Universitatea Politehnica Timișoara, Facultatea de Construcții Departamentul de Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor str. Ioan Curea nr.1, 300224 Timișoara, Romania tel: ++40.256.403911, fax: ++40.256.403917



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 2 / 2015 Proiectarea și evaluarea numerică a performanței dispozitivelor BRB

Rezumat

Raportul tehnic și științific prezintă activitățile desfășurate în cadrul etapei 2 / 2015 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 proiectate structurile contravântuite centric și cele duale cu contravântuiri împiedicate la flambaj (activitatea 2.1). Au fost dezvoltate și proiectate conceptual câte două contravântuiri (cu capacitatea de 300 kN și 700 kN) în varianta "convențională" și "uscată" (activitățile 2.2 și 2.3). Performanța acestor dispozitive a fost verificată prin simulări numerice (activitatea 2.4). Performanța seismică la nivel de structură a cadrelor cu BRB-uri a fost evaluată folosind analize statice neliniare și dinamice neliniare (activitatea 2.5). Rezultatele obținute au fost diseminate prin intermediul paginii web a proiectului, prin publicarea și