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

Cod proiect: PN-II-PT-PCCA-2013-4-2091
Contractul de finanțare nr. 99 / 2014

Raport tehnic și științific etapa 4 / 2017
Elaborarea ghidurilor de proiectare

Rezumat

Raportul tehnic și științific a sintetizat activitățile desfășurate în cadrul etapei 4 / 2017 a proiectului "Implementarea în practica de proiectare anti-seismică din România a contravântuirilor cu flambaj împiedicat (IMSER)". Obiectivele asumate în planul de realizare au fost atinse. A fost elaborat un ghid de proiectare pentru dispozitivele BRB precalificate (activitatea 4.1). Ghidul de proiectare conține limitele de aplicare ale recomandărilor de proiectare, procedura de calcul a BRB-ului (teorie și exemplu de calcul), tehnologia de realizare și procedura de calificare experimentală a BRB-urilor. A fost elaborat și un ghid de proiectare conținând exemple de calcul pentru cadre din oțel cu BRB (activitatea 4.2). Eficiența tehnică și economică a cadrelor din oțel cu BRB a fost evaluată comparativ cu eficiența altor sisteme structurale din oțel în cadrul activității 4.3. În cadrul activității 4.4 de coordonare, administrare, raportare și publicare a rezultatelor, rezultatele obținute au fost diseminate în cadrul unor conferințe internaționale (EUROSTEEL) și naționale (2CNISS) și prin participarea la grupurile de lucru ECCS TC 13 și CEN SC8. În cadrul activităților 4.5 și 4.6 au fost organizate seminarii la Timișoara și București pentru diseminarea rezultatelor obținute inginerilor proiectanți. Au fost organizate câteva întruniri de lucru în vederea elaborării procedurilor de proiectare, de fabricare și de evaluare a performanței tehnico-economice a BRB-urilor, dar și a cadrelor contravântuite cu BRB-uri (activitatea 4.7).

Cuprins

1	INTRODUCERE	4
2	SINTEZA ACTIVITĂȚILOR	4
2.1	DISPOZITIVE BRB PRECALIFICATE ȘI GHID DE PROIECTARE (ACT. 4.1)	4
2.1.1	<i>Dispozitive BRB precalificate</i>	4
2.1.2	<i>Ghid de proiectare BRB</i>	6
2.1.3	<i>Tehnologia realizării BRB-urilor.....</i>	7
2.1.4	<i>Procedura de calificare experimentală.....</i>	9
2.1.5	<i>Exemplu de calcul</i>	9
2.2	GHID DE PROIECTARE ȘI EXEMPLE DE CALCUL PENTRU CADRE DIN OȚEL CU BRB (ACT. 4.2).....	10
2.2.1	<i>Sisteme structurale.....</i>	10
2.2.2	<i>Procedura de proiectare.....</i>	10
2.2.3	<i>Calculul structural</i>	11
2.2.4	<i>Dimensionarea componentelor structurale.....</i>	12
2.2.5	<i>Particularități ale procesului de proiectare</i>	13
2.2.6	<i>Proiectarea cadrelor BRB duale.....</i>	14
2.2.7	<i>Exemplu de calcul I. Structură contravântuită cu BRB-uri.....</i>	14
2.2.8	<i>Exemplu de calcul II. Structură duală contravântuită cu BRB-uri.....</i>	16
2.3	EVALUAREA EFICIENȚEI TEHNICE ȘI ECONOMICE A CADRELOR DIN OȚEL CU BRB (ACT. 4.3).....	17
2.4	COORDONARE, ADMINISTRARE, RAPORTARE, PUBLICAREA REZULTATELOR (ACT. 4.4)	19
2.5	ORGANIZAREA UNUI SEMINAR LA TIMIȘOARA (ACT. 4.5).....	19
2.6	ORGANIZAREA UNUI SEMINAR LA BUCUREȘTI (ACT. 4.6)	20
2.7	ÎNTÂLNIRI DE LUCRU PENTRU ELABORAREA GHIDURILOR DE PROIECTARE (ACT. 4.7)	20
3	CONCLUZII	20

1 Introducere

În cadrul etapei 4 / 2017 a proiectului "Implementarea în practica de proiectare anti-seismică din România a contravânturilor cu flambaj împiedicat (IMSER)" au fost prevăzute următoarele activități:

- Act. 4.1 Dispozitive BRB precalificate și ghid de proiectare
- Act. 4.2 Ghid de proiectare și exemple de calcul pentru cadre din oțel cu BRB
- Act. 4.3 Evaluarea eficienței tehnice și economice a cadrelor din oțel cu BRB
- Act. 4.4 Coordonare, administrare, raportare, publicarea rezultatelor
- Act. 4.5 Organizarea unui seminar la Timișoara
- Act. 4.6 Organizarea unui seminar la București
- Act. 4.7 Întâlniri de lucru pentru elaborarea ghidurilor de proiectare

În cele ce urmează se prezintă sintetic activitățile desfășurate și rezultatele obținute.

2 Sinteza activităților

2.1 Dispozitive BRB precalificate și ghid de proiectare (Act. 4.1)

În cadrul acestei etape au fost selectate BRB-urile precalificate pe baza unor criterii de performanță. Pentru acestea a fost întocmit un ghid de proiectare atât la nivel de calcul, cât și la nivel tehnologic. În continuare se prezintă cele două aspecte mai sus menționate.

2.1.1 Dispozitive BRB precalificate

În cadrul proiectului IMSER au fost studiate atât BRB-uri "convenționale", cât și "uscate". Analiza performanței tehnico-economice a celor două soluții a relevat faptul că soluția "uscată", spre deosebire de cea "convențională", nu a atins momentan maturitatea pentru adoptarea în practică. De aceea, recomandările de proiectare tratează doar BRB-urile "convenționale".

Din punct de vedere conceptual, dispozitivele BRB încercate experimental au fost catalogate astfel:

- CRx3 – soluția BRB „convențional” cu miez obținut prin prelucrare mecanică cu freza, la care raportul dintre forța critică de flambaj a tecii, N_{cr} , și rezistența plastică a miezului, N_p , a fost $N_{cr}/N_p = 3$.
- CRx1 – soluția BRB „convențional” cu miez obținut prin prelucrare mecanică cu freza, la care raportul dintre forța critică de flambaj a tecii, N_{cr} , și rezistența plastică a miezului, N_p , a fost $N_{cr}/N_p = 1,5$.
- CSx3 – soluția BRB „convențional” cu miez realizat dintr-un profil laminat (oțel pătrat) pe care au fost sudate rigidizări, la care raportul dintre forța critică de flambaj a tecii, N_{cr} , și rezistența plastică a miezului, N_p , a fost $N_{cr}/N_p = 3$.
- D33 – soluția BRB „uscat” cu miez obținut prin prelucrare mecanică cu freza, de capacitate $N_p = 300$ kN, la care raportul dintre forța critică de flambaj a tecii, N_{cr} , și rezistența plastică a miezului, N_p , a fost $N_{cr}/N_p = 3$, având sistemul de împiedicare a flambajului alcătuit dintr-o soluție mixtă oțel-beton.
- D73 – soluția BRB „uscat” cu miez obținut prin prelucrare mecanică cu freza, de capacitate $N_p = 700$ kN, la care raportul dintre forța critică de flambaj a tecii, N_{cr} , și rezistența plastică a miezului, N_p , a fost $N_{cr}/N_p = 3$, având sistemul de împiedicare a flambajului alcătuit integral din oțel.

Calificarea dispozitivelor BRB a avut în vedere satisfacerea mai multor criterii, iar îndeplinirea acestora este prezentată în Tabelul 1:

- *Ajustarea rezistenței plastice a miezului* pe baza limitei de curgere determinată experimental, $f_{y,m}$, oferind astfel proiectantului posibilitatea optimizării dispozitivului BRB și, implicit, a structurii în care este utilizat acesta. Conform acestui criteriu, din cele 5 soluții încercate doar soluția CSx3 nu îndeplinește acest criteriu, datorită limitărilor tipodimensionale ale profilelor existente pe piața construcțiilor.

- *Performanța ciclică* determinată experimental. Soluțiile CRx3 și D73 au avut un procentaj de calificare de 100 % al specimenelor de acest tip. Celelalte soluții au avut procentaje de calificare a specimenelor de 50% CRx1, 75% CSx3 și 0% D33. S-au remarcat speciemenele CR73-1 și CR73-2 (de 700 kN) cu o rezistență oligo-ciclică ridicată (26 cicluri până la cedare).
- *Tehnologia* realizării BRB-urilor a fost analizată din perspectiva simplității execuției și al insensibilității soluției BRB la abaterile de execuție. Conform acestui criteriu, doar soluțiile „convenționale” cu miez frezat s-au calificat. Soluția CSx3 s-a dovedit a fi sensibilă la axarea elementelor componente ale miezului (profil + rigidizări), constatându-se pentru specimenul CS73 o deplanare considerabilă a subansamblului miezului. Soluțiile „uscate” D33 și D73 s-au dovedit a avea o tehnologie complexă și timp efectiv de execuție ridicat, dar, mai ales, cu abateri de execuție ridicate.
- *Economic*. Acest aspect a avut în vedere analiza costului de producție al soluțiilor. S-au remarcat negativ soluțiile „uscate”, D33 și D73, având costuri considerabil mai ridicate decât soluțiile „convenționale”.

