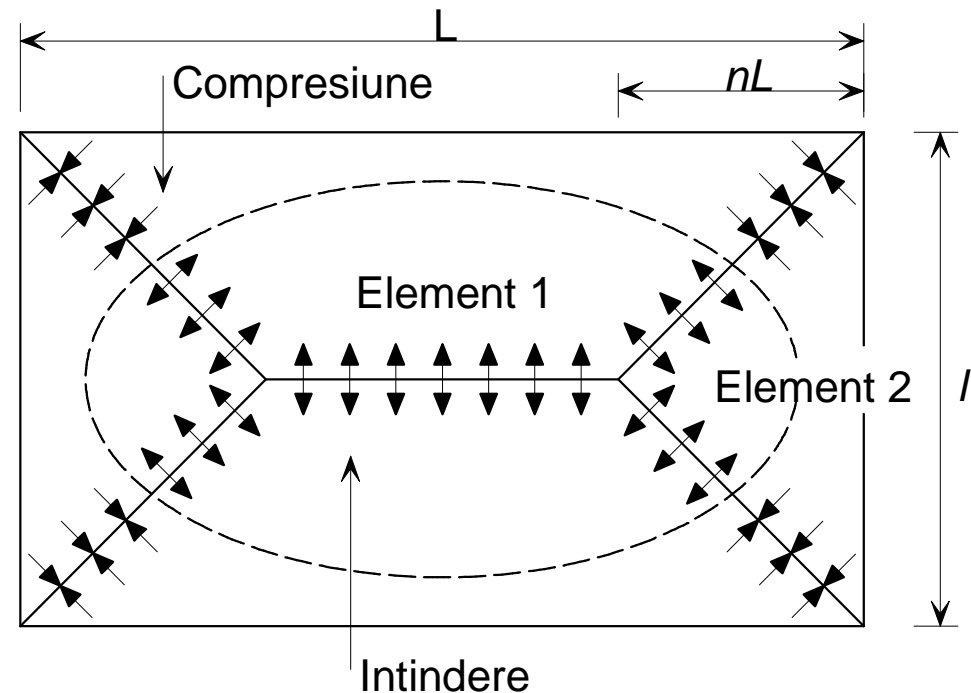
Moduri tipice de cedare a planșelor în testele realizate la temperatură normală

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Modelul de calcul

$$n = \frac{1}{2\sqrt{\mu a^2}} (\sqrt{3\mu a^2 + 1} - 1)$$



Placa dreptunghiulară, simplu rezemată, în planul căreia apar forțe de-a lungul liniilor de rupere datorate efectului de membrană

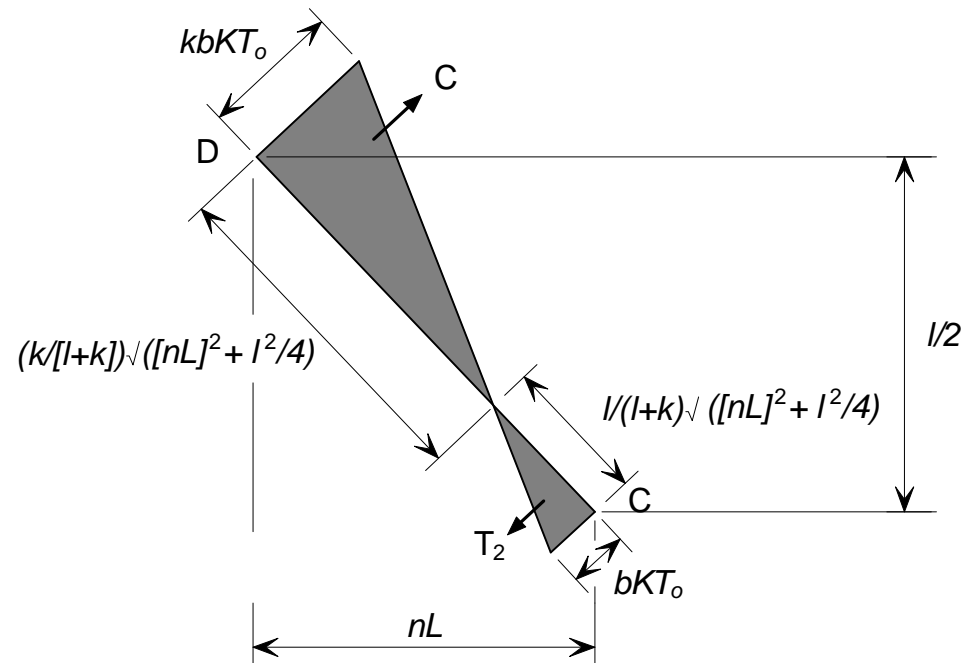
$$p = \frac{24\mu M}{l^2} \left[\sqrt{3 + \frac{1}{(a')^2} - \frac{1}{a'}} \right]^{-2}$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Modelul de calcul

Distribuția eforturilor în plan
de-a lungul liniei de rupere CD



- b, k sunt parametri ce definesc intensitatea forțelor de membrană
- KT_0 este rezistența plasei de armătură pe fâșia de lățime unitară
- n este parametru ce definește modelul liniei de rupere (definit anterior)

