

Seminar "Implementarea în practica de proiectare anti-seismică din România a contravântuirilor cu flambaj împiedicat (IMSER)"

27 septembrie 2017, Universitatea Tehnică de Construcții București

Proiectarea și analiza tehnico- economică a contravântuirilor cu flambaj împiedicat

Ciprian-Ionut Zub^{*,1}, Axente Todea², Aurel Stratan¹

¹ *Universitatea Politehnica Timișoara*

² *Hydromatic Sistem Timișoara*

Cuprins

- **Procedura de proiectare a BRB**
- **Tehnologia de realizare a BRB**
- **Analiza tehnico-economică a BRB**
- **Concluzii**

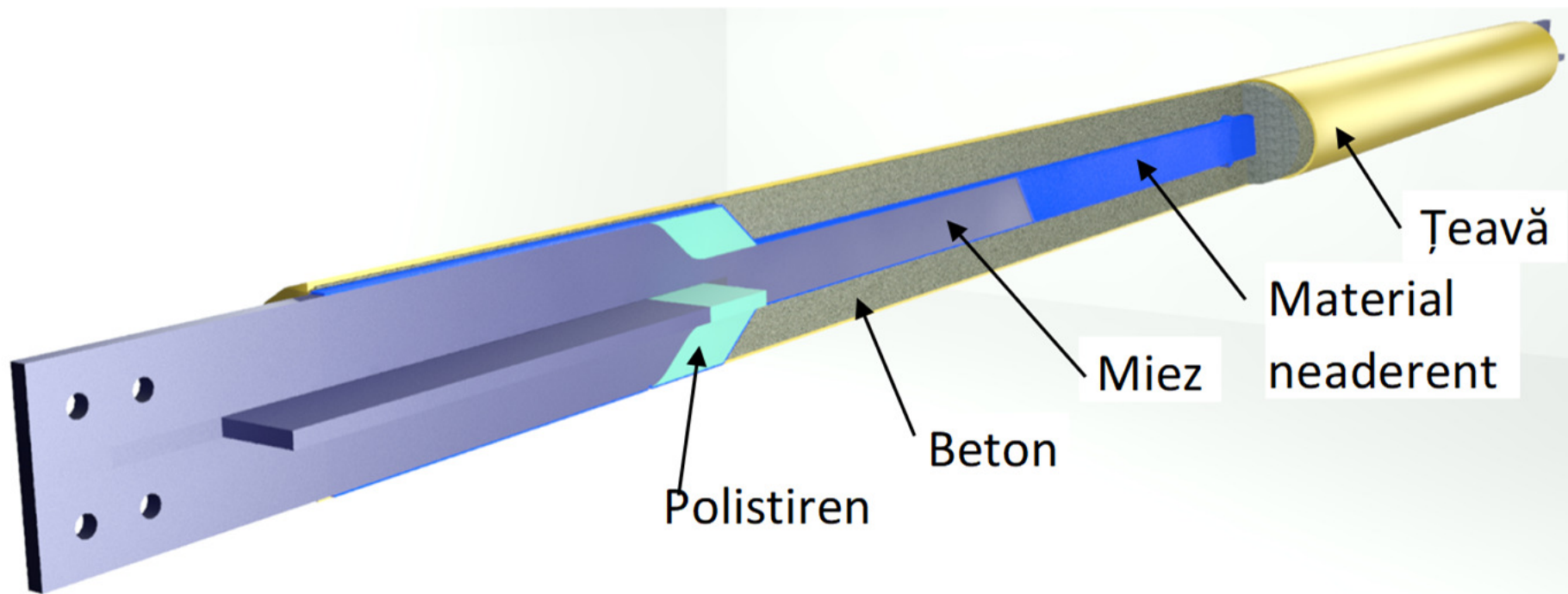
Ghid de proiectare BRB

Generalități

Baza normativă:

- codul P100-1/2013 (proiectarea BRB)
- standardul SR EN 15129 (controlul calității producției)
- codul ANSI/AISC 341-16 (protocolul de încărcare ciclică)

▪ Alcătuire conceptuală BRB



Limitele de aplicare

- **Pe baza rezultatelor din calificare experimentală – IMSER:**

- **Forța capabilă a BRB-ului ($N_p = A_p \cdot f_{y,m}$)**
 $150 \text{ kN} \leq N_p \leq 840 \text{ kN}$ (AISC341-16)

- **Marcă oțel miez BRB**
S235, S275, S355 (P100-1/2013)

- **Raportul h_p/t_p al miezului BRB**
 $4,0 \leq h_p/t_p \leq 5,0$ (IMSER)

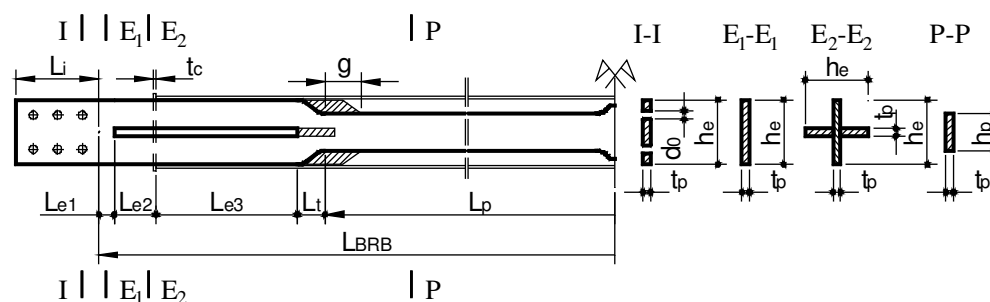
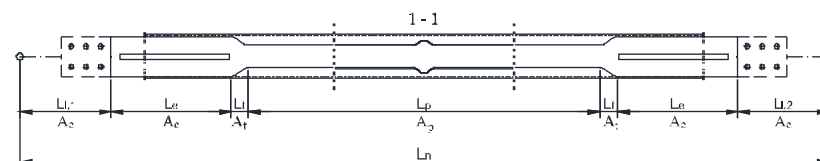
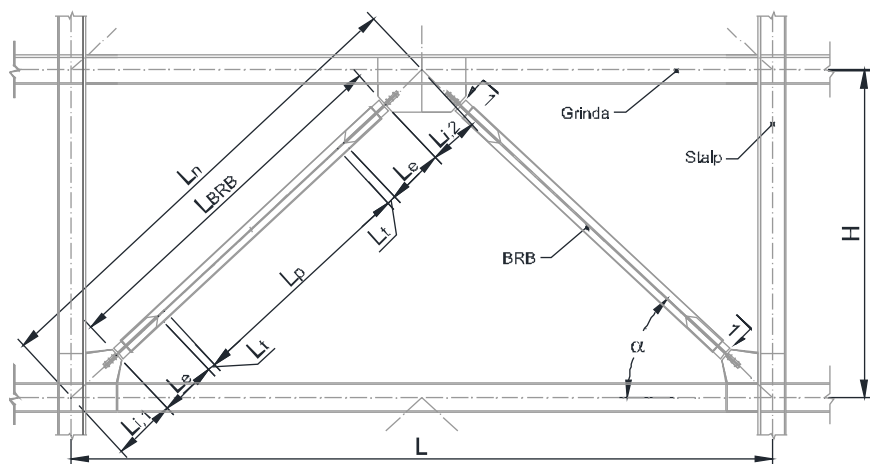
- **Deformația specifică maximă a miezului BRB**
 $\epsilon_{b,max} \leq \pm 4\%$ (IMSER)

- **Clasă mortar/beton**
minim C 35/45 (IMSER)

Procedura de calcul

1. Date inițiale

- Geometrie cadru BRBF
- Cerințe de proiectare:
 - rezistența necesară a BRB-ului, $N_{p,nec}$;
 - deplasarea relativă de nivel de proiectare, d_r^{SLU} .