Pe baza rezultatelor sintetizate în Tabelul 1, s-a concluzionat faptul că soluția BRB optimă pentru precalificare este BRB-ul „convențional” cu miez frezat, cu raportul $N_{cr}/N_p = 3$.

Tabelul 1. Catalogarea conceptelor BRB.

Soluția BRB	Tip	Miez	Formă	Ajustare N_p	Performanță	Tehnologie	Economic
CRx3	conv.	frezat	PL	DA	DA	DA	DA
CRx1	conv.	frezat	PL	DA	NU	DA	DA
CSx3	conv.	laminat+rigidizări	OP	NU	NU	NU	DA
D33	mixt	frezat	PL	DA	NU	NU	NU
D73	uscat	frezat	PL	DA	DA	NU	NU

Elaborarea ghidul de proiectare pentru dispozitivele BRB precalificate (UPT, HMS) a avut la bază rezultatele experimentale obținute pe speciemenele CRx3 care au avut capacități nominale de 300 kN, CR33, respectiv 700 kN, CR73. Principalele rezultate experimentale obținute pentru cele patru speciemenes sunt prezentate în Tabelul 2. Pe baza acestora, au fost determinate valorile recomandate a fi utilizate în cadrul proiectării unor noi BRB-uri pentru o serie de factori ce descriu comportarea specimenelor calificate.

Tabelul 2. Rezultate experimentale obținute pentru soluțiile precalificate

	@ $2\Delta_{bm}$				@ cedare			
BRB	β	ω	ε_c	CID/Δ_{by}	β	ω	ε_c	CID/Δ_{by}
CR33-1	1.23	1.35	4.05	≥ 200	1.38	1.39	4.53	≥ 200
CR33-2	1.22	1.37	4.04	≥ 200	1.49	1.40	5.06	≥ 200
CR73-1	1.17	1.40	4.16	≥ 200	1.30	1.45	5.19	≥ 200
CR73-2	1.18	1.44	4.17	≥ 200	1.31	1.48	5.20	≥ 200

unde:
 $2\Delta_{bm}$ este cerința maximă de deformație a BRB-ului exprimată în funcție de deplasarea relativă de nivel de proiectare a cadrului contravântuit cu BRB-uri, Δ_{bm} ;
 Δ_{by} este deformația BRB-ului la intrarea în curgere;
 ω și β sunt factori de suprazisteță;
 ε_c este deformația specifică a miezului BRB-ului, raportată la zona plastică, L_p .
CID este deformația inelastică cumulativă.

Tabelul 3. Valori recomandate în proiectarea BRB-urilor

ω	β	$\varepsilon_{c,max}$
1.45	1.17	4.0%

2.1.2 Ghid de proiectare BRB

Ghidul de proiectare al BRB-ului conține baza normativă utilizată, limitele de aplicare, procedura de calcul, tehnologia de realizare, procedura de calificare experimentală și, în final, un exemplu de calcul pentru un BRB de 330 kN.

În continuarea se prezintă principalele aspecte ale acestor etape.

Bază normativă pentru proiectarea BRB-urilor o constituie prevederile din codul P100-1/2013, alături de prevederile din standardul SR EN 15129 care vizează controlul calității producției. Protocolul de încărcare pentru încercările experimentale a fost cel prevăzut în codul american ANSI/AISC 341-16.

Aceste recomandări au fost elaborate pe baza rezultatelor obținute în urma încercărilor experimentale efectuate în cadrul proiectului IMSER. Limitările de mai jos (vezi Tabelul 4) au rezultat din dimensiunile și materialele folosite la fabricarea specimenelor BRB pre-calificate. Folosirea altor materiale, geometrii, procese tehnologice sau proceduri de calcul necesită un program de calificare experimentală conform cerințelor P100-1/2013 și SR EN 15129.

Tabelul 4. Limite de aplicare a precalificării BRB-urilor.

Limite de aplicare	Observații
Forța capabilă a BRB-ului ($N_p = A_p \cdot f_{y,m}$) $150 \text{ kN} \leq N_p \leq 840 \text{ kN}$	BRB-urile precalificate experimental au avut rezistența nominală de 300 și 700 kN. Interval de aplicare a calificării experimentale (AISC 341-16): $0,5 \cdot 300 \text{ kN} = 150 \text{ kN} \leq N_p \leq 1,2 \cdot 700 \text{ kN} = 840 \text{ kN}$.
Marcă oțel miez BRB S235, S275, S355	Oțelul utilizat la fabricarea miezului BRB-ului trebuie să satisfacă cerințele de ductilitate din paragraful 6.2.(1)-(2) și cele referitoare la energia de rupere din Tabelul 6.2 din P100-1/2013.
Raportul h_p/t_p al miezului BRB $4,0 \leq h_p/t_p \leq 5,0$.	Rapoarte h_p/t_p încercate experimental: BRB 300 kN: $60/14 = 4,3$; BRB 700 kN: $99/20 = 5$.
Deformația specifică maximă a miezului BRB $\varepsilon_{b,max} \leq \pm 4\%$.	Se limitează valoarea deformației axiale a miezului BRB-ului, ε_b , la valoarea validată experimental ($\varepsilon_{b,max} = 4\%$), care corespunde dublului deplasării relative de nivel de proiectare la SLU ($2 \cdot d_r^{SLU}$). Valoarea ε_b este raportată la lungimea plastică a BRB-ului, L_p .
Clasă mortar/beton: minim C 35/45	Clasa minimă a mortarului/betonului se bazează pe materialul folosit la încercările de precalificare.

Procedura de calcul constă în îndeplinirea unor cerințe de proiectare furnizate de proiectantul de structură către fabricantul de BRB-uri. Aceste cerințe de proiectare ale BRB-ului sunt:

- rezistența necesară a BRB-ului, $N_{p,nec}$;
- deplasarea relativă de nivel de proiectare, d_r^{SLU} .
- rigiditatea necesară a BRB-ului, $K_{ef,nec}$.

Pe baza acestora, fabricantul de BRB-uri va urma procedura de proiectare descrisă în ghid și va furniza proiectatului un BRB care să respecte cerințele de proiectare. În vederea optimizării structurii, pot exista iterații atât în proiectarea structurii, cât și a dispozitivelor BRB.

Fabricantul va parcurge următoarele etape:

Datele inițiale includ o serie de parametri ce descriu cadrul contravântuit cu BRB și cerințele de proiectare.

Spațiul de deformare axială, $g = 0,7 \cdot \delta_{Ed}$, se determină pe baza cursei necesare, $\delta_{Ed} = 2d_r^{SLU} \cdot \cos \alpha$, pe care trebuie să o dezvolte BRB-ul pentru a satisface cerința deplasării relative de nivel de proiectare.

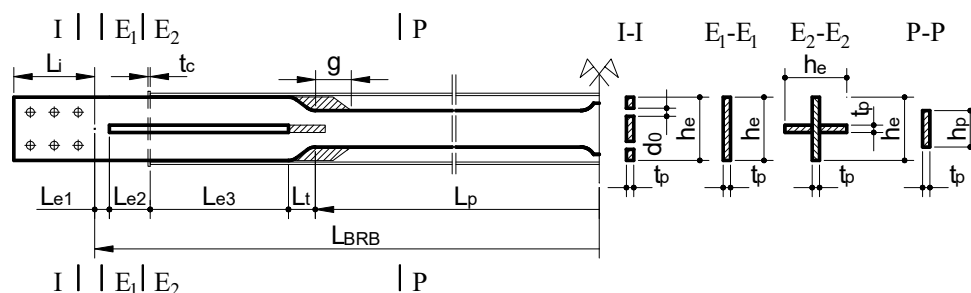


Figura 1. Geometria BRB-ului.

Proiectarea zonei plastice. Se determină aria necesară a secțiunii transversale a miezului, A_p , știindu-se limita de curgere determinată experimental a oțelului din care este alcătuit miezul. Se verifică raportul dintre înălțimea și grosimea miezului, h_p/t_p , după care se verifică zveltețea relativă a miezului pe porțiunea neîmpiedicată ($\bar{\lambda}_p \leq 0,2$). Știindu-se A_p , se determină rezistența nominală, N_p , și capacitățile corectate la întindere, T_{max} , și la compresiune, C_{max} . În final, se determină geometria opritorului din zona centrală a miezului.