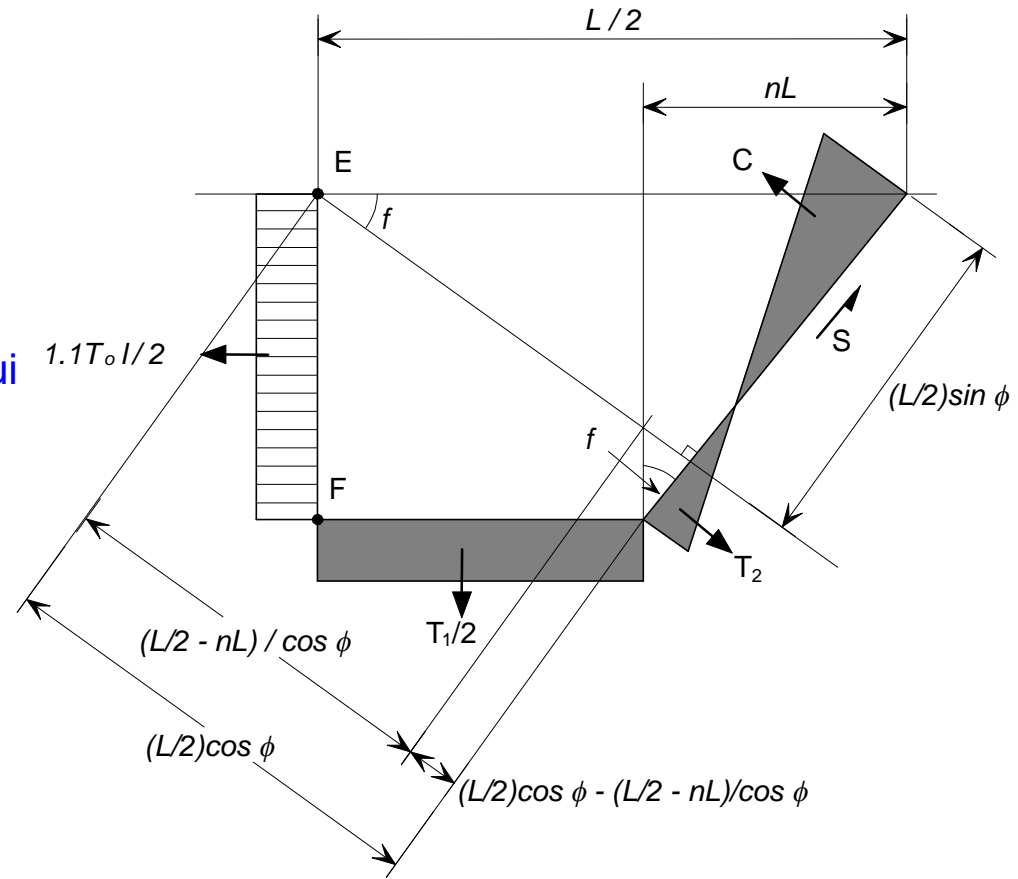
$$k = \frac{4na^2(1-2n)}{4n^2a^2 + 1} + 1$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Modelul de calcul

Ruperea armăturii pe
deschiderea scurtă a planșeului



*Distribuția eforturilor în plan
de-a lungul liniei de rupere EF*

$$b = \frac{1.1l^2}{8K(A + B + C - D)}$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Modelul de calcul

$$b = \frac{1.1l^2}{8K(A + B + C - D)}$$

unde:

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left[\frac{l^2}{8n} - \frac{\left(\frac{L}{2} - nL \right)}{nL} \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{1+k} \right) \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) \right]$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{k^2}{1+k} \right) \left[\frac{nL^2}{2} - \frac{k}{3(1+k)} \left((nL)^2 + \frac{l^2}{4} \right) \right]$$

$$C = \frac{l^2}{16n} (k - 1)$$

$$D = \left(\frac{L}{2} - nL \right) \left(\frac{L}{4} - \frac{nl}{2} \right)$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Modelul de calcul

Capacitatea portantă a elementelor 1 și 2 poate fi determinată considerând:

- aportul forțelor de membrană la capacitatea portantă a planșeului
- creșterea rezistenței la încovoiere în zonele marginale comprimate de-a lungul liniilor de rupere

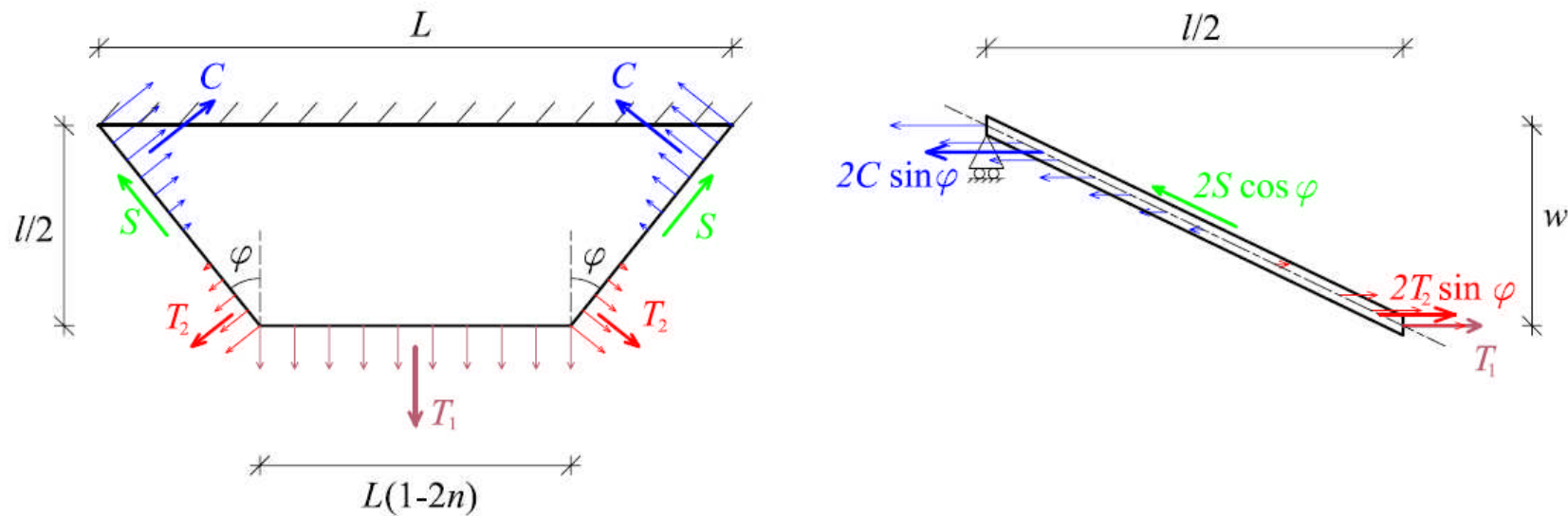
Aceste efecte sunt exprimate printr-un factor de sporire.