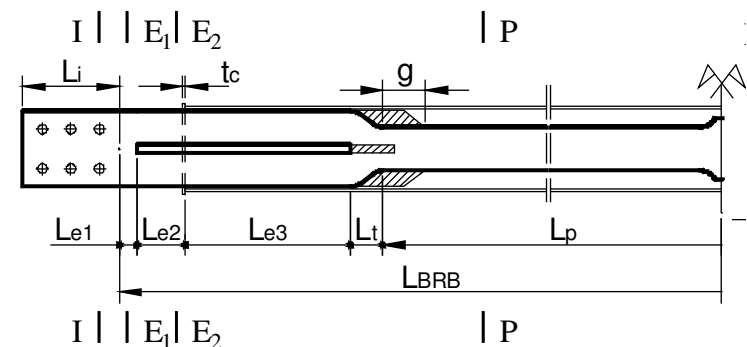
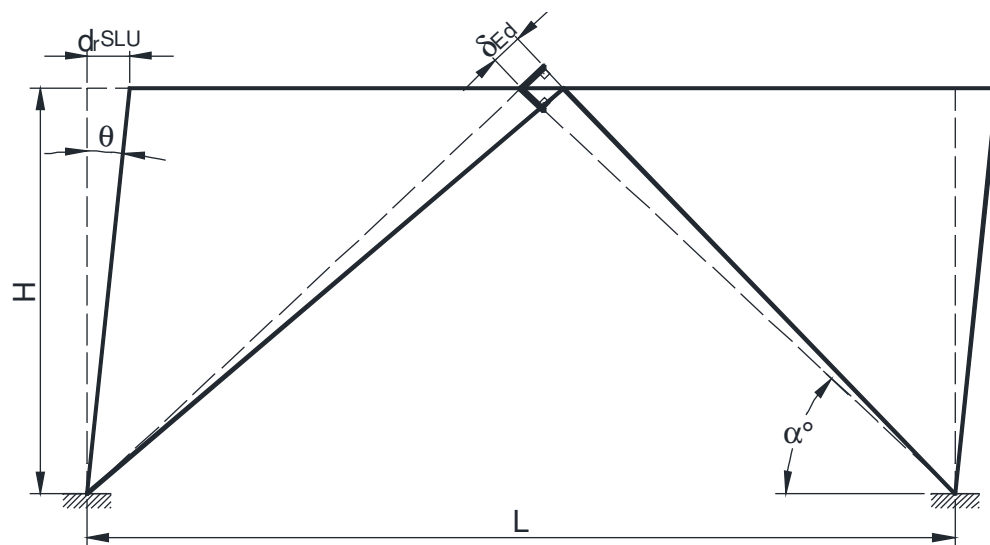
2. Spațiul de deformare axială

- Cursa BRB-ului

$$\delta_{Ed} = 2 \cdot d_r^{SLU} \cdot \cos \alpha$$

- Spațiul de deformare axială:

$$g = 0,7 \cdot \delta_{Ed}$$



3. Zona plastică

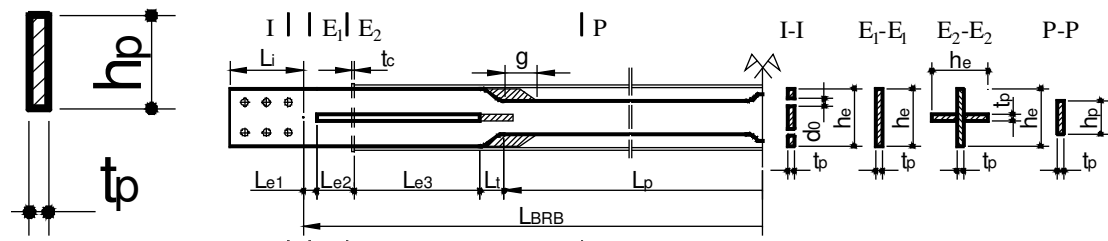
- Aria secțiunii transversale

$$A_p \geq N_{p,nec} / f_{y,m}$$

- $N_{p,nec} = N_{pl,Rd} \cdot \gamma_{M0}$ – rezistența necesară a BRB-ului, furnizată de proiectantul structurii;
- A_p – aria nominală
- $f_{y,m}$ – limita de curgere determinată experimental
(alternativ $f_y \rightarrow$ *supradimensionare elemente nedisipative*)
- $\gamma_{M0} = 1,1$ – coeficientul parțial de siguranță pentru oțel

- Raportul h_p/t_p :

$$4,0 \leq h_p/t_p \leq 5,0$$

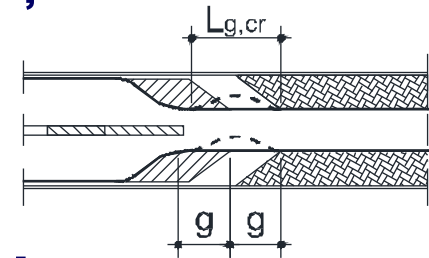


3. Zona plastică

- Zveltețea relativă a miezului pe porțiunea neîmpiedicată

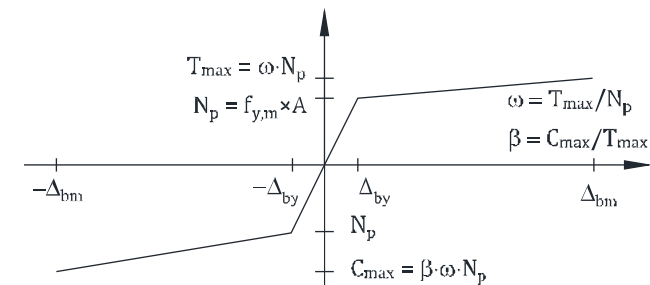
$$\bar{\lambda}_p \leq 0,2$$

- preîntâmpinarea flambajul excesiv după axa maximă de inerție
- prevenirea unei posibile împănări a miezului în spațiul de deformare axială
- $L_{g,cr} = 2g$, lungimea maximă a acestui spațiu



- Rezistența nominală și capacitățile corectate:

- Rezistența nominală $N_p = A_p \cdot f_{y,m}$
- Capacitățile corectate $T_{max} = \omega \cdot N_p$
 $C_{max} = \omega \beta \cdot N_p$

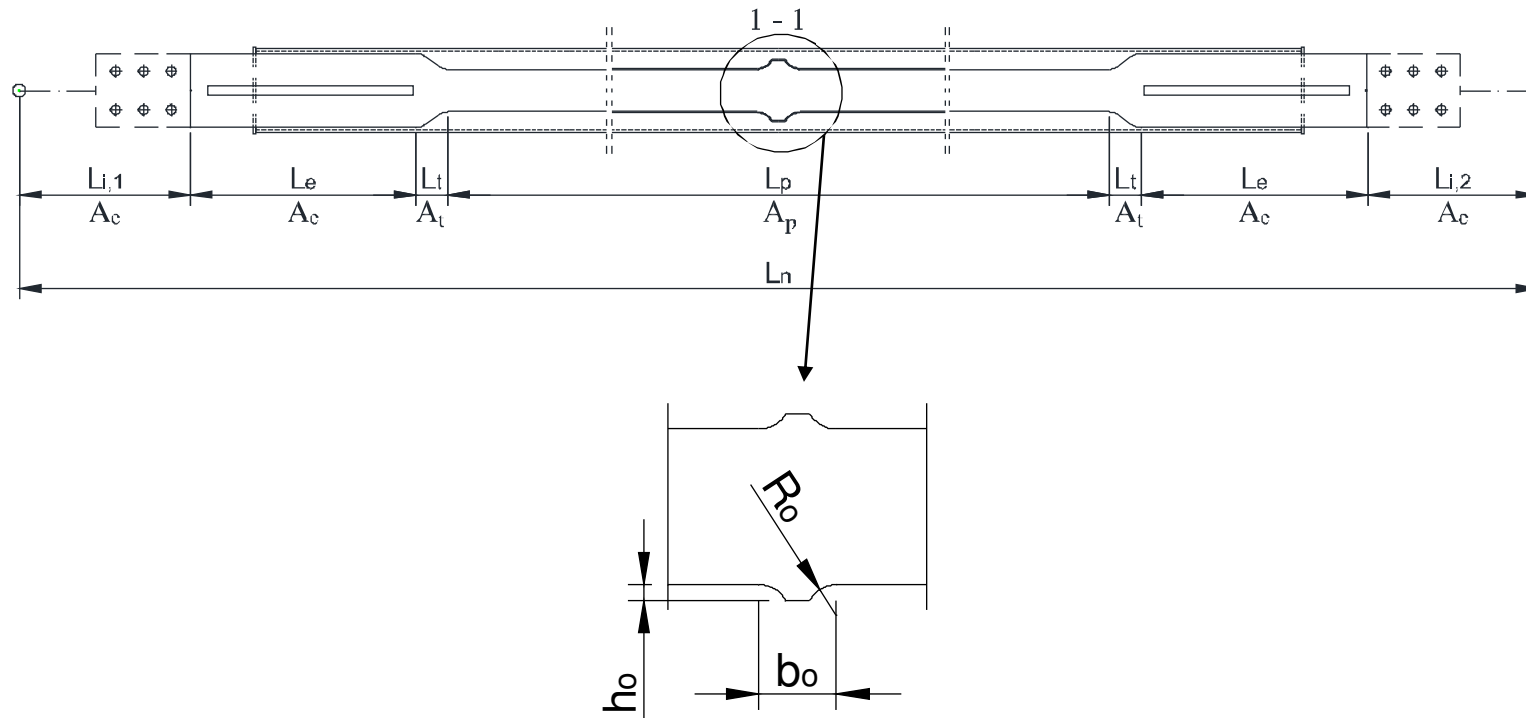


- factorii de suprarezistență:
datorat consolidării materialului, $\omega = 1,45$
datorat interacțiunii cu betonul, $\beta = 1,17$