Proiectarea zonei elastice. Aceasta este alcătuită din trei segmente, L_{e1} , L_{e2} , L_{e3} . Se determină aria necesară a secțiunii transversale a miezului pe tronsonul L_{e1} , notată A_{e1} , și, implicit, a rezistenței de calcul, $N_{c,e1,Rd}$, după care se verifică relația $C_{max}/N_{c,e1,Rd} \leq 1,0$. Pe considerente geometrice se determină aria (geometria) secțiunii cruciforme a miezului pe tronsonul L_{e2} , după care se verifică clasa de secțiune a acesteia ($c/t \leq 14 \cdot \varepsilon$, clasă 3). Pentru a preîntâmpina flambajul zonei elastice, se limitează zveltețea relativă, $\bar{\lambda}_e \leq 0,2$, a acestei zone.

Proiectarea zonei de tranziție constă în determinarea geometriei, lungimea L_t , și raza de racord, R_t .

Proiectarea îmbinării constă în proiectarea zonei de îmbinare a miezului și în proiectarea guseului prin care se face inserarea BRB-ului în structură. Îmbinarea este cu șuruburi de înaltă rezistență și se încadrează în categoria A conform SR EN 1993-1-8, Tabelul 3.2, iar verificările sunt conform prevederilor din standard.

Deformația axială a miezului BRB-ului, δ_{Ed} , se limitează la valoarea capabilă, δ_{Rd} , $\delta_{Ed} \leq \delta_{Rd}$. Deformația capabilă a BRB-ului, $\delta_{Rd} = \varepsilon_{b,max} \cdot L_p$, se determină pe baza deformației specifice maxime a miezului calificată experimental, $\varepsilon_{b,max} = \pm 4\%$. Lungimea zonei plastice, L_p , rezultă din geometria miezului și a îmbinărilor.

Proiectarea mecanismului de împiedicare a flambajului (BRM) se face impunând ca raportul dintre forța critică de flambaj a BRM-ului, N_{cr} , și rezistența plastică a BRB-ului, N_p , să fie $N_{cr} / N_p \geq 3,0$. Se consideră doar contribuția secțiunii de oțel în calculul rigidității. Lungimea de flambaj a BRM-ului s-a considerat (pentru IMSER) $L_f = L_{BRB}$. Suplimentar, se verifică diametrului interior al țevii să fie mai mare decât înălțimea secțiunii elastice, la care se adaugă 8 mm (4 grosimi de strat neaderent).

Rigiditatea efectivă a miezului BRB-ului, K_{ef} , se determină ca inversa sumei flexibilității segmentelor componente (rigiditatea echivalentă a unor resoarte dispuse în serie). Factorul rigidității echivalente, k , necesar calculului elastic, se determină ca raportul dintre rigiditatea efectivă și rigiditatea segmentului de secțiune constantă, A_p , și lungime interax, L_n , $k = K_{ech} / (E \cdot A_p / L_n)$ (E – modul de elasticitate al oțelului).

2.1.3 Tehnologia realizării BRB-urilor

Datorită faptului ca BRB-urile sunt clasificate ca dispozitive antiseismice conform EN 15129, tehnologia de fabricare a acestora este mai complexă și mai strictă decât tehnologia realizării unor contravântuiri convenționale. Acest lucru implică un control mai riguros al calității, în special la realizarea miezului disipativ. Principalele etape și specificațiile corespunzătoare sunt prezentate mai jos:

- Debitarea și prelucrarea pieselor din oțel constă în prelucrarea la cotă a pozițiilor din proiectul de execuție. Se acordă o atenție deosebită debitării și prelucrării miezului.
- Asamblarea miezului constă în sudarea rigidizărilor pe miez și curățarea acestuia.
- Aplicarea materialului compresibil (polistiren extrudat fixat cu silicon de miez) și a stratului neaderent (bandă autoadezivă de 2 mm grosime).
- Asamblarea BRB-ului și centrarea miezului constă în introducerea și poziționarea conform proiectului a miezului în teacă. Se recomandă pretensionarea miezului pentru axare.
- Turnarea mortarului/betonului se realizează în poziție verticală, asigurându-se o vibrație manuală prin aplicarea de lovituri de ciocan pentru umplerea intimă a spațiilor.
- Alte procese, constau în curățarea finală, vopsire, aplicare elemente de identificare.



Figura 2. Etapele tehnologice de realizare a BRB-ului

2.1.4 Procedura de calificare experimentală

Calificarea experimentală a BRB-urilor în România are ca bază normativă codul antiseismic P100-1/2013, și standardul SR EN 15129. Pentru evaluarea performanței ciclice se pot utiliza prevederile din P100-1/2013 și codul american ANSI/AISC 341-16. Pentru a fi capabile să dezvolte deformațiile produse sub acțiunea seismică de calcul, BRB-urile trebuie proiectate, executate și încercate experimental la un nivel al deformațiilor ce corespunde dublului deplasării relative de nivel de calcul la starea limită ultimă, SLU, dar nu mai puțin de 2% din înălțimea de etaj (P100-1/2013). Această prevedere are la bază gradul mare de incertitudine al acțiunii seismice. BRB-ul trebuie să se comporte stabil, cvasi-simetric și să posede o capacitate ridicată de disipare a energiei.

BRB-urile pot fi considerate calificate experimental dacă până la încheiere protocolului de încercare:

- speciemenul demonstrează o comportare ciclică stabilă;
- nu are loc ruperea miezului, flambajul global al BRB-ului, sau cedarea îmbinărilor;
- pentru toate ciclurile la deformații mai mari de Δ_{by} forțele maxime de întindere și cele de compresiune trebuie să fie mai mari decât rezistența la curgere a BRB-ului, N_p ;
- pentru toate ciclurile la deformații mai mari de Δ_{by} raportul dintre forța maximă de compresiune și cea de întindere trebuie să fie mai mică decât 1,3.

2.1.5 Exemple de calcul

Urmând etapele de proiectare descrise mai sus, a fost proiectat un BRB având rezistența plastică a secțiunii la efort axial este $N_p = 334 \text{ kN}$, și capabil să dezvolte deformații de $\pm 102 \text{ mm}$, corespunzătoare unei deplasări relative de nivel de 2%. Geometria cadrului contravântuit este: înălțime $H = 3,5 \text{ m}$, deschidere $L = 7,5 \text{ m}$, dispunerea BRB-urilor în V inversat. În Figura 3 se prezintă desenul de ansamblu pentru BRB-ul proiectat.

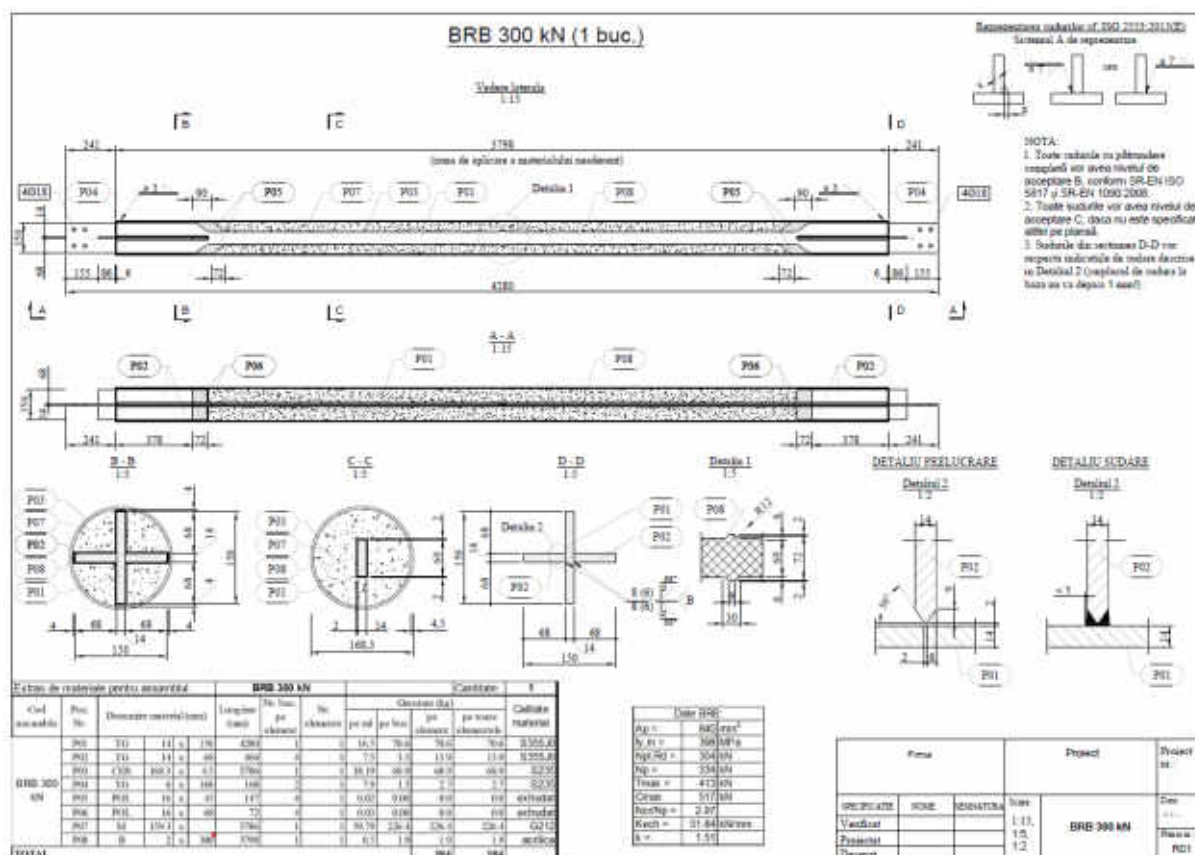


Figura 3. Desenul de ansamblu pentru BRB-ul de 334 kN proiectat

2.2 Ghid de proiectare și exemple de calcul pentru cadre din oțel cu BRB (Act. 4.2)

În cadrul acestei activități au fost elaborate recomandările de proiectare ale sistemelor structurale alcătuite din cadre din oțel contravântuite cu BRB-uri și au fost stabilite verificările de rigoare pentru elementele structurale (stâlpi, grinzi, diagonale). De asemenea, au fost realizate două exemple de calcul pentru două structuri având regimuri diferite de înălțime, joasă, respectiv medie. În continuare se prezintă succint etapele ghidului de proiectare și cele două exemple.