Inițial, efectul forțelor tăietoare în plan S sau în secțiune verticală pe liniile de rupere a fost ignorat, rezultând două încărcări diferite pentru Elementele 1 și 2, considerându-se în final o valoare medie a acestora.

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Contribuția forțelor de membrană în calculul capacității portante a planșeului



Momentul calculat cu forțele de membrană – Elementul 1

$$M_{1m} = KT_0 Lbw \left((1 - 2n) + \frac{n(3k + 2) - nk^3}{3(1 + k)^2} \right)$$

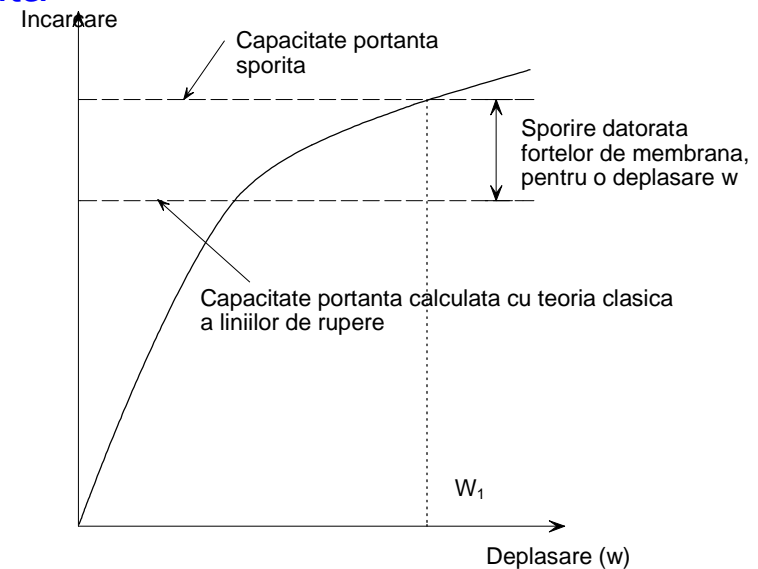
Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Contribuția forțelor de membrană în calculul capacității portante a planșeului

Împărțind M_{1m} la $\mu M_0 L$, efectul forțelor de membrană poate fi exprimat ca un spor al capacității portante a planșeului (e_{1m} - factorul de sporire pentru elementul 1), față de capacitatea portantă calculată cu teoria clasică a liniilor de rupere.

*Factorul de creștere datorat
efectului forțelor de membrană*



Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Contribuția forțelor de membrană în calculul capacității portante a planșeului

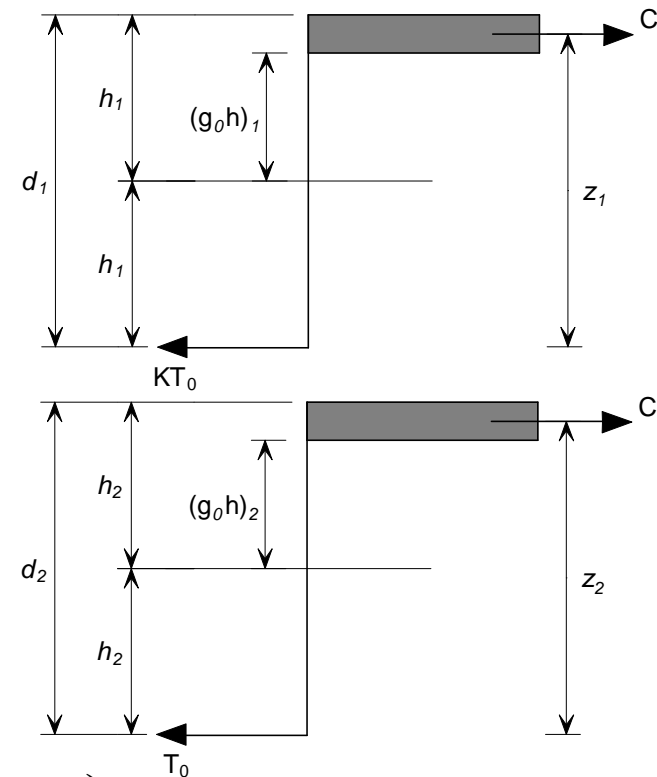
Valoarea μM_0 se calculează folosind schemele:

$$\mu M_0 = KT_0 d_1 \left(\frac{3 + (g_0)_1}{4} \right)$$

$$M_0 = T_0 d_2 \left(\frac{3 + (g_0)_2}{4} \right)$$

Factorul de sporire, e_{1m} , este dat de:

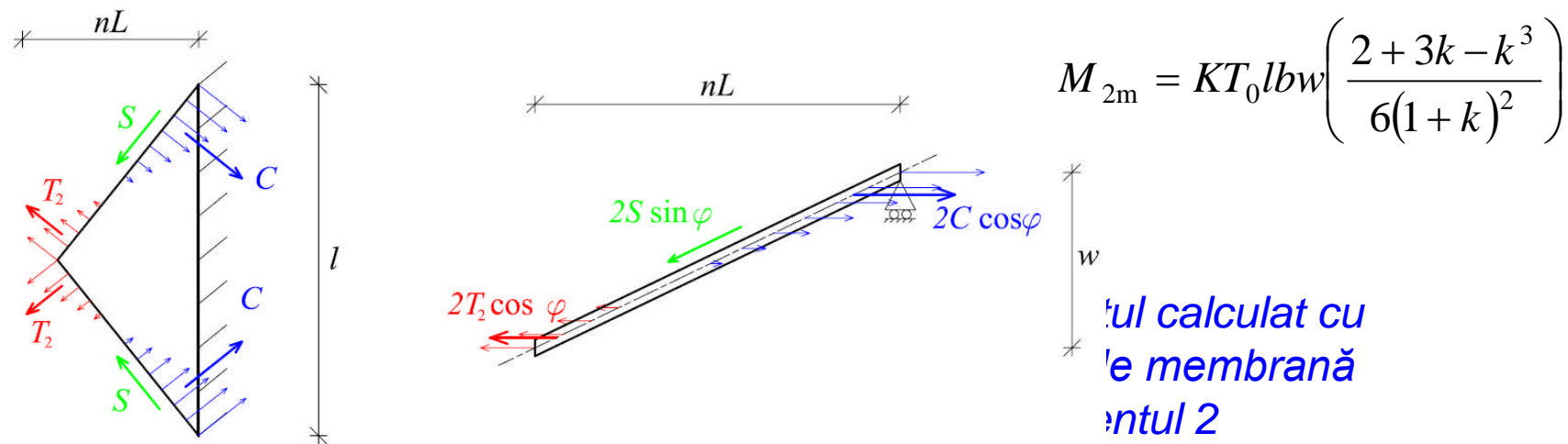
$$e_{1m} = \frac{M_{1m}}{\mu M_0 L} = \frac{4b}{3 + (g_0)_1} \left(\frac{w}{d_1} \right) \left((1 - 2n) + \frac{n(3k + 2) - nk^3}{3(1 + k)^2} \right)$$



Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Contribuția forțelor de membrană în calculul capacității portante a planșeului



Factorul de sporire, e_{2m} , este dat de:

$$e_{2m} = \frac{M_{2m}}{M_0 l} = \frac{4bK}{3 + (g_0)_2} \left(\frac{w}{d_2} \right) \left(\frac{2 + 3k - k^3}{6(1 + k)^2} \right)$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Efectul forțelor de membrană asupra rezistenței la încovoiere în zona marginală

Efectul forțelor de membrană asupra rezistenței la încovoiere de-a lungul liniilor de rupere poate fi evaluat considerând criteriul de cedare în prezența forțelor axiale.

- Pe direcția scurtă, sporul de moment încovoiator în prezența forței axiale este dat de:

$$\frac{M_N}{\mu M_0} = 1 + \alpha_1 \left(\frac{N}{KT_0} \right) - \beta_1 \left(\frac{N}{KT_0} \right)^2$$

- Pe direcția lungă:

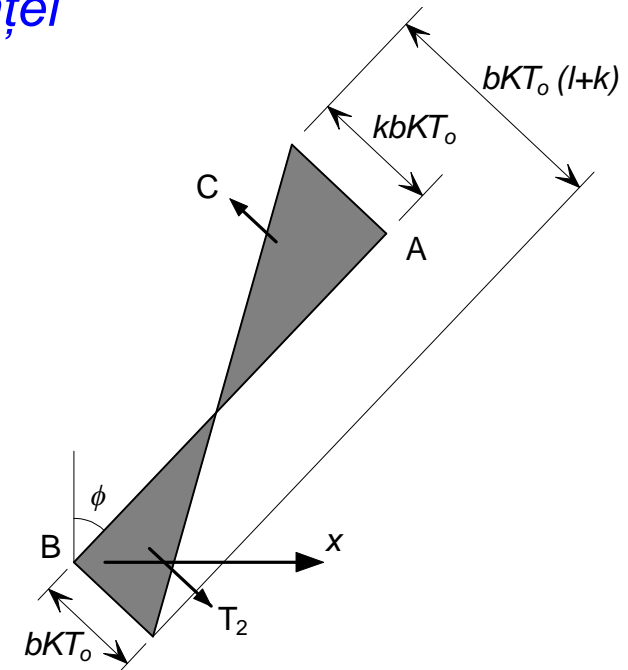
$$\frac{M_N}{\mu M_0} = 1 + \alpha_2 \left(\frac{N}{T_0} \right) - \beta_2 \left(\frac{N}{T_0} \right)^2$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

*Efectul forțelor de membrană asupra rezistenței
la încovoiere în zona marginală*

Elementul 1



Creșterea rezistenței la încovoiere datorită

forțelor de membrană este dată de factorul de sporire e_{1b} :

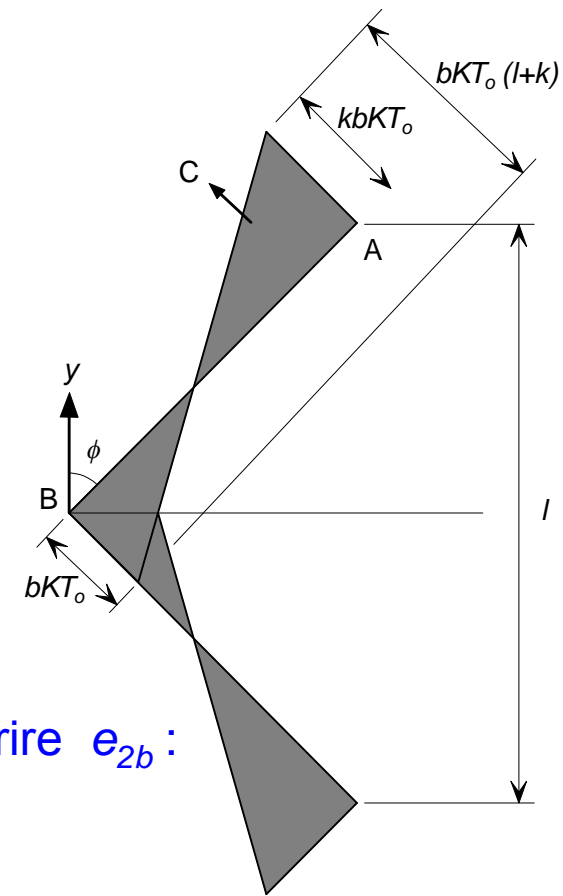
$$e_{1b} = \frac{M}{\mu M_0 L} = 2n \left[1 + \frac{\alpha_1 b}{2} (k-1) - \frac{\beta_1 b^2}{3} (k^2 - k + 1) \right] + (1-2n)(1 - \alpha_1 b - \beta_1 b^2)$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