3. Zona plastică

■ Geometria opritorului

- lățimea: $b_0 = 0,5 \cdot h_p$
- înălțimea: $h_0 = 0,1 \cdot h_p$
- raza de racord: $R_0 = 0,2 \cdot h_p$

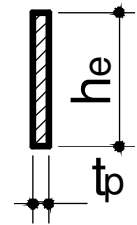


4. Zona elastică

■ Geometria

- Zona L_{e1} : $L_{e1} = 2 \cdot t_p$
- Zona L_{e2} : $L_{e2} = 0,7 \cdot d_{Ed} + 20 \text{ mm}$
- Zona L_{e3} : $L_{e3} = 2 \cdot h_e + 0,7 \cdot \delta_{Ed}$

(lipsa rigidizărilor – limitare $M_{incov.}$)



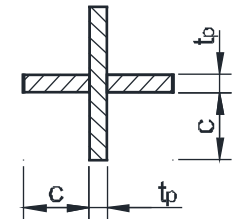
■ Rezistența de calcul (E1-E1)

$$C_{max}/N_{c,e1,Rd} \leq 1,0$$

- $N_{c,e1,Rd} = A_{e1} \cdot f_{y,m}/g_{M0}$ este rezistența de calcul a zonei elastice
- t_p = cunoscut $\rightarrow h_e$, înălțimea secțiunii

■ Verificarea clasei secțiunii (E2-E2)

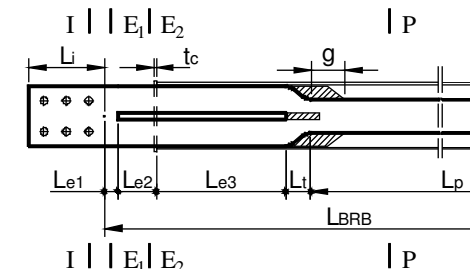
$$c/t \leq 14 \cdot \varepsilon$$



■ Zveltetea relativă a zonei elastice

$$\bar{\lambda}_e \leq 0,2$$

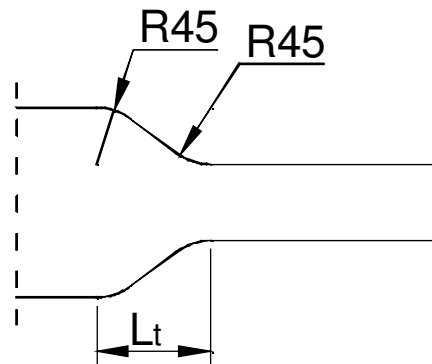
- preîntâmpinarea flambajului zonei elastice
- $L_{e,cr} = 1,2 \cdot (L_{e1} + L_{e2} + 0,7 \cdot \delta_{Ed})$, lungimea maximă
- zona elastică are secțiune variabilă $\rightarrow (I, i)$ ale secțiunii A_{e1}



4. Zona de tranziție

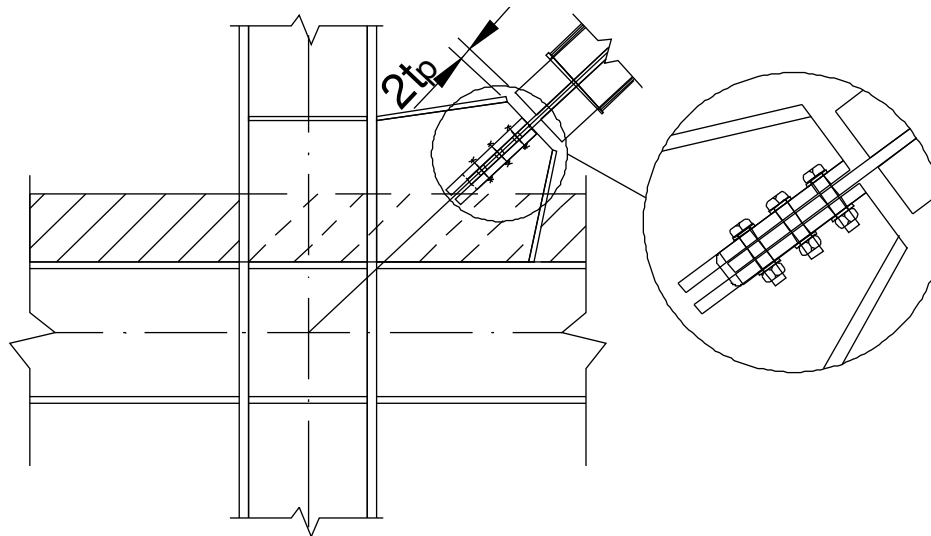
■ Geometria

- Trecere graduală
- Prevenirea apariției concentrărilor de tensiuni ce pot duce la cedarea prematură a elementului
- Lungimea: $L_t = h_e - h_p$
- Raza de racord: $R_t = (h_e - h_p)/2$



5. Îmbinarea

- Tipuri de îmbinări BRB-guseu:
îmbinări sudate, cu bolt, cu șuruburi
- Îmbinare cu șuruburi - problema principală:
 - prinderea rigidă între BRB și guseu → solicitarea capătului BRB la $N + M$ (efectului de cadru) → performanță nesatisfăcătoare
- Soluția:
 - limitarea $M_{Ed} = M_{pl,miez}$
 - oprirea rigidizărilor la o distanță de $2 \cdot t_p$ față de guseu

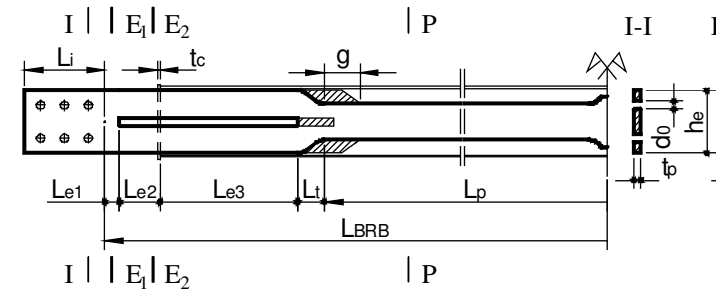


5. Îmbinarea

- Eforturi de calcul:

$$N_{c,i,Ed} = 1,1 \cdot C_{max}$$

$$N_{t,i,Ed} = 1,1 \cdot T_{max}$$



- Verificarea la întindere și la compresiune a secțiunii de arie netă a miezului (secțiunea I-I):

$$N_{t,i,Ed} \leq N_{t,i,Rd}$$

$$N_{c,i,Ed} \leq N_{c,i,Rd}$$

- Verificarea rezistenței la forfecare a șuruburilor:

$$N_{c,i,Ed} \leq F_{v,Rd}$$

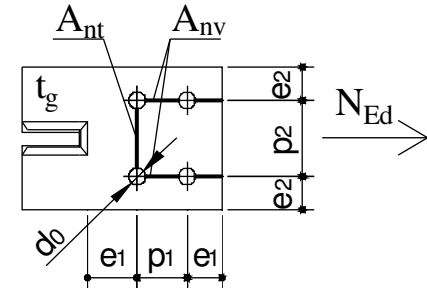
- Verificarea rezistenței la presiune pe gaură a șuruburilor:

$$N_{c,i,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

5. Îmbinarea

- Verificarea rezistenței la rupere în bloc a celor două table sudate pe guseu:

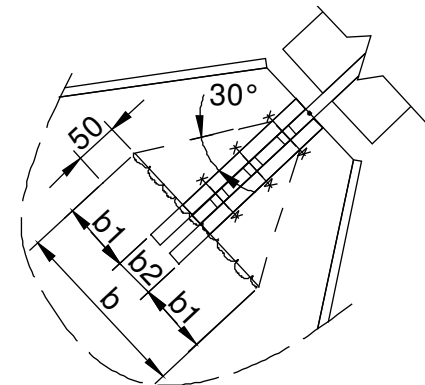
$$N_{t,i,Ed} \leq F_{eff,1,Rd}$$



- Verificarea rezistenței la întindere și compresiune a guseului în secțiunea de la extremitatea tablelor sudate:

$$N_{t,i,Ed} \leq N_{t,g,Rd}$$

$$N_{c,i,Ed} \leq N_{c,g,Rd}$$



- Suduri:

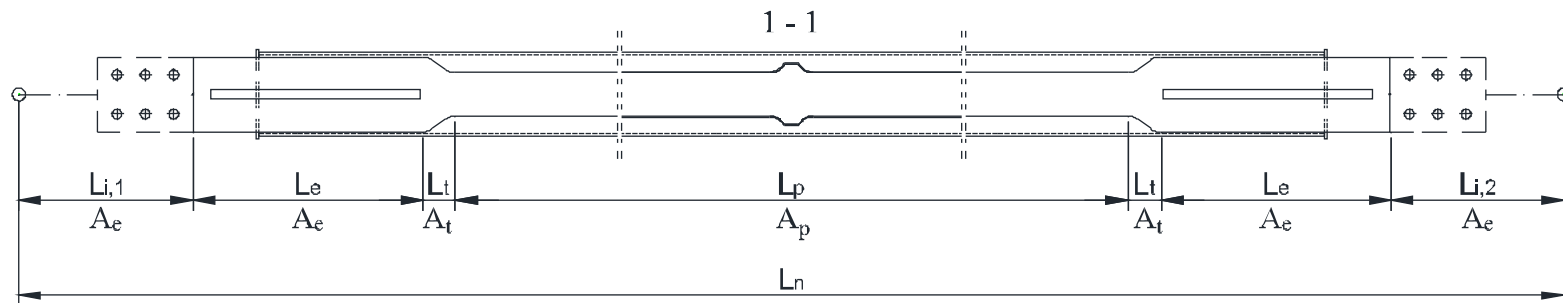
- cu pătrundere completă între guseu și cele două table de îmbinare, nefiind necesară o verificare explicită.
- similar pentru sudurile dintre guseu și stâlp/grindă.

6. Deformația axială

Deformația axială capabilă

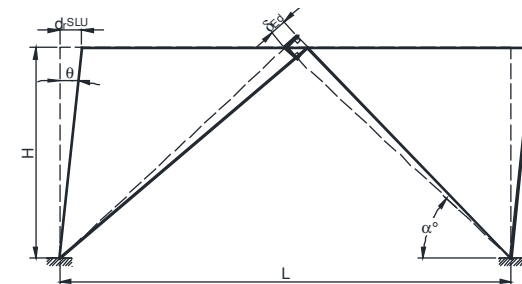
$$\delta_{Rd} = \varepsilon_{b,max} \cdot L_p$$

- deformația specifică convențională în miezul BRB-urilor precalificate, $\varepsilon_{b,max} = \pm 4\%$,
- lungimea plastică a miezului, $L_p = L_n - L_{i,1} - L_{i,2} - 2L_e - 2L_t$
(L_p , ajustabil $\Rightarrow \varepsilon_b$, K)



Verificarea cursei

$$\delta_{Ed} \leq \delta_{Rd}$$



7. Dimensionarea mecanismului de împiedicare a flambajului (BRM)

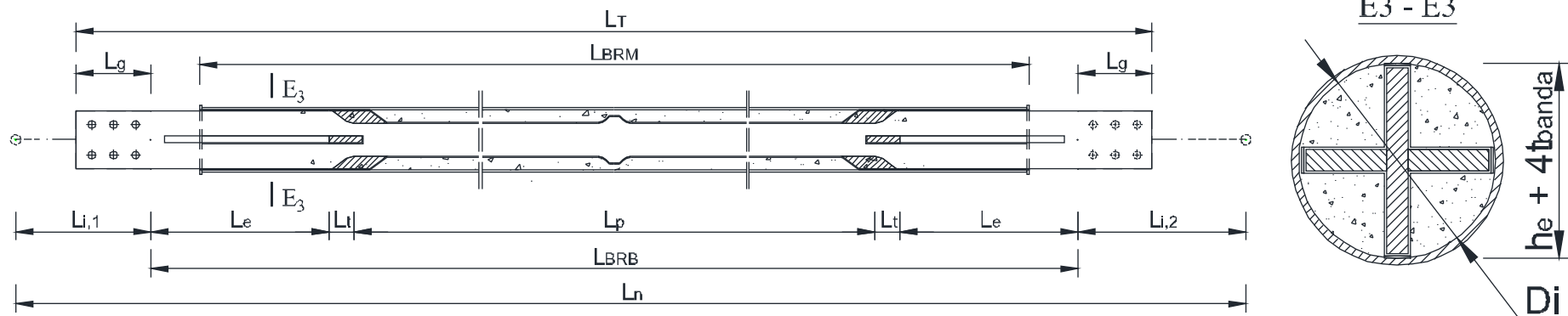
- **Proiectarea mecanismului de împiedicare a flambajului**

$$N_{cr}/N_p \geq 3,0$$

- $N_{cr} = \pi^2 \cdot E \cdot I / L_f^2$ – forța critică de flambaj a tecii de oțel, neglijându-se aportul betonului;
- $E = 210000$ MPa – modulul de elasticitate al oțelului;
- I – momentul de inerție al secțiunii transversale a tecii;
- L_f – lungimea de flambaj a BRM-ului. (Pentru IMSER, $L_f = L_{BRB}$)
- $L_{BRM} = L_p + 2 \cdot L_t + 2 \cdot L_{e,3}$ – lungimea BRM-ului

- **Verificarea diametrului interior al țevii**

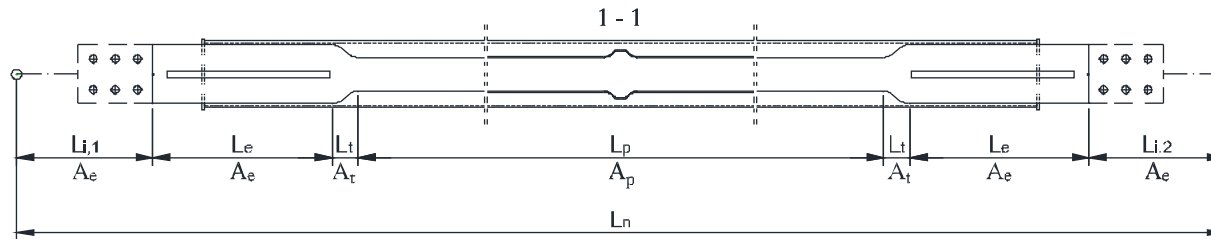
$$D_j \geq h_e + 4 \cdot t_{bandă} = h_e + 8 \text{ mm}$$



8. Rigiditatea efectivă, K_{ef}

■ Rigiditatea zonelor componente

- $K_i = E \cdot A_i / L_i$ – rigiditatea unei îmbinări ($A_i = A_e$; $L_{i,1} \neq L_{i,2}$)
- $K_e = E \cdot A_e / L_e$ – rigiditatea unei zone elastice ($L_e = L_{e1} + L_{e2} + L_{e3}$;
 $A_e = t_p(2 \cdot h_e - t_p)$)
- $K_t = E \cdot A_t / L_t$ – rigiditatea unei zone de tranziție ($A_t = t_p(h_e + h_p)/2$)
- $K_p = E \cdot A_p / L_p$ – rigiditatea zonei plastice.



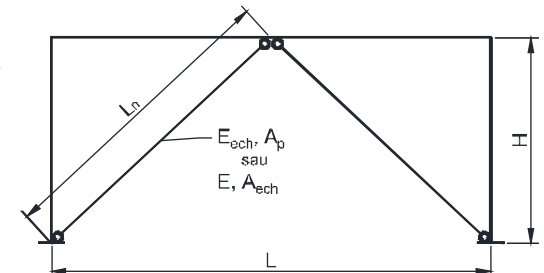
■ Rigiditatea echivalentă

$$K_{ef} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_i} + \sum \frac{1}{K_e} + \sum \frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_p}}$$

- inversa Σ flexibilității segmentelor componente

■ Factorul rigidității echivalente

$$k = K_{ech} / (E \cdot A_p / L_n)$$



Exemplu de calcul

- Caracteristicile geometrice ale structurii:

Deschiderea:

$$L = 7,50 \text{ m}$$

Înălțimea:

$$H = 3,50 \text{ m}$$

Distanța interax BRB:

$$L_n = 5,13 \text{ m}$$

Unghiul de inserare al BRB:

$$\alpha = 0,751 \text{ rad} = 43,0 \text{ deg}$$

Grinda:

HE320A

Stâlpul:

HE300B

- Coeficienți parțiali de siguranță:

$$\gamma_{M0} = 1,10; \gamma_{M1} = 1,10; \gamma_{M2} = 1,25 \text{ (conform P100-1/2013, 6.1.3.(1))}$$

- Cerința de proiectare a BRB-ului la SLU:

Deplasarea relativă de nivel de calcul:

$$d_r^{SLU} = 0,02H$$

Rezistența de calcul a BRB-ului:

$$N_{pl,Rd} = 300 \text{ kN}$$

Rezistența necesară a BRB-ului,

$$N_{p,nec} = N_{pl,Rd} \cdot \gamma_{M0} = 300 \cdot 1,1 = \mathbf{330 \text{ kN}}$$

- Materiale:

Miez BRB:

TG 14 mm, oțel S355J0, $f_{y,m} = 398 \text{ MPa}$, $f_{u,m} = 513 \text{ MPa}$, $E = 210000 \text{ MPa}$

Rigidizări miez BRB:

TG 14 mm, oțel S355J0, $f_y = 355 \text{ MPa}$, $f_u = 510 \text{ MPa}$, $E = 210000 \text{ MPa}$

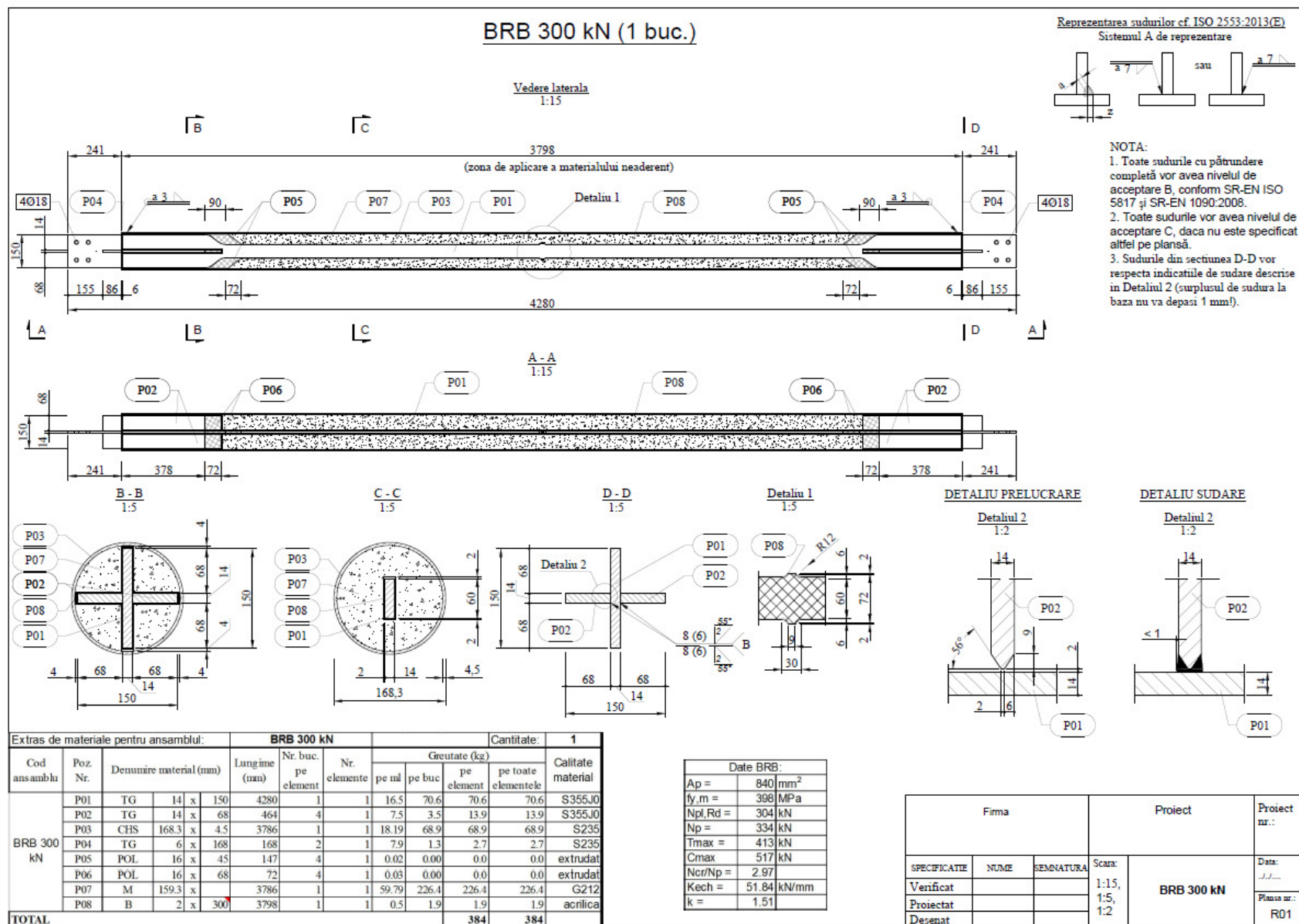
Țeavă BRM:

CHS 168,3×4,5 mm, oțel S235, $f_y = 235 \text{ MPa}$, $f_u = 360 \text{ MPa}$, $E = 210 \text{ GPa}$

Beton BRM:

C35/45, $f_{ck,cube} = 45 \text{ MPa}$, $E_{cm} = 34000 \text{ Mpa}$

Exemplu de calcul. Desenul de ansamblu



Tehnologia de realizare a BRB

Generalități

- **EN 15129: BRB - clasificat ca dispozitiv antiseismic**
- **⇒ tehnologia de fabricare mai complexă, mai strictă vs. tehnologia contravântuirilor convenționale (CVN)**
- **⇒ control mai riguros al calității, în special la realizarea miezului disipativ**
- **Etape tehnologice: ...**

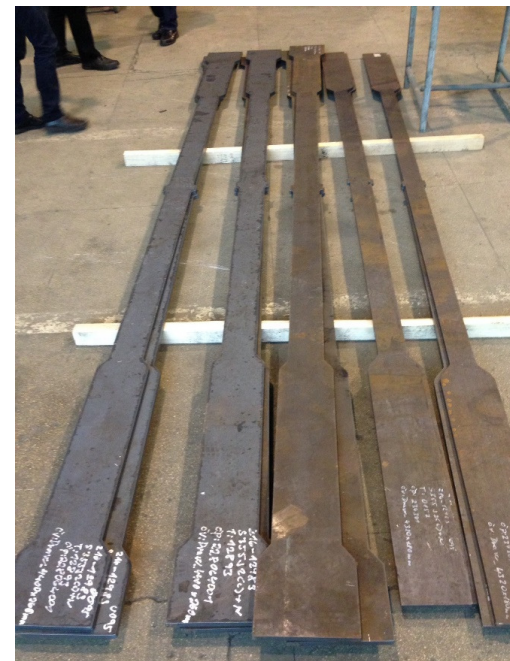
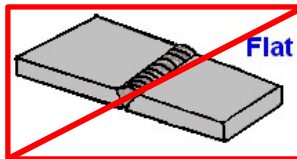
Debitarea și prelucrarea pieselor din oțel

■ Miezul:

- Debitare grosieră: tăiere cu laser, jet de apă
- Prelucrarea la cotă finită pe freză
- Suprafață netedă & neafectată termic
- → influențează performanța ciclică a BRB
- Control riguros al zonelor de racord: eventuale reduceri locale ale ariei miezului → cedări premature
- Asigurarea planeității miezului
- Continuu & || direcție laminare

■ Celelalte piese din oțel

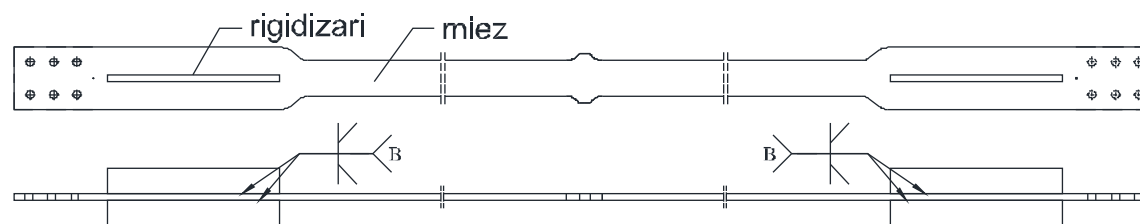
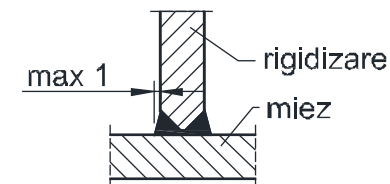
- Nu necesită prevederi speciale