2.2.1 Sisteme structurale

Cadrele contravântuite centric cu flambaj împiedicat (BRBF) au o alcătuire similară cadrelor contravântuite centric convenționale. Totuși, modul de alcătuire a BRB-urilor nu permite prinderea de mijlocul acestora, ceea ce exclude anumite configurații structurale, cum ar fi cele în X pe un singur etaj. Nu este acceptată nici dispunerea în K a contravântuirilor, datorită solicitării nefavorabile a stâlpilor. Configurațiile acceptate pentru BRBF sunt prezentate în Figura 4.

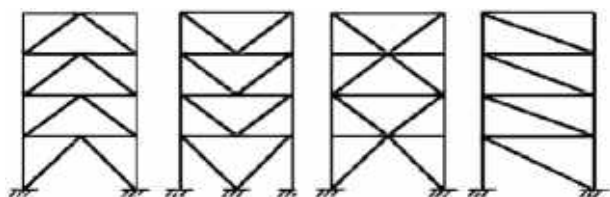


Figura 4. Configurații posibile de BRBF (Bruneau et al., 2011).

2.2.2 Procedura de proiectare

Pe plan mondial există două abordări privind procedura de proiectare a cadrelor cu contravântuiri cu flambaj împiedicat (BRBF). Sistemul de contravântuiri BRB poate fi considerat ca și sistem principal de preluare a forțelor orizontale (AISC 341-16, P100-1/2013), dar și ca sistem secundar cu rol de amortizare histeretică suplimentară (BSLJ-2000). În continuare se va detalia procedura de proiectare a BRBF având ca bază prevederile din P100-1/2013, care dedică capitolul (6.11) proiectării cadrelor cu contravântuiri cu flambaj împiedicat.

La o structură în cadre contravântuite cu BRB-uri, ca la orice structură contravântuită, elementele disipative sunt reprezentate de diagonalele cu flambaj împiedicat, în timp ce grinzele, stâlpii și îmbinările sunt elemente nedisipative, trebuind să rămână preponderent în domeniul elastic sub efectele acțiunii seismice de proiectare. Schema de principiu a procesului de proiectare a BRBF este asemănătoare cu cea folosită la cadrele cu contravântuiri clasice, însă apar și câteva elemente distincte.

Contravântuirile cu flambaj împiedicat trebuie proiectate, executate și încercate experimental pentru a fi capabile să dezvolte deformațiile produse sub acțiunea seismică de calcul. Aceste deformații corespund dublului deplasării relative de nivel de calcul la SLU, dar nu mai puțin de 0,02 din înălțimea de etaj. Conformitatea contravântuirilor se bazează pe efectuarea de încercări experimentale realizate pe baza prevederilor din SR EN 15129. Încercările constau în încercări tip inițiale (încercări de validare) și încercări de control al producției în fabrică

Înfășurătoarea schematică a răspunsului forță axială – deformație a unei BRB supus unei încercări ciclice este redată în Figura 5. Cu toate că BRB-urile sunt caracterizate de o comportare histeretică stabilă și de lipsa fenomenului de flambaj la nivel de element, răspunsul la compresiune nu este perfect simetric cu cel de la întindere. Astfel, datorită voalării miezului și a frecării dintre miez, interfața neaderentă și materialul în care sunt înglobate acestea, forța maximă (sau "capacitatea corectată") la compresiune C_{max} este mai mare decât forța maximă (sau "capacitatea corectată") la întindere T_{max} . După cum se poate observa din Figura 5, forțele maxime de întindere și compresiune sunt calculate folosind factorii β (de corecție a capacității la compresiune) și ω (datorat consolidării). Acești factori sunt obținuți din încercări ciclice, pentru o deformație care corespunde unei valori egale cu de 2 ori

deplasarea relativă de nivel de calcul la SLU, dar nu mai puțin de 2% din înălțimea etajului. Valoarea factorului β trebuie să fie cuprinsă între 1 și 1,3. În caz contrar, contravântuirea nu este considerată BRB și va fi calculată ca o contravântuire normală.

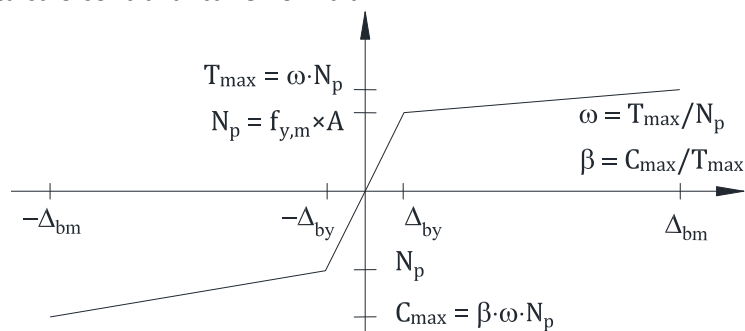


Figura 5. Diagrama forță – deformație pentru BRB (adaptată după P100-1/2013).

2.2.3 Calculul structural

Procedura de proiectare a cadrelor din oțel cu BRB-uri conform P100-1/2013 are la bază un calcul structural pe un model elastic al structurii și acțiunea seismică redusă prin factorul de comportare q . În mod uzual se folosesc metoda de calcul modal cu spectre de răspuns și metoda forțelor statice echivalente (metoda forțelor laterale). Conform P100-1/2013, factorul de comportare pentru BRBF este $q=6$ pentru clasa de ductilitate înaltă, respectiv $q=4$ pentru clasa de ductilitate medie, indicând astfel o capacitate ridicată de disipare a energiei seismice de către sistemul structural.

Datorită faptului că miezul BRB-urilor este compus din câteva segmente cu secțiuni diferite, rigiditatea efectivă a BRB-ului K_{ef} se determină ca inversa sumei flexibilității segmentelor componente (rigiditatea echivalentă a unor resoarte dispuse în serie), Tsai et al., 2004:

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

unde: K_i – rigiditatea zonei de îmbinare; K_e – rigiditatea zonei elastice; K_t – rigiditatea zonei de tranziție; K_p – rigiditatea zonei plastice.

În vederea modelării BRB-urilor pentru calculul structural elastic, se utilizează schema din Figura 6, în care se consideră BRB-ul având secțiunea transversală constantă. Pentru a ține cont de faptul că aria secțiunii transversale variază de-a lungul îmbinării și BRB-ului, rigiditatea echivalentă a barei de secțiune constantă trebuie corectată prin multiplicare cu factorul k :

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

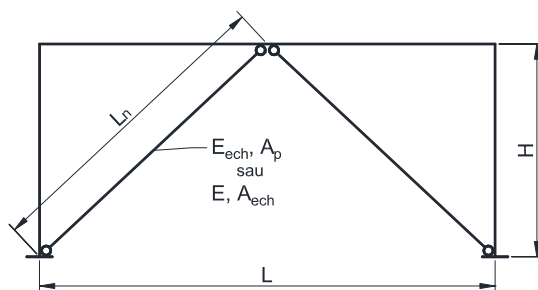


Figura 6. Modelarea BRB-ului pentru calculul structural elastic.

În mod practic, modelarea rigidității echivalente a BRB-ului prin intermediul unei bare echivalente de secțiune constantă se poate realiza fie modificând modulul de elasticitate al oțelului atribuit secțiunii, fie modificând aria secțiunii transversale:

$$E_{ech} = k \cdot E \quad \text{sau} \quad A_{ech} = k \cdot A_p$$

Rigiditatea necesară a diagonalelor se poate obține din condiția de respectare a deplasării relative de nivel corespunzătoare stării limită de serviciu (SLS).

Calculul structural trebuie efectuat ținând cont de eventualele imperfecțiuni locale și globale (determinate conform SR EN 1993-1-1) și de efectele de ordinul II prin multiplicarea valorilor de calcul ale efectelor acțiunii seismice cu factorul $\alpha = 1/(1 - \theta)$, conform paragrafului 4.6.2.2 din P100-1/2013. BRB-urile dispuse în V și V întors nu vor fi proiectate să preia încărcări gravitaționale, această sarcină revenind exclusiv grinzilor și stâlpilor.