*Efectul forțelor de membrană asupra rezistenței
la încovoiere în zona marginală*

Elementul 2



Creșterea rezistenței la încovoiere datorită
forțelor de membrană este dată de factorul de sporire e_{2b} :

$$e_{2b} = \frac{M}{M_0 l} = 1 + \frac{a_2 b K}{2} (k - 1) - \frac{\beta_2 b^2 K}{3} (k^2 - k + 1)$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Efectul forțelor de membrană asupra rezistenței la încovoiere în zona marginală

Factorul de sporire total pentru fiecare element este dat de expresiile:

$$e_1 = e_{1m} + e_{1b}$$

$$e_2 = e_{2m} + e_{2b}$$

Factorul de sporire global:

$$e = e_1 - \frac{e_1 - e_2}{1 + 2\mu a^2}$$

Metoda de proiectare

Calculul de rezistență

Cedarea betonului la compresiune

Factorul de sporire prezentat mai sus a fost calculat considerând cedarea prin ruperea plasei de armătură. Totuși, cedarea prin strivirea betonului la colțurile planșeului (compresiune), trebuie de asemenea considerată ca un posibil mod de cedare, deoarece în unele cazuri poate precede ruperea armăturii.

$$b = \frac{1}{kKT_o} \left(0.85 f_{ck} \times 0.45 \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right) - T_o \left(\frac{K + 1}{2} \right) \right)$$

Constanta b este considerată ca minimul dintre valorile date de cele două moduri posibile de cedare.

Ghid de proiectare

- Încercările experimentale prezentate, efectuate la temperatură normală, au arătat că, în condițiile în care se asigură menținerea reazemului vertical pe perimetrul planșeului, capacitatea portantă a acestuia va fi sporită de forțele de membrană.
- Un planșeu compus rezemat pe o rețea de grinzi de oțel, în condiții de incendiu, trebuie împărțit în suprafețe dreptunghiulare, numite zone de calcul, pentru care reazemul vertical poate fi menținut pe întreg perimetrul. Aceste linii de reazem vertical sunt create prin grinzile perimetrare care reazemă pe stâlpi și sunt protejate la foc.
(vezi Exemplul de calcul)
- Cu excepția zonelor marginale, planșeul este continuu peste marginile fiecărei zone de calcul.
În condiții de incendiu, este posibil să se formeze fisuri peste grinzile perimetrare.
În mod conservativ, se consideră că zonele de calcul ale planșeului sunt libere pentru rotații și deplasări orizontale de-a lungul marginilor.

Ghid de proiectare

Ipoteze de proiectare

- Pentru un planșeu compus, modelul liniilor de rupere va depinde de comportarea grinzilor compuse neprotejate, care pierd în mod continuu din rezistența și deformabilitatea inițială, odată cu creșterea temperaturii.
- Inițial, planșeul compus acționează ca un element cu deschidere pe o direcție, rezemat pe grinzile secundare. Odată cu creșterea temperaturii, planșeul tinde să aibă comportarea unui element simplu rezemat pe 4 laturi și se formează liniile de rupere ale plăcilor.
- Capacitatea portantă a plăcii este calculată în ipoteza că grinzile compuse nu au rezistență și se bazează pe modelul liniilor de rupere compatibil cu condițiile de margine, care oferă valoarea minimă pentru capacitatea portantă.
Capacitatea portantă este apoi mărită prin luarea în considerare a efectului de membrană bazat pe deplasarea estimată a plăcii și pe modurile de cedare descrise anterior.
(vezi Exemplul de calcul)

Ghid de proiectare

Criteria de cedare

- Ca urmare a încercărilor realizate atât la temperatură normală cât și la temperaturi ridicate, funcție de procentul de armare, raportul laturilor plăcii și de ductilitatea armăturii, s-au identificat două moduri de cedare.
- Ruperea armăturii de-a lungul deschiderii scurte a fost modul dominant de cedare în cazul planșeelor slab și mediu armate, în timp ce în cazul planșeelor supra-armate și în cele cu armătură foarte ductilă, a apărut strivirea betonului la colțurile planșeului.
- În majoritatea încercărilor la foc, planșeele de beton simplu rezemate au cedat prin ruperea pe lățime, de-a lungul deschiderii scurte (l). Metoda de proiectare prezentată calculează capacitatea portantă pentru o anumită deplasare verticală.

Se prezintă în continuare o procedură de calcul pentru estimarea deplasării planșeului imediat înainte de cedare, deplasare necesară în calculul efectului de membrană.