Asamblarea miezului

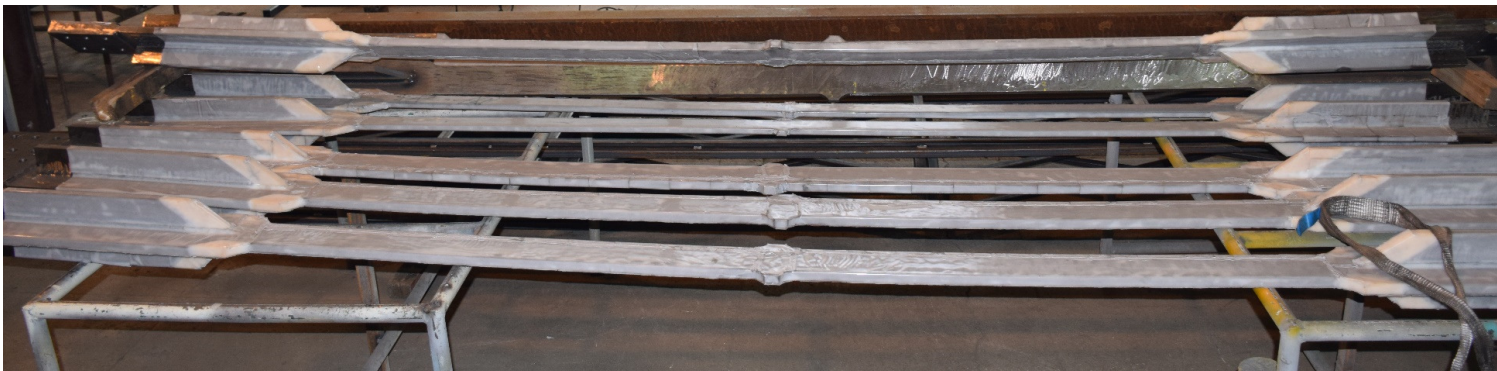
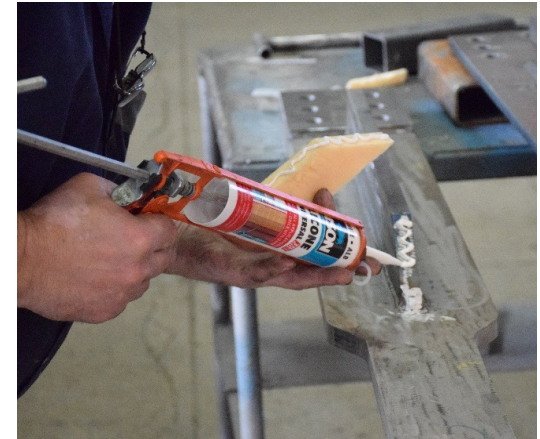
■ Sudarea rigidizărilor pe miez

- Suduri cu pătrundere completă sau parțială
- Sudura să nu fie supraînălțată cu mai mult de 1 mm
→ prevenirea strivirii betonului la compresiune
- Poziționarea în plan orizontal a rigidizărilor la sudare
- Curățarea miezului de stropii de sudură



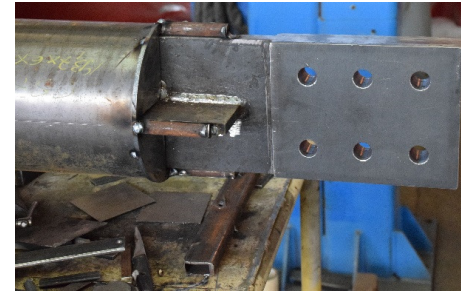
Aplicarea materialului compresibil și a stratului neaderent

- **Material compresibil:**
 - Pentru spațiul de deformare axială
 - Suficient de rigid
 - Recomandare IMSER: polistirenului extrudat
 - Fixare: silicon universal
- **Stratul neaderent**
 - Grosime: $g(\text{fen. Poisson}) < g_{\text{nec}} < g(F_{\text{frecare}} \downarrow)$
 - Recomandare IMSER: $t = 2 \text{ mm}$, bandă acrilică adezivă cu suport de ionomer



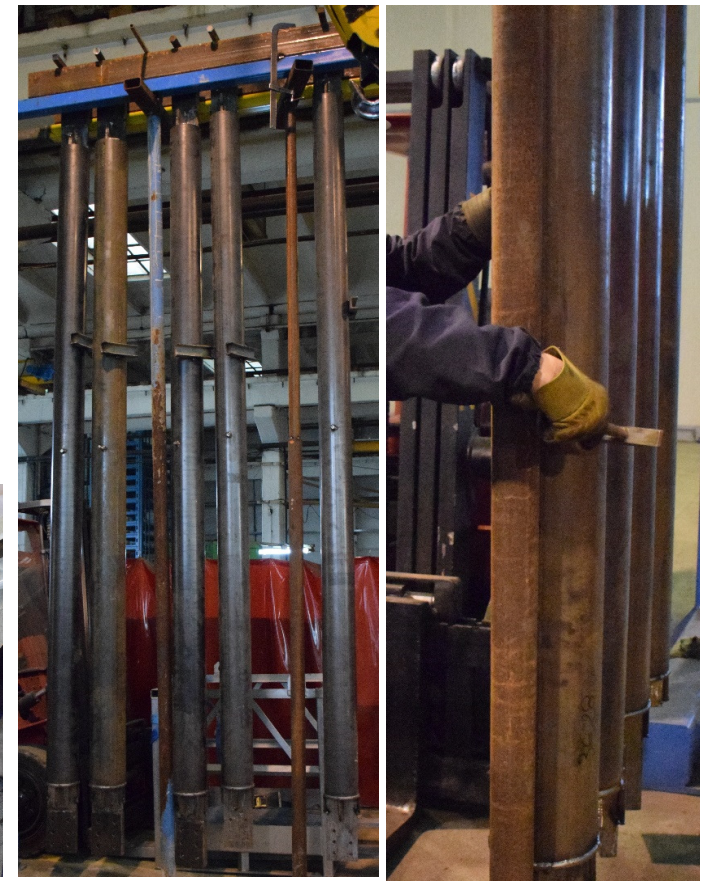
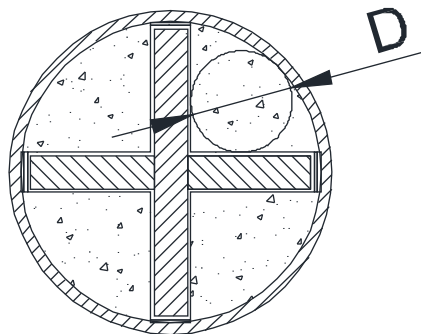
Asamblarea BRB-ului și centrarea miezului

- Centrarea miezului în teacă, la capete și mijloc
- Asigurarea rectilinității miezului este foarte importantă!
- Suspendarea verticală → pretensionare minimală
 - Se recomandă pretensionarea suplimentară.
- Împiedicarea glisării tecii față de miez → fixări temporare



Turnarea mortarului/betonului

- Beton autocompactant cu granulație fină.
- Alternativ, mortare fluide de ciment + agregate 4-8 mm.
- IMSER: mortar fluid pe baza de ciment, pregătit pentru amestecare, $R_c > 35 \text{ N/mm}^2$ la 7 zile.
- $d_{\text{max, agregat}} < D/6$
- Turnarea în poziție verticală + vibrare



Alte Procese

- **Curățarea de stropii de beton a BRB-ului**
- **Îndepărtarea elementelor temporare de suport**
- **Vopsirea suprafețelor exterioare ale BRB-ului**
- **Marcarea datelor de identificare a BRB-ului**



Analiza tehnico-economică a BRB

Procedura de evaluare tehnico-economică

- Identificarea BRB-ului + descriere succintă.
- Secțiunea A. Materiale:
 - Evaluarea materialelor utilizate + costurilor aferente
 - Evaluarea costurilor de aprovizionare
- Secțiunea B. Manoperă și utilaje:
 - Debitare: timpi & utilajele
 - Prelucrare: timpi & utilajele
 - Asamblare: miez, BRM, BRB
 - Alte operații: aplicare material neaderent, turnare beton, prelucrări finale.
 - Total manoperă: Σt
- Secțiunea C. Cost proiectare:
 - 2 h x 50 euro/h = 100 euro.
- Secțiunea D. Cost încercări BRB și încercări de material
 - Evaluate la nivel de structură / nr. total de BRB-uri
 - Minim 2 încercări/lot
- Secțiunea E. Profit:
 - Evaluarea profitului ca procent (15%) din suma costurilor (materiale + manoperă + proiectare + încercare).
- Cost total / BRB:
 - costuri (materiale + aprovizionare + manoperă + proiectare + încercare) + profitului.