2.2.4 Dimensionarea componentelor structurale

Datorită prevenirii flambajului global al miezului contravânturii, **verificarea elementelor disipative (BRB-urilor)** la SLU în situația seismică de proiectare constă într-o simplă verificare de rezistență a secțiunii:

$$N_{Ed} \leq N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

unde:

A – aria secțiunii transversale a miezului de oțel;

f_y – limita de curgere a oțelului;

γ_{M0} – coeficient parțial de siguranță.

În faza finală de proiectare se poate adopta valoarea experimentală a limitei de curgere furnizată de producător, $f_{y,m}$ în locul valorii nominale f_y .

Dimensionarea BRB-ului va avea în vedere limitarea deformațiilor axiale specifice în miezul BRB-ului la valori validate experimental. Pe baza încercărilor experimentale de precalificare a BRB-urilor din cadrul proiectului IMSER, se recomandă limitarea deformațiilor specifice în miezul BRB-ului corespunzătoare deplasării relative de nivel de la SLU (ε_b^{SLU}) la $\varepsilon_{b,Rd} = 2\%$ ($\varepsilon_{b,Rd} = \varepsilon_{b,max}/2$).

$$\varepsilon_b^{SLU} = \frac{d_r^{SLU} \cdot \cos \alpha}{L_p} \leq \varepsilon_{b,Rd} = 2\%$$

unde

d_r^{SLU} – deplasarea relativă de nivel la SLU;

α – unghiul format de contravântuire cu orizontala;

L_p – lungimea zonei plastice a miezului BRB-ului.

Îmbinările elementelor disipative (BRB-urilor) trebuie proiectate conform secțiunii 6.11.6 din P100-1/2013 astfel încât să nu se plasticizeze sub efectul forței maxime care poate fi dezvoltată în miezul din oțel, majorată cu 10%:

$$R_d \geq 1.1 \cdot \beta \cdot \omega \cdot \gamma_{OV} \cdot f_y \cdot A$$

În faza finală de proiectare, produsul $\gamma_{OV} \cdot f_y$ se poate înlocui cu valoarea experimentală a limitei de curgere furnizată de producător, $f_{y,m}$.

Calculul îmbinării trebuie să ia în considerare flambajul local și global. Acest lucru se poate face prin calculul guseului îmbinării la o forță transversală similară cu cea dezvoltată în timpul încercărilor sau prin dispunerea unor rigidizări pe guseu. Dacă se adoptă îmbinare grindă-stâlp de tip articulat, aceasta trebuie să permită o rotire de cel puțin 0.025 rad.

La calculul eforturilor în **componentele nedisipative** ale structurii se folosește suprazistența sistemului structural, determinată conform 6.11.5(1) din P100-1/2013 cu relația:

$$\Omega_T = \beta \cdot \omega \cdot \gamma_{OV} \cdot \Omega^N$$

unde: $\Omega^N = \min_{1 \leq i \leq n} \Omega_i^N$, iar $\Omega_i^N = N_{pl,Rd,i} / N_{Ed,i}$.

Pentru a asigura o distribuție uniformă deformațiilor plastice în structură raportul Ω_i^N (pe fiecare direcție a structurii) trebuie să fie cel mult 25%. Eforturile de calcul pentru elementele nedisipative

(grinzi și stâlpi) se determină combinând efectele acțiunilor gravitaționale cu cele ale acțiunii seismice amplificate cu factorul de suprazistență Ω — relațiile (6.30) din P100-1/2013. Atât stâlpii, cât și grinzele, se verifică la efectul combinat al efortului axial și momentului încovoiător. În plus, conform paragrafului 6.11.3(2)(a) din P100-1/2013, grinzele cadrelor contravântuite centric în V inversat trebuie proiectate în ipoteza că diagonalele nu contribuie la preluarea încărcărilor gravitaționale, iar pentru combinațiile care includ acțiunea seismică, efectul contravântuirii asupra grinzii, exprimat printr-o forță verticală și una orizontală, se determină pe baza rezistenței corectate la întindere și compresiune. Grinzele și stâlpii se verifică la efectul combinat al efortului axial și al momentului încovoiător conform din SR EN 1993-1-1.

Îmbinările elementelor nedisipative se vor dimensiona conform SR EN 1993-1-8 la eforturile de calcul aferente acestor elemente. Pentru grinzele cadrelor contravântuite centric se consideră în plus și eforturile produse de acțiunea seismică aplicată grinzii de către contravântuiri.

2.2.5 Particularități ale procesului de proiectare

Deși schema de principiu a procesului de proiectare a cadrelor cu contravântuiri cu flambaj împiedicat este asemănătoare cu cea a cadrelor cu contravântuiri clasice, cea dintâi are câteva caracteristici specifice. În Figura 7 este ilustrată schema de principiu a procesului de proiectare a cadrelor cu BRB-uri. Pe tot parcursul proiectării structurii contravântuite cu BRB-uri este necesar un schimb de informații cu fabricantul dispozitivelor.

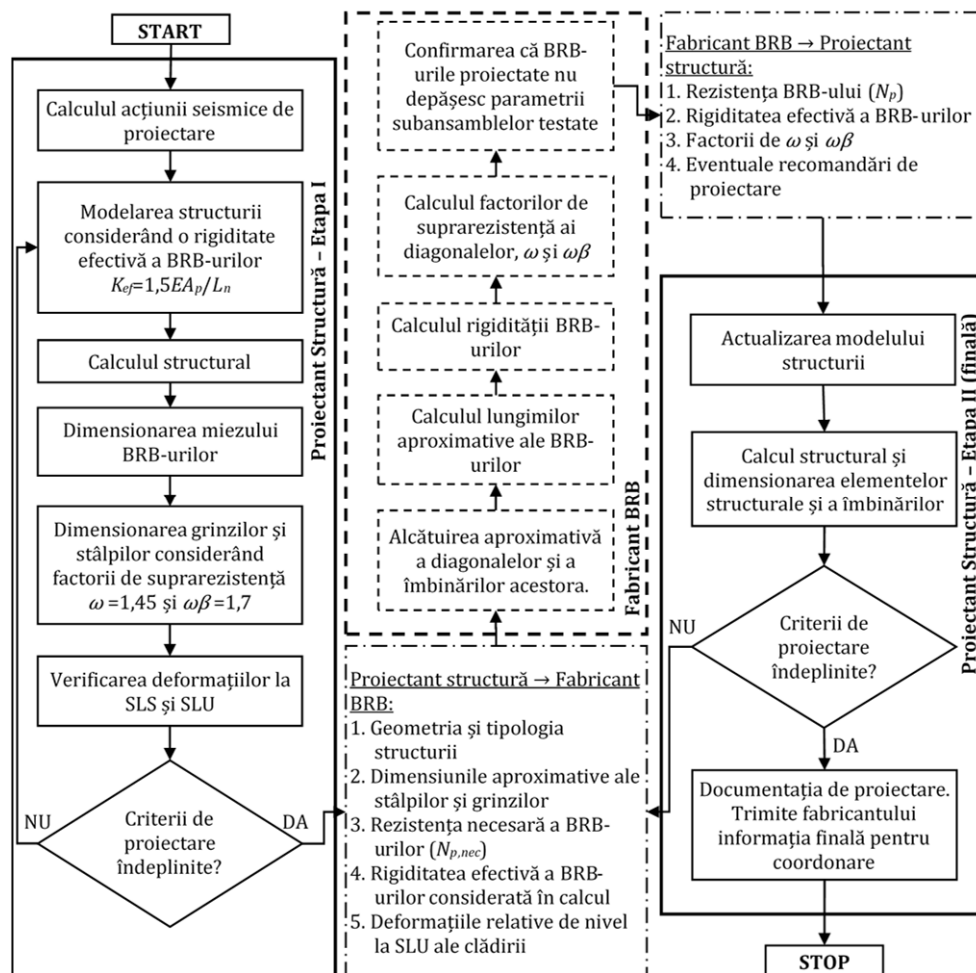


Figura 7. Schema de proiectare a cadrelor contravântuite cu BRB-uri.

2.2.6 Proiectarea cadrelor BRB duale

Cadrele duale se obțin prin combinarea cadrelor necontravântuite și a celor contravântuite. Există patru prevederi generale legate de proiectarea cadrelor duale: (1) se folosește un singur factor de comportare q pentru fiecare direcție principală a structurii, (2) forțele seismice se distribuie subsistemelor componente proporțional cu rigiditatea lor, (3) fiecare subsistem se proiectează conform prevederilor specifice; (4) cadrele necontravântuite ale structurilor duale trebuie să poată prelua cel puțin 25% din acțiunea seismică de calcul. Principalul beneficiu al configurației duale este redundanța mai mare a sistemului structural.