Ghid de proiectare

Deplasarea verticală a planșeului

Deplasarea datorită gradientului de temperatură

$$w_{\theta} = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{8h}$$

Pentru condiții reale de incendiu, unde cel mai probabil nu va exista o încălzire uniformă, se aplică un factor de reducere 2.0 :

$$w_{\theta} = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{16h}$$

Ghid de proiectare

Deplasarea verticală a planșeului

Deplasarea datorită deformației armăturii

Lungimea planșeului deformat L_c :
$$L_c = L \left(1 + \frac{8w^2}{3L^2} \right)$$

Alungirea armăturii poate va fi:
$$\varepsilon = \frac{8w^2}{3L^2}$$

Componenta deplasării datorită deformațiilor armăturii w_ε , se bazează pe o valoare conservativă a unei alungiri medii, calculată pentru o tensiune egală cu jumătate din limita de curgere la temperatură normală:

$$w_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s} \right) \frac{3L^2}{8}}$$

Ghid de proiectare

Deplasarea verticală a planșeului

Deplasarea estimată totală

Efectul de membrană al planșeului se calculează pe baza deplasării estimate a planșeului, prin combinarea componentelor datorate gradientului de temperatură și a deformației armăturii:

$$w_m = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{16h} + \sqrt{\left(\frac{0.5 f_{sy}}{E_s}\right) \frac{3L^2}{8}}$$

Ghid de proiectare

Metodologia de proiectare

- Metoda de proiectare este concepută pentru planșee compuse oțel – beton susținute de stâlpi de oțel sau compuși oțel-beton.
- Planșeul de beton este realizat cu tablă cutată și sprijinit pe talpa superioară a grinzii de oțel, grinzi care conlucrează cu planșeul de beton.
- Perimetrul zonelor de calcul trebuie să corespundă cu rețeaua stâlpilor.
(vezi Exemplul de calcul)
- Planșeul compus trebuie să satisfacă grosimea minimă de izolație după EN1994-1-2 în condiții de incendiu.
Armarea planșeului compus trebuie să fie sub formă de plasă de armătură.

Ghid de proiectare

Metodologia de proiectare

Calculul capacității portante a planșeului compus

Se face de-a lungul liniilor de rupere a planșeului compus luând în considerare sporirea datorată efectului de membrană prezentate anterior.

Calculul capacității portante a grinzilor neprotejate

În situația de incendiu, grinzile neprotejate din zonele de calcul ale planșeului vor mări rezistența planșeului prin efectul catenar.

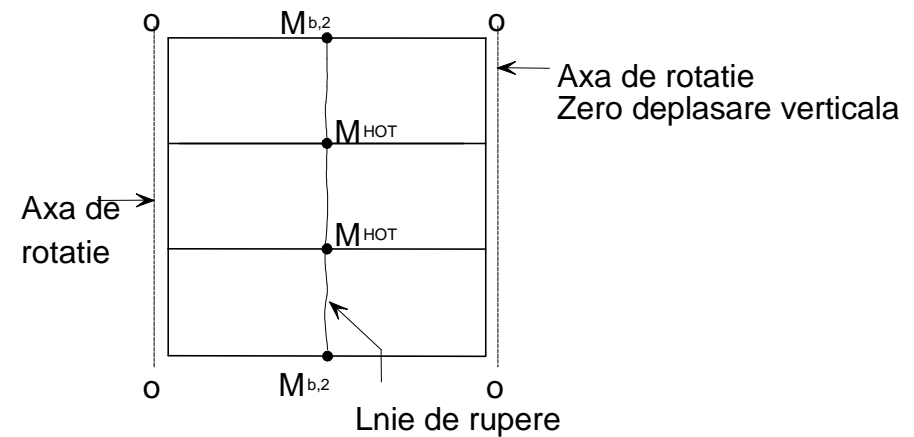
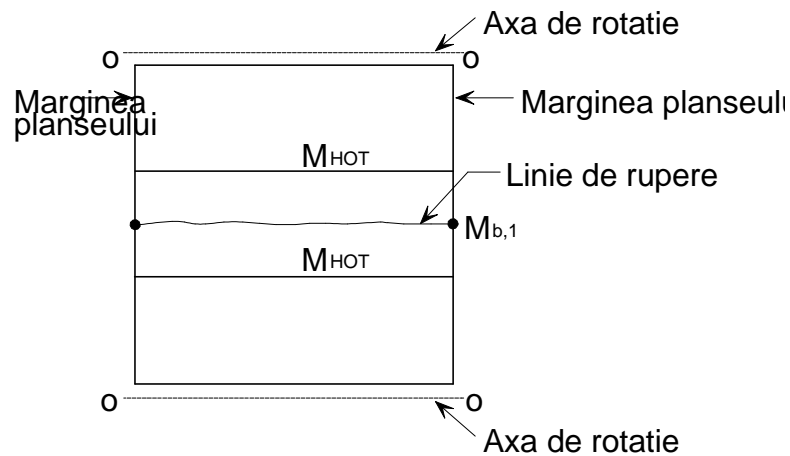
Temperatura grinzilor neprotejate se calculează folosind metoda dată în EN1994-1-2, 4.3.4.2.

Calculul pentru momentul capabil al grinzii la temperaturi ridicate urmărește principiile din EN1994-1-2, 4.3 luând în considerare conlucrarea dintre elementele de oțel și beton. (vezi *Exemplul de calcul*)