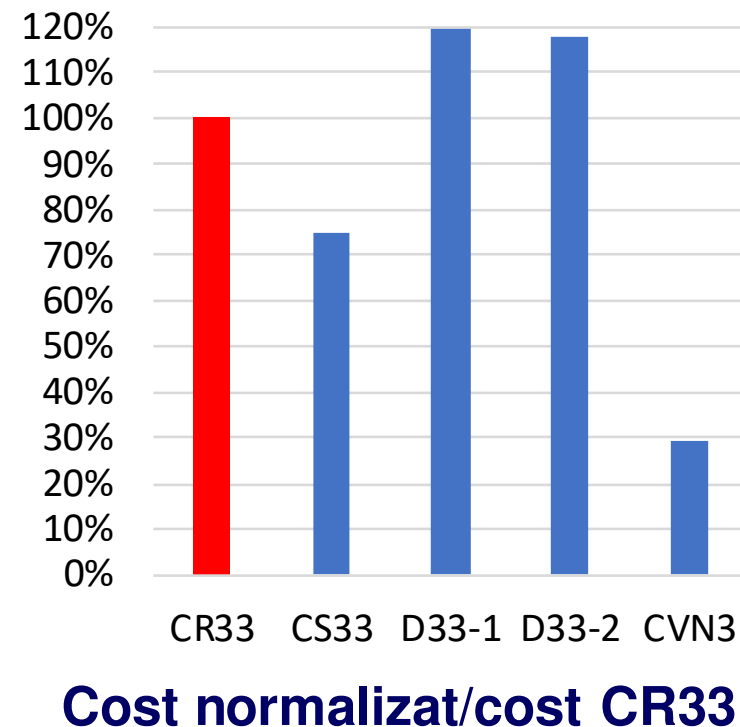
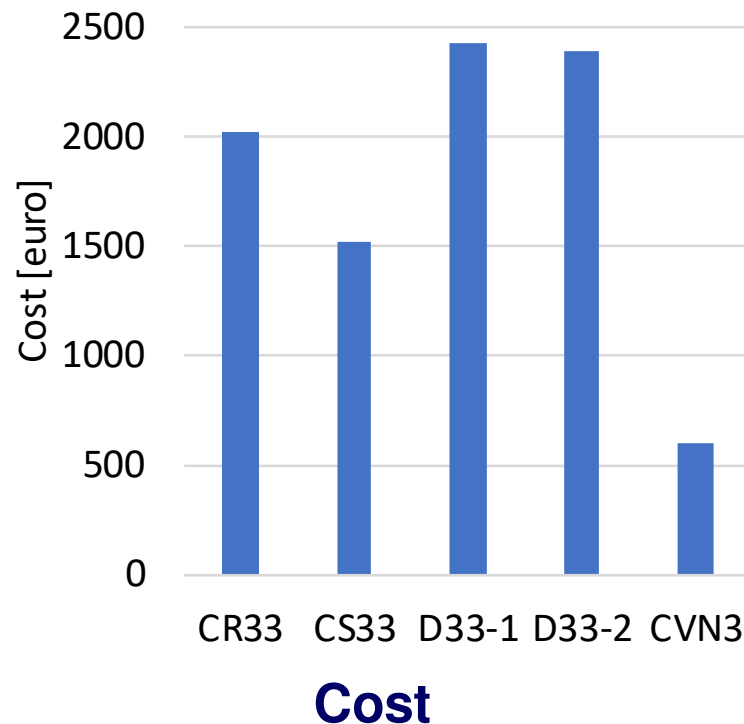
Fișă tehnico-economică: BRB ID							
Ansamblu PTH: ...							
Descriere BRB: ...							
A. Materiale							
A1. Oțel							
	Materiale	Buc./ Ans.	Specificatii material	UM	Cantitate	Total	Valoare [lei]
1	miez		S355	kg			
2	rigidizari miez		S355	kg			
3	teava		S235	m			
4	alte		...	...			
A2. Materiale de sudură							
1	Sarma / electrozi		EN ISO 16834-A	kg			
2	Amestec gaze pt. sudura			mc	10,8		
A3. Beton							
1	Mortar		SIKA G212	sac	25		
2	Sort		4. - 8. mm	kg	4kg/sac		
A4. Alte materiale							
1	Mat. Neaderent		Acrilica	rola			
2	POL 16x45x170		extrudat	m ²			
3	POL 16x68x197		extrudat	m ²			
4	Silicon			tub			
5	Grund			kg			
6	Vopsea			kg			
7	Mat. Consumabile		set	buc			5% xval.mat
Total materiale							
Cheltuieli de aprovizionare		7%					
B. Manopera							
Nr.	Operatia	Cantitate	Masina	SDV	Obs.	Temp / ans. (ore)	Valoare [lei]
B1. Debitare							
1	Debitare miez	1	plasma				
2	Debitare rigidizari	1	laser				
3	Debitare teava	4	ferastrau				
4	Alte ...	2	...				
B2. Prelucrari							
1	Frezare miez						
2	Frezare rigidizari						
3	Gaurire Ø 18						
4	Gaurire P53 (centrare miez cu PCM)						
B3. Asamblari							
1	Asamblare miez: miez+rigidizari		disp. montat & sudat				
2	Positionare polistiren:						
3	Asamblare BRM: teava, capace, PCM						
4	Asamblare BRB		dispozitiv de montat				
B4. Aplicare material neaderent							
1	Aplicare material neaderent						
B5. Turnare beton							
1	Turnare beton		dispozitiv de turnare				
B6. Operatii finale							
1	Curatare						
2	Pregatire finala						
3	Vopsire BRM						
Total manopera		...	lei/ora			total m	...
C.1 Cost proiectare BRB		...	lei/ora			2,00	...
D.1 a) Cost încercare / 3 BRB		...	lei	b) Cost fabrica	...	lei	Ci + Cf =
E.1 Profit		15%					...
COST TOTAL / BRB				...	lei	...	euro

Analiza performanței tehnico-economice

- **Evaluarea soluțiilor BRB:**
 - pe baza graficelor de cost
 - parametrii analizații a fost costul total și costul normalizat la kN.
- **Evaluarea BRB-urilor vs. contravântuirile convenționale:**
 - 300 kN (CVN3)
 - 700 kN (CVN7)

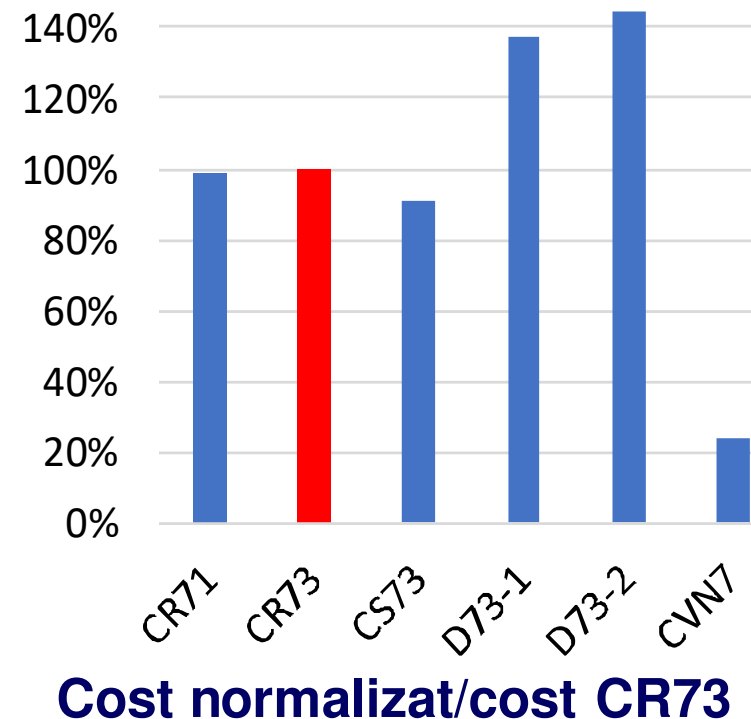
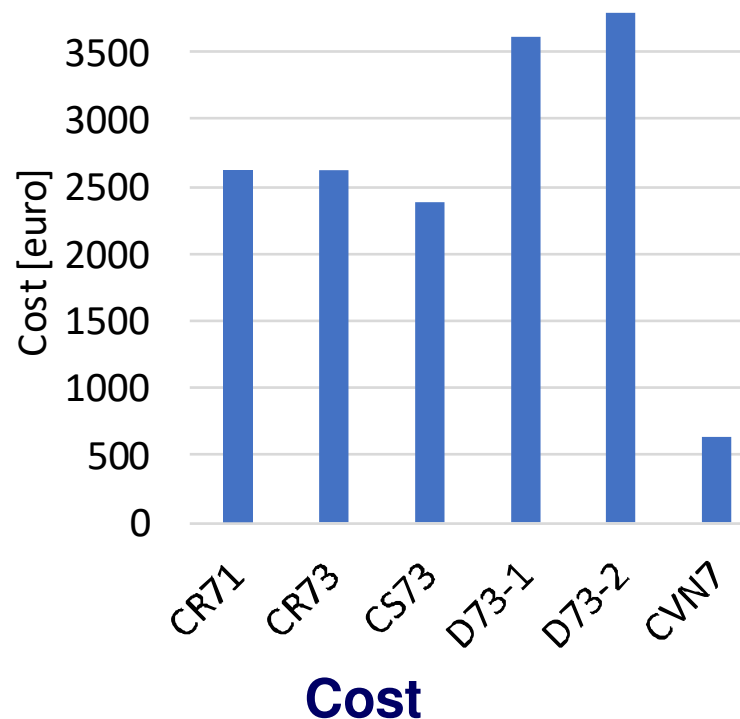
Soluțiile BRB de 300 kN