Componenta de bază a unui cadru necontravântuit la un nivel poate fi idealizată ca un ansamblu format dintr-o grindă și doi stâlpi, conform cu Figura 8 considerând punctele de inflexiune la jumătate din înălțimea de nivel. Din echilibrul de ansamblu al cadrului - Figura 8 (a) și al componentelor sale - Figura 8 (b), considerând că articulațiile plastice ar trebui să se formează la capetele grinzilor, capacitatea cadrului poate fi determinată simplificat ca:

$$F_y^{MRF} = \frac{2 \cdot M_{pl,b}}{H}$$

unde $M_{pl,b}$ este momentul plastic al grinzii.

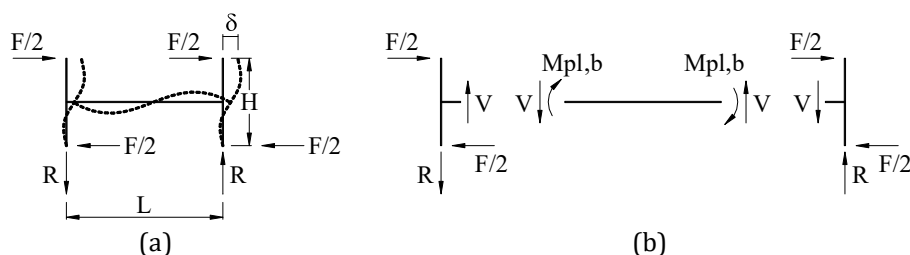


Figura 8. Componenta de bază a unui cadru necontravântuit la un nivel.

Cunoscând forța seismică de proiectare la fiecare nivel, se poate determina cerința de rezistență pentru grinzile cadrului necontravântuit.

2.2.7 Exemplu de calcul I. Structură contravântuită cu BRB-uri

În vederea exemplificării procedurii ca de calcul pentru cadrele din oțel contravântuite cu BRB-uri, s-a realizat un exemplu de calcul pentru o structură având regimul de înălțime parter + 5 etaje (6 niveluri), și amplasată în București. Sistemul structural pentru preluarea forțelor orizontale este alcătuit din cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedicat (BRBF). Schema spațială a structurii este prezentată în Figura 9. Planșeul din beton armat (b.a.) pe cofraj pierdut din tablă cutată reazemă pe un sistem de grinzi secundare și principale articulate, realizate în soluție compusă oțel-beton. Sistemul de preluare a încărcărilor laterale este compus din cadre contravântuite centric în V inversat dispuse perimetral. Codurile și standardele folosite la proiectarea modelului structural au fost cele aflate în vigoare.

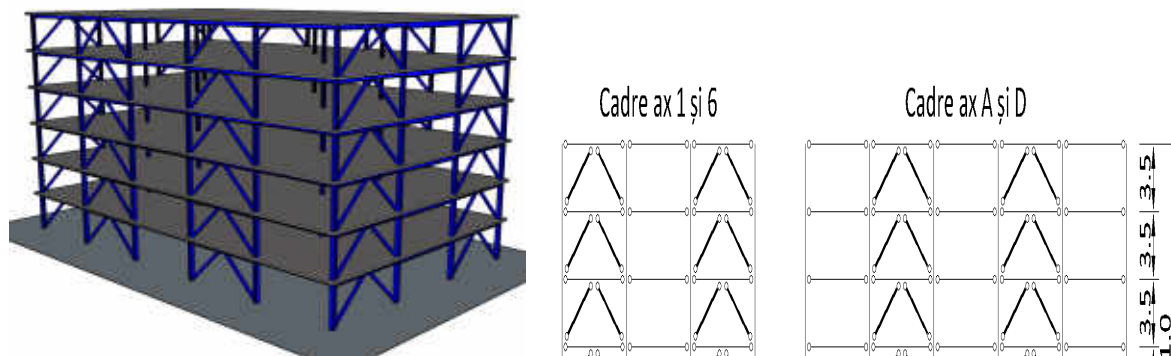


Figura 9. Schema spațială a structurii.

Au fost evaluate încărcările gravitaționale (permanentă și utilă), încărcarea din acțiunea seismică considerându-se un factor de comportare al structurii, $q = 6$. S-a adoptat conceptul de comportare disipativă, clasa de ductilitate înaltă a structurii DCH. Au fost realizate combinații de încărcări în situația fundamentală dar și cea seismică de proiectare.

Analiza structurii s-a efectuat pe un model spațial folosind un calcul modal cu spectre de răspuns, metoda implicită de calcul în P100-1/2013. Această abordare este convenabilă dacă analiza structurală se efectuează folosind programe moderne de calcul, conducând în același timp la o proiectare mai economică. S-au folosit spectrele de proiectare conform P100-1/2013, aplicate pe cele două direcții orizontale ale structurii. Răspunsurile modale au fost combinate cu regula „combinarea pătratică completă”, iar efectele componentelor acțiunii seismice cu regula „radical din suma pătratelor”.

Structura a fost analizată folosind un model spațial într-un program de calcul comercial. S-a considerat efectul de diafragmă rigidă asigurat de planșeele de beton armat. Stâlpii perimetrali au fost încastrați la bază, iar stâlpii centrali au fost articulați la bază. Secțiunile elementelor structurale sunt prezentate în Tabelul 5.

Tabelul 5. Secțiunile profilelor laminate utilizate în structură și ale miezului diagonalelor.

Nivel	Grinzi secundare	Grinzi principale	Grinzi cadru contravântuit	Stâlpi centrali	Stâlpi cadru contravântuit	Secțiune diagonale
6	IPE 220	IPE 400	HE 320 A	HE 260 B	HE 280 B	15 x 50
5	IPE 220	IPE 400	HE 320 A	HE 260 B	HE 280 B	20 x 65
4	IPE 220	IPE 400	HE 400 A	HE 260 B	HE 280 M	25 x 70
3	IPE 220	IPE 400	HE 400 A	HE 260 M	HE 280 M	30 x 70
2	IPE 220	IPE 400	HE 400 A	HE 260 M	HE 300 M	30 x 80
1	IPE 220	IPE 400	HE 400 A	HE 260 M	HE 300 M	30 x 75

Masele corespund încărcărilor gravitaționale din gruparea seismică. Conform CR0-2012, ecuația (6.11), încărcările gravitaționale în gruparea seismică sunt calculate cu relația:

$$\Sigma G_{k,j} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Masele și momentele de inerție ale maselor au fost calculate automat de către programul de calcul.

S-au luat în calcul 6 moduri proprii de vibrație. Perioadele proprii de vibrație T și masele modale efective M_n^* raportate la masa totală a structurii sunt prezentate în Tabelul 6. Se poate observa că suma maselor modale efective din primele 6 moduri proprii de vibrație depășește 90% din masa totală a structurii, fiind îndeplinită cerința din secțiunea 4.5.3.3 din P100-1/2013. Deformata structurii în primele trei moduri proprii de vibrație este prezentată în Figura 10. Primele trei moduri proprii de vibrație ale structurii.

Tabelul 6. Perioadele proprii de vibrație și masele modale efective.

Mod	T (s)	$M_{n,x}^*$ (%)	$M_{n,y}^*$ (%)	$\Sigma M_{n,x}^*$ (%)	$\Sigma M_{n,y}^*$ (%)
1	0,946	76,58	0,00	76,58	0,00
2	0,946	0,00	76,60	76,58	76,60
3	0,600	0,00	0,00	76,58	76,60
4	0,362	14,82	0,00	91,40	76,60
5	0,362	0,00	14,84	91,40	91,44
6	0,231	0,00	0,00	91,40	91,44



Figura 10. Primele trei moduri proprii de vibrație ale structurii.

Deoarece condiția $H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed}$ nu a fost îndeplinită pe nici una din cele două direcții orizontale, a fost necesar considerarea modelării imperfecțiunilor globale pentru analiza structurii.

De asemenea au fost considerate și efectele de ordinul doi, rezultând o creștere de peste 13 % a încărcării seismice, $\alpha = 1,137$.

Au fost verificate componentele structurale la SLU. BRB-urile au fost dimensionate la valorile eforturilor maxime de calcul rezultate din combinațiile de încărcare, conform cap. 6.11.4 din P100-1/2013, cu relația:

$$A_{nec,i} = \frac{N_{Ed,i} \cdot \gamma_{M0}}{f_y}$$

f_y (MPa)	γ_{OV}	γ_{M0}	β	ω
355	1,25	1,10	1,3	1,4

Capacitatea corectată la compresiune (P100-1/2013, cap. 6.11.2(2)):

$$C_{max} = \beta \cdot \omega \cdot \gamma_{OV} \cdot f_y \cdot A_p$$

Capacitatea corectată la întindere (P100-1/2013, cap. 6.11.2(3)):

$$T_{max} = \omega \cdot \gamma_{OV} \cdot f_y \cdot A_p$$

unde:

β este factorul de corecție a capacității la compresiune,
 ω este factorul de corecție datorat consolidării.