Ghid de proiectare

Proiectarea la foc a grinzilor perimetrice

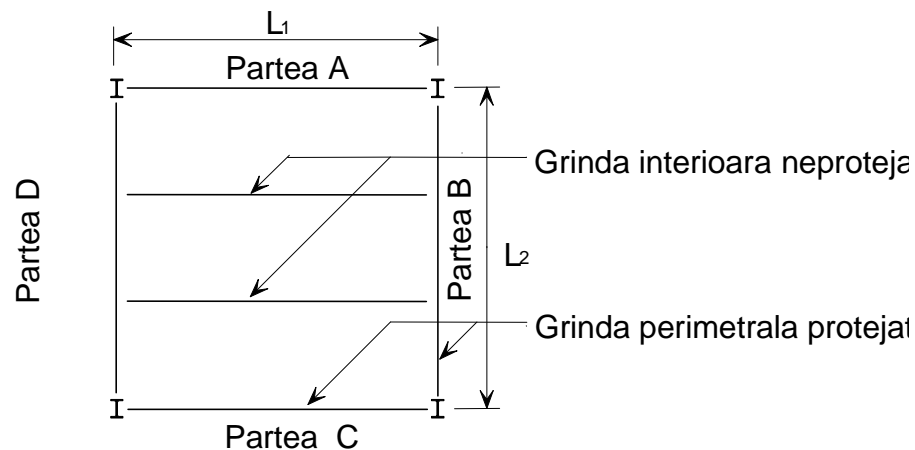
Grinzile perimetrice care mărginesc fiecare zonă de calcul a planșeului trebuie proiectate pentru rezistența la foc cerută pentru întregul planșeu, pentru a asigura rezemarea verticală perimetrală.



Model de linii de rupere alternativ ce include formarea articulațiilor plastice în grinzile perimetrice

Ghid de proiectare

Proiectarea la foc a grinzilor perimetrare



(vezi Exemplul de calcul)

Linii de rupere pot apărea de-a lungul centrului plășii:

- paralel cu grinzile neprotejate, cu articulații plastice formate în grinzile perimetrare în părțile A și C;
- perpendicular pe grinzile neprotejate cu articulații plastice formate în grinzile perimetrare în părțile B și D și în grinzile neprotejate.

Folosind acest model de linii de rupere și egalând lucru mecanic interior cu cel exterior al mecanismului astfel format, pentru o deplasare unitară de-a lungul liniei de rupere, se poate determina momentul capabil al grinzilor perimetrare.

Ghid de proiectare

Proiectarea la foc a grinzilor perimetrare

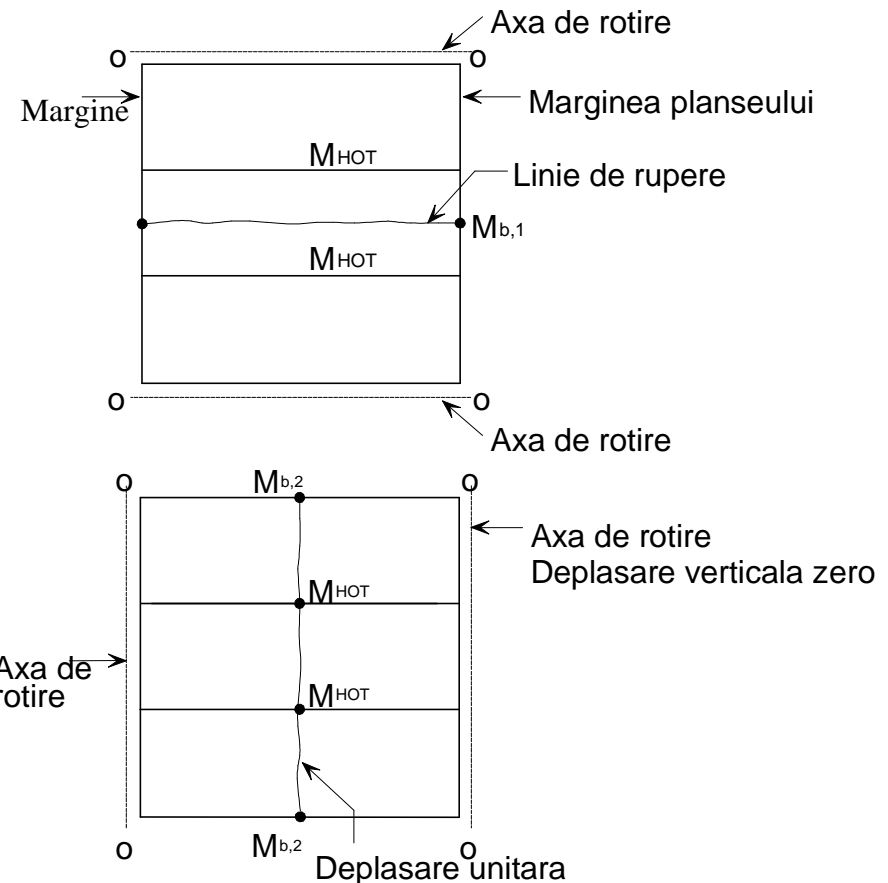
Grinzi principale marginale în ambele părți

Linia de rupere paralelă
cu grinzile neprotejate:

$$M_{b,1} = \frac{pLl^2 - 8ML_{\text{eff}}}{16}$$

Linia de rupere perpendiculară
pe grinzile neprotejate:

$$M_{b,2} = \frac{pL^2l - 8ML_{\text{eff}} - 8n_{ub}M_{\text{Rd,fi}}}{16}$$



Ghid de proiectare

Proiectarea la foc a grinzilor perimetrare

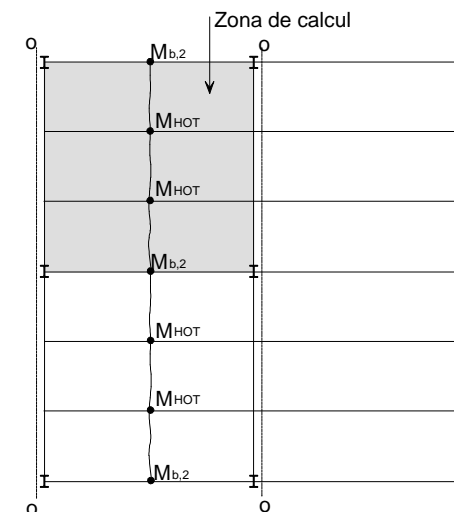
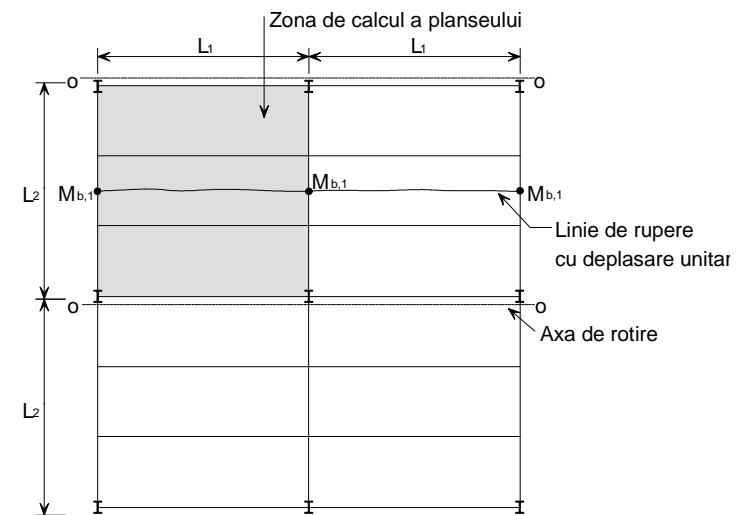
Grinda principală marginală într-o parte

Linia de rupere paralelă
cu grinzile neprotejate:

$$M_{b,1} = \frac{pLl^2 - 8ML_{\text{eff}}}{12}$$

Linia de rupere perpendiculară
pe grinzile neprotejate:

$$M_{b,2} = \frac{pL^2l - 8Ml_{\text{eff}} - 8n_{ub}M_{\text{Rd,fi}}}{12}$$



Ghid de proiectare

Proiectarea la foc a grinzilor perimetrare

Zona de planșeu fără grinzi marginale

Pentru zonele în care nici una dintre grinzile perimetrare nu sunt grinzi marginale, este conservativ să se folosească expresiile anterioare.

Proiectarea grinzilor marginale

Nu sunt proiectate ca elemente compuse, deoarece prevederea conectorilor de forfecare conduce la costuri mai mari fata de o grinda de oțel cu secțiune mai puternică care nu lucrează în colaborare cu placa de beton.

Pentru proiectarea la foc, este important ca planșeul să fie ancorat corespunzător în grinzile marginale, fiindcă aceste grinzi vor fi dispuse pe perimetrul zonelor de calcul.

Dacă grinzile marginale nu sunt proiectate ca elemente compuse, ele trebuie să aibă conectori de forfecare la maxim 300 mm.

Ghid de proiectare

Analiza termică

Distribuția temperaturii în placa de beton

Temperaturi determinate din tabel:

θ_2 : temperatura feței expuse a plăcii (inf.);

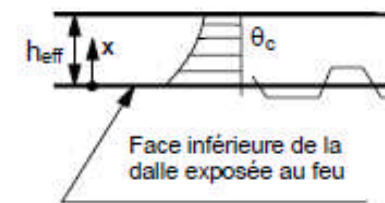
θ_1 : temperatura feței ne-expuse a plăcii (sup.);

θ_s : temperatura în placa de beton la nivelul armăturii.

Pentru expunere la foc standard ISO, distanțele x din tabelul de mai sus pentru determinarea temperaturilor sunt:

- pentru θ_2 , $x = 2,5$ mm ;
- pentru θ_1 , $x = h_{eff}$;
- pentru θ_s , $x = h_{eff} - d$ (d : distanța între axul plasei de armătură și fața superioară a plăcii).

Distanța x [mm]	Temperatura în placa de beton θ_c [°C]				
	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min
2,5	681	837	918	973	1048
10	509	682	778	844	933
20	345	519	621	694	796
30	233	395	497	571	677
40	156	300	398	470	577
50	106	228	318	388	492
60	76	172	254	320	420
70	56	130	203	263	359
80	42	101	161	217	307
90	33	80	129	178	262
100	27	64	104	146	224
110	24	51	86	121	191
120	22	42	71	101	163
130	21	35	60	86	140
140	21	30	50	74	122
150	20	27	43	64	107



Ghid de proiectare

Analiza termică

Temperatura în grinzile secundare de oțel neprotejate

Temperatura grinzilor de oțel neprotejate se poate calcula cu ajutorul metodei simplificată din EN1994-1-2, secțiunea 4.3.4.2.2.

Creșterea temperaturii în oțel se calculează cu următoarea ecuație:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{\text{shadow}} \left(\frac{1}{c_a \rho_a} \right) \left(\frac{A_i}{V_i} \right) \dot{h}_{\text{net}} \Delta t$$

Factorul de corecție pentru efectul de umbră se calculează în conformitate cu EN1994-1.2, 4.3.4.2.2(4):

$$k_{\text{shadow}} = 0,9 \frac{e_1 + e_2 + b_1/2 + \sqrt{h_w^2 + (b_1 - b_2)^2/4}}{h_w + b_1 + b_2/2 + e_1 + e_2 - e_w}$$

Ghid de proiectare

Analiza termică

Temperatura în grinzile secundare de oțel neprotejate

Factorul de secțiune:

- pentru talpa de jos a grinzii de oțel:

$$A_i/V_i = 2 \frac{b_1 + e_1}{b_1 e_1}$$

- pentru talpa de sus a grinzii de oțel, în condițiile precizate de EN 1994-1.2, 4.3.4.2.2(9):

$$A_i/V_i = 2 \frac{b_2 + e_2}{b_2 e_2}$$

- Dacă înălțimea secțiunii grinzii este mai mică decât 500mm, temperatura inimii poate fi considerată egală cu cea a tălpii inferioare, în conformitate cu EN 1994-1.2, 4.3.4.2.2(10). Altfel, se poate utiliza următoarea expresie:

$$A_i/V_i = \frac{2}{e_w}$$