- Cost mediu: 2000 euro (CR33, 2020 euro)
- CS33 cost - 25% / CR33 ← tehnologie miez; limitare N_p
- D33 cost + 20% / CR33 ← tehnologie BRM
- CVN3 cost - 70% / CR33 ← tehnologie CV



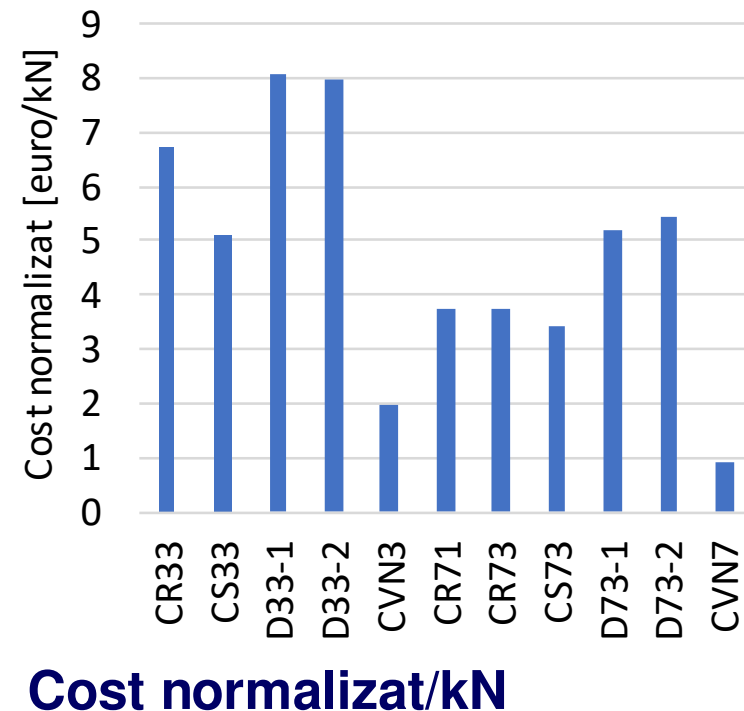
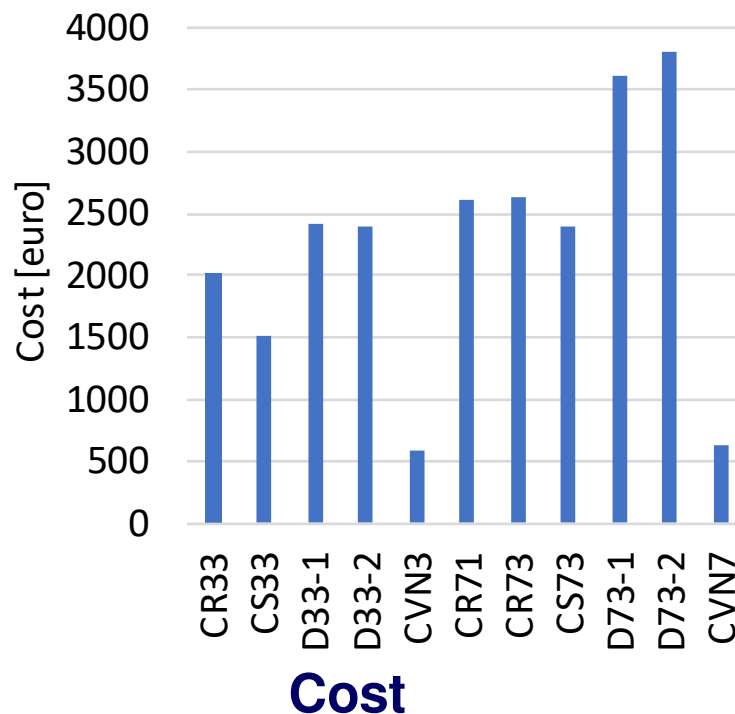
Soluțiile BRB de 700 kN

- Cost mediu: 2600 euro (CR73, 2629 euro)
- CS73 cost - 9% / CR73 ← tehnologie miez ; limitare N_p
- D73 cost + 44% / CR73 ← tehnologie BRM
- CVN7 cost - 76% / CR73 ← tehnologie CV



Soluțiile BRB

- Soluția cea mai economică: CS; ne-economică: D
- Cost BRB mai mare de 2,5 ... 6,5 ori / cost CVN3 & CVN7
- Cost normalizat, BRBs: 3,4 @ CS73 ÷ 8,1 @ D33-1
- Cost normalizat, toate: 1,0 @ CVN7 ÷ >8 @ D33-1
- Fezabilitate: CS @ capacități mici; CR capacități mari; ~~D~~



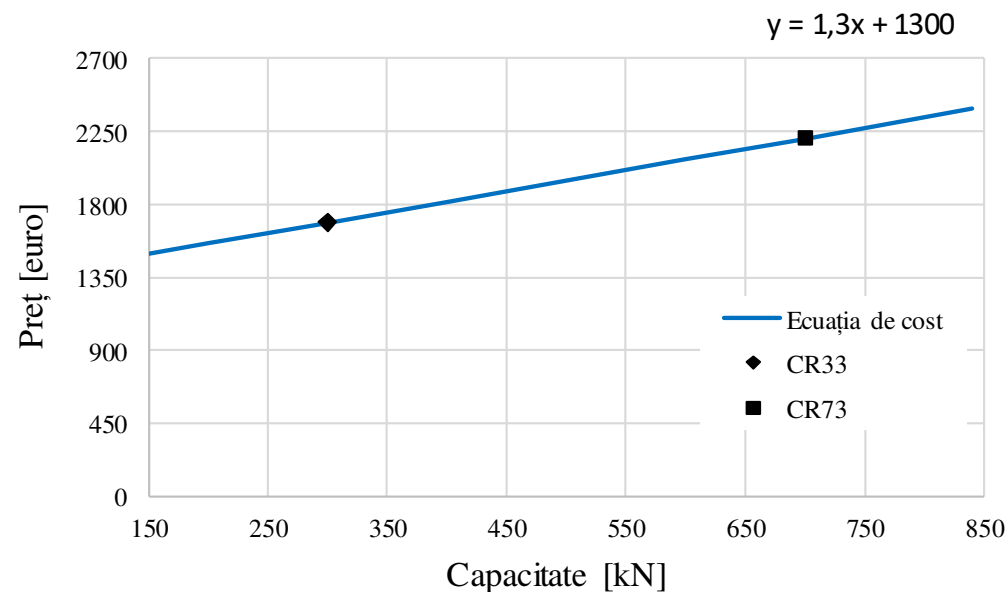
Centralizator

- **Timp de fabricare efectiv:**
CS eficientă ← tehnologia miez & BRM mai simplă
- **Timpului de fabricare total:**
D este cea mai eficientă (50%)
- **CVN3&7, timpii de fabricare semnificativ mai mici**

BRB ID	Cost [euro]	Timp de fabricare		Observații
		Efectiv	Total	
CR33	2020	46.08	166.08	întărire mortar, 5 zile = 120 h
CR71	2613	57.99	177.99	întărire mortar, 5 zile = 120 h
CR73	2629	58.65	178.65	întărire mortar, 5 zile = 120 h
CS33	1520	29.74	149.74	întărire mortar, 5 zile = 120 h
CS73	2390	49.09	169.09	întărire mortar, 5 zile = 120 h
D33-1	2422	56.15	104.15	uscare mat. neaderent, 1 zile = 24 h; întărire mortar, 1 zile = 24 h
D33-2	2386	54.90	102.90	uscare mat. neaderent, 1 zile = 24 h; întărire mortar, 1 zile = 24 h
D73-1	3614	87.20	111.20	uscare mat. neaderent, 1 zile = 24 h
D73-2	3798	89.70	89.70	-
CVN3	591	13.50	13.50	-
CVN7	643	15.85	15.85	-

Estimarea costului

- IMSEER: cost de producție de tip pilot:
2020euro (CR33) și 2629 euro (CR73)
- Cost de producție de serie, estimat -15%
(simplificarea tehnologiei)
- Ecuația de estimare a costului BRB-urilor
 - pe baza costurilor reduse: CR33 1717 euro; CR73 2235 euro
 - **$\text{cost [euro]} = 1,3 \times (N_{pl} \text{ [kN]}) + 1300$**



Concluzii

- **Economic: soluția „convențională” cu miez pătrat**
- **Tehnologic:**
 - Timp efectiv: soluția „convențională” cu miez pătrat
 - Timp total: soluția „uscată”
- **Tehnico-economic: soluția „convențională” cu miez pătrat**
- **Dezavantaj CS: limitarea N_p la tipodimensiunile profilelor**
- **⇒ Soluția optimă: BRB „convențional” cu miez dreptunghiular, obținut prin prelucrare mecanică!!!**