A fost determinată suprazistenței sistemului structural cu relația:

$$\Omega^T = \beta \cdot \omega \cdot \gamma_{OV} \cdot \Omega^N$$

unde: $\Omega^N = \min_{1 \leq i \leq n} \Omega_i^N$, iar $\Omega_i^N = N_{pl,Rd,i} / N_{Ed,i}$

Pentru S355: $\gamma_{OV} = 1,25$

Proiectarea elementelor nedisipative (stâlpi și grinzi), s-a făcut utilizând combinațiile nedisipative de încărcări, conform prevederilor din P100-1/2013. Stâlpii au fost verificați la flambaj din încovoiere și compresiune și la forță tăietoare. Grinzile cadrelor contravântuite centric în V inversat trebuie proiectate în ipoteza că diagonalele nu contribuie la preluarea încărcărilor gravitaționale, iar pentru combinațiile care includ acțiunea seismică, efectul contravântuirii asupra grinzii, exprimat printr-o forță verticală și una orizontală, se determină pe baza rezistenței corectate la întindere și compresiune.

Îmbinările diagonalelor BRB se vor dimensiona conform secțiunii 6.11.6 din P100-1/2013. Îmbinările trebuie proiectate astfel încât să nu se plasticizeze la o forță corespunzătoare curgerii miezului din oțel.

Îmbinările elementelor nedisipative se vor dimensiona conform SR EN 1993-1-8 la eforturile de calcul aferente acestor elemente

Verificarea deplasărilor la SLS se efectuează conform prevederilor paragrafului 4.5.4(2) și secțiunii E.1 din P100-1/2013. Pentru componentele nestructurale din materiale cu capacitate mare de deformare, valoarea admisă a deplasării relative de nivel este $d_{r,a}^{SLS} = 0,0075h$.

Verificarea deplasărilor la SLU se efectuează conform prevederilor paragrafului 4.5.4(3) și secțiunii E.2 din P100-1/2013. Valoarea admisă a deplasării relative de nivel este $d_{r,a}^{SLS} = 0,025h$.

2.2.8 Exemplu de calcul II. Structură duală contravântuită cu BRB-uri

Al doilea exemplu de calcul a avut o geometrie similară cu structura de la exemplul I, cu mențiunea că sistemul de preluare a încărcărilor laterale este compus din cadre contravântuite centric în V inversat și cadre necontravântuite dispuse perimetral. Schema spațială a structurii este prezentată în Figura 11. Schema spațială a structurii. Din punct de vedere al alcătuirii structurii aceasta este similară cu cea din

primul exemplu, cu excepția grinzilor prinse rigid ale cadrelor necontravântuite, confecționate din oțel S235.

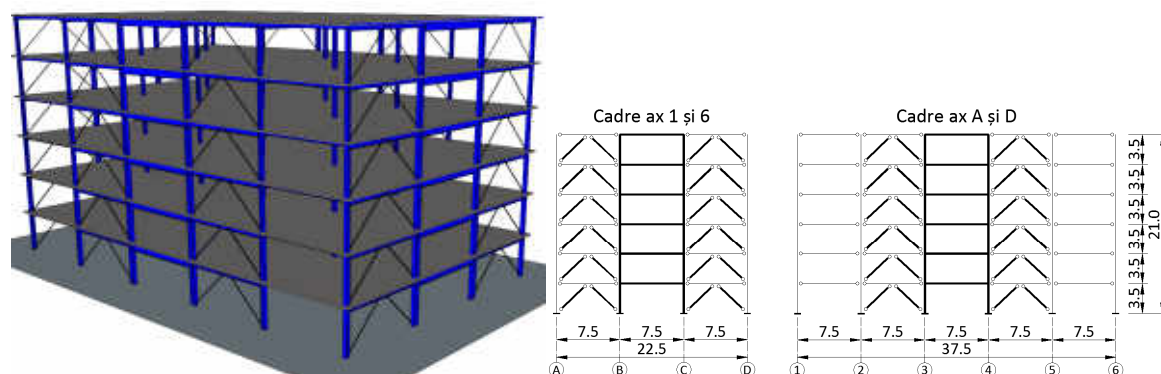


Figura 11. Schema spațială a structurii.

Considerentele legate de baza normativă, încărcări, acțiunea seismică de proiectare, combinații de încărcări în situația seismică de proiectare și alegerea modelului structural și a metodei de calcul sunt similare cu cele de la exemplul I.

Calculul se conduce similar ca și în cazul primului exemplu, considerându-se efectul imperfecțiunilor, efectul de ordinul doi, suprarezistența sistemului structural. Se aplică aceleași verificări pentru componentele cadrului contravântuit cu BRB-uri (BRB-uri, grinzi, stâlpi). Suplimentar, se verifică componentele cadrului necontravântuit (grinzile disipative, stâlpii nedisipativi și îmbinările aferente) conform P100-1/2013.

Deoarece structura este una duală, conform prevederilor paragraful 6.10.2(2) din P100-1/2013, cadrele necontravântuite trebuie proiectate pentru a putea prelua cel puțin 25% din acțiunea seismică de calcul. Modul practic prin care a fost satisfăcută această cerință este prin considerarea în mod idealizat a ansamblului format dintr-o grindă și doi stâlpi, cu puncte de inflexiune la jumătate din înălțimea de nivel. Din echilibrul de ansamblu al cadrului și al componentelor sale, considerând că articulațiile plastice ar trebui să se formeze la capetele grinzilor, capacitatea cadrului poate fi determinată simplificat ca:

$$F_y^{MRF} = \frac{2 \cdot M_{pl,b}}{H}$$

Cunoscând forța seismică de proiectare la fiecare nivel, se poate determina cerința de rezistență pentru grinzile cadrului necontravântuit. Ținând cont că pe fiecare direcție sunt câte două cadre, formula devine:

$$M_{pl,b} = \frac{F_y^{MRF}}{2} \cdot \frac{H}{2}$$

2.3 Evaluarea eficienței tehnice și economice a cadrelor din oțel cu BRB (Act. 4.3)

În cadrul acestei activități s-a analizat eficiența tehnico-economică a cadrelor contravântuite cu BRB-uri, printr-un studiu comparativ al utilizării acestora față de cadre contravântuite centric clasic, cadre rigide sau cadre duale rigide – contravântuite cu BRB-uri.

În cadrul programului sunt proiectate, analizate și comparate 16 structuri similare, ce diferă însă prin regimul de înălțime, condițiile seismice de amplasament, și sistemul structural adaptat pentru a rezista forțelor orizontale (vezi Tabelul 7):

- BRBF (Buckling Restrained Braced Frame) – cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedicat;
- D-BRBF (Dual Buckling Restrained Braced Frame) – cadre duale cu contravântuiri cu flambaj împiedicat;
- CBF (Concentrically Braced Frame) – cadre contravântuite centric cu diagonale clasice;
- MRF (Moment Resisting Frame) – cadre necontravântuite;

Tabelul 7. Structuri proiectate – regim înălțime, amplasament, sistem structural

Înălțime	Amplasament	BRBF	D-BRBF	CBF	MRF
Joasă (P+2)	Timișoara, $T_C = 0,7s$	BL07	DBL07	CBL07	ML07
	București, $T_C = 1,6s$	BL16	DBL16	CBL16	ML16
Medie (P+5)	Timișoara, $T_C = 0,7s$	BM07	DBM07	CBM07	MM07
	București, $T_C = 1,6s$	BM16	DBM16	CBM16	MM16

Dimensionarea structurilor s-a realizat în vederea analizării lor comparative pentru stabilirea eficienței seismice a utilizării sistemului cu BRB-uri. Evaluarea tehnico-economică s-a realizat pe baza consumului defalcat de material stabilit în urma proiectării celor 16 structuri. Defalcarea s-a realizat în: elemente seismice (grinzi, stâlpi, diagonale simple; diagonale BRB), elemente gravitaționale (grinzi, stâlpi), piese mărunte, plăci (tablă cutată, beton armat). Costurile exprimate în cadrul prezentului document reprezintă estimări ale costului de realizare a structurii de rezistență a imobilelor proiectate. Pentru analiza performanței tehnico-economice s-au utilizat prețuri medii acoperitoare ale pieței la momentul alcătuirii raportului (inclusiv manopera), și anume:

- Cost confecții metalice: 1,6 euro/kg
- Cost tablă cutată: 1,0 euro/kg
- Cost beton armat: 160 euro/mc
- Cost BRB-uri: cf. producătorului

Costul dispozitivelor BRB a fost stabilit urmând metoda de calcul propusă de partenerul HMS a proiectului IMSER ($cost(euro) = 1,3 \cdot (N_{pl}) + 1300$).

În urma evaluării eficienței tehnico-economice a cadrelor cu BRB-uri au reieșit următoarele:

- Din punct de vedere al costurilor totale, indiferent de locația și regimul de înălțime al structurii, costul rezultat pentru cele 4 sisteme seismice adoptate variază pe o plajă de maximum 16% din costul maxim al acelei structuri pentru structura P+5 din Timișoara și minimum 9% pentru structura P+5 din București.
- În cazul structurilor P+2, sistemele tip BRBF au reieșit mai avantajoase din punct de vedere al costurilor față de structurile MRF, obținându-se o reducere de cost de până la 11% din costul total al structurii MRF proiectate (cazul București P+2). În cazul suprastructurii București P+5, costul acesteia a reieșit similar pentru sistemul BRBF și cel MRF, variind cu 3%. Pentru structura Timișoara P+5, costul structurii BRBF a reieșit peste cel al structurii MRF datorită tiparului spectrului de proiectare caracteristic zonei, ce determină reducerea forței seismice (și implicit consumul de material) pentru structuri cu perioadă mai mare de vibrație.
- Comparând suprastructurile tip BRBF cu cele CBF, se constată că în toate situațiile acestea sunt mai ridicate ca valoare a costului. Diferența este însă de doar 1% sau 4% pentru suprastructurile Timișoara respectiv București P+2. În cazul suprastructurii București P+5 diferența de cost este de 8%, iar pentru structura Timișoara P+5 diferența este procentual nesemnificativă.
- Costul structurii MM07 (imobil P+5 – Timișoara, cadre rigide) a rezultat mai scăzut față de costul celorlalte structuri P+5 din Timișoara. Situația este datorată perioadei mai ridicate a structurii MM07 (1.725s), ce depășește palierul spectrului și determină o forță seismică semnificativ mai redusă asupra structurii. În cazul de față, pentru structura CBM07 (0.781s) rezultă un factor $\beta(T)$ de 2,2 ori mai mare față de cel al structurii MM07. Perioadele celorlalte imobile Timișoara P+5 sunt fie pe palierul spectrelor, fie au valori mai puțin disparate.
- S-a constatat că în cazul structurilor care utilizează BRB-uri, ponderea costului acestora în costul total al suprastructurii este relativ constant (aprox. 15% pentru Timișoara și 23% pentru București).

- Proiectarea imobilelor a considerat doar suprastructura acestora, fără a defini/dimensiona și infrastructurile clădirilor. Se apreciază că în urma unei dimensionări corespunzătoare a infrastructurii, datorită factorului de comportare q semnificativ diferit între structurile tip BRBF și cele tip CBF (6,0 față de 2,5), și implicit a eforturilor mai reduse transmise de elementele verticale principale în cazul structurilor ce utilizează BRB-uri, costurile finale vor scădea.
- Totodată, la estimarea costului suprastructurilor a fost prevăzută o cotă de 25% din greutatea totală a elementelor pentru îmbinări și piese mărunte. În situația dimensionării propriu-zise a acestora, ponderea îmbinărilor nu ar fi constată, ea fiind spre exemplu mai redusă în cazul structurilor BRBF față de cele CBF, în principal datorită forțelor seismice mai reduse generate de factorul q mai ridicat al structurilor BRBF (6,0 față de 2,5 pentru structurile CBF). Se apreciază așadar că prețul structurilor BRBF va scădea suplimentar față de cel al structurilor CBF și datorită diferenței de pondere a îmbinărilor și pieselor mărunte în favoarea structurilor BRBF.
- Studiul de evaluare a eficienței tehnico-economice a utilizării cadrelor contravântuite cu BRB-uri confirmă faptul că folosirea acestora conduce la costuri comparabile sau mai reduse a suprastructurii imobilelor analizate. În continuare, costul mai redus al fundațiilor ce ar fi determinat de utilizarea cadrelor contravântuite cu BRB-uri avantajează adoptarea soluțiilor tehnice cu BRB-uri, suplimentar față de comportarea structurală favorabilă determinată de acestea.

2.4 Coordonare, administrare, raportare, publicarea rezultatelor (Act. 4.4)

Coordonarea activităților de cercetare a constat în stabilirea clară a sarcinilor fiecărui partener, schimbul de informații vizând stadiul activităților de cercetare, precum și a modului de elaborare a rapoartelor tehnice și financiare. Schimbul de informații a fost facilitat și de menținerea la zi a sistemului web de schimb de date, care permite stocarea centralizată a documentelor de lucru, a draft-urilor și rapoartelor finale, a minuterilor ședințelor etc.

Pentru a disemina rezultatele cercetării, precum și a urmări cercetările recente în domeniu, membrii echipei de cercetare au participat la două lucrări științifice: (1) The 6th National Conference of Earthquake Engineering and The 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 14-17 iunie 2017, București, România, și (2) The 8th European Conference on Steel and Composite Structures, 13-15 septembrie 2017, Copenhaga, Danemarca.

A fost actualizată pagină web dedicată proiectului, disponibilă la adresa <http://www.ct.upt.ro/centre/cemsig/imser.htm>.

Proiectul a contribuit la elaborarea viitoarelor versiuni ale Eurocode 8 "Calculul structurilor la acțiunea seismică", în special în ceea ce privește proiectarea structurilor din oțel cu contravântuiri cu flambaj împiedicat, prin participarea membrilor echipei de cercetare la întrunirile de lucru ale comisiei tehnice TC13 "proiectare seismică" a Convenției Europene de Construcții Metalice (ECCS - <http://www.steelconstruct.com/>), precum și a subcomitetului 8 "Eurocode 8: Calculul structurilor la acțiunea seismică" al Comitetului European de Standardizare (CEN/TC250/SC8 - <http://standards.cen.eu/>).

În activitatea de cercetare desfășurată în cadrul proiectului au fost implicați studenți din ciclul doctorat. Astfel, membri ai echipei de cercetare de la Universitatea Politehnica din Timișoara (CO) coordonează o teză de doctorat cu titlul "Utilizarea contravântuirilor cu flambaj împiedicat pentru protecția antisismică a clădirilor".

2.5 Organizarea unui seminar la Timișoara (Act. 4.5)

În cadrul acestei activități a fost organizat un workshop de diseminare a rezultatelor obținute în cadrul proiectului IMSER. Acesta a avut loc la Facultatea de Construcții din Timișoara, în data de 29.09.2017.

Au fost prezentate principalele rezultate obținute pe tot parcursul proiectului, rezultate concretizate prin elaborarea și publicarea unui ghid de proiectare destinat atât proiectanților de structuri, cât și fabricanților de BRB-uri. La seminar au asistat atât persoane din mediul universitar cât și din mediul privat, care au apreciat pozitiv proiectul IMSER. Seminarul s-a terminat cu o sesiune de întrebări și comentarii.

2.6 Organizarea unui seminar la București (Act. 4.6)

În cadrul acestei activități a fost organizat un workshop de diseminare a rezultatelor obținute în cadrul proiectului IMSER. Acesta a avut loc la Facultatea de Construcții din cadrul Universității Tehnice de Construcții București (UTCb). Au fost prezentate principalele rezultate obținute pe tot parcursul proiectului, rezultate concretizate prin elaborarea și tipărirea unui ghid de proiectare destinat atât proiectanților de structuri, cât și fabricanților de BRB-uri. La seminar au asistat atât persoane din mediul universitar cât și din mediul privat, care au apreciat pozitiv proiectul IMSER. Seminarul s-a terminat cu o sesiune de întrebări și comentarii.

2.7 Întâlniri de lucru pentru elaborarea ghidurilor de proiectare (Act. 4.7)

Pentru coordonarea activităților desfășurate în cadrul proiectului a fost organizată o ședință de lucru la Timișoara, la sediul UPT, precum și numeroase ședințe on-line. Acestea au permis un schimb de informații eficient în ceea ce privește elaborarea rapoartelor științifice și a ghidurilor de proiectare la nivel de element și structură. În plus, au avut loc mai multe întruniri bilaterale CO-P2 necesare în faza de evaluare a performanței tehnico-economice a contravântuirilor cu flambaj împiedicat.

3 Concluzii

Raportul tehnic și științific a sintetizat activitățile desfășurate în cadrul etapei 4 / 2017 a proiectului "Implementarea în practica de proiectare anti-seismică din România a contravântuirilor cu flambaj împiedicat (IMSER)". Obiectivele asumate în planul de realizare au fost atinse.

Au fost determinate dispozitivele BRB precalificate pe baza criteriilor de performanță și a fost elaborat un ghid de proiectare pentru soluția optimă (BRB „convențional” cu miez frezat, având raportul $P_{cr}/P_y \geq 3$. (act. 4.1). De asemenea, a fost elaborat un ghid de proiectare și exemple de calcul pentru cadre din oțel cu BRB (act. 4.2). Utilizând rezultatele analizei de cost a BRB-urilor, a fost evaluată eficiența tehnică și economică a cadrelor din oțel cu BRB prin comparație cu alte structuri din oțel (MRF, CBF) (act. 4.3). Au fost organizate câteva întruniri de lucru pentru coordonarea activităților desfășurate în cadrul proiectului și elaborarea ghidurilor de proiectare, și au fost publicate două articole (act. 4.4 și 4.7). Rezultatele obținute au fost diseminate prin intermediul a două workshop-uri organizate la Timișoara și la București (act. 4.5 și act. 4.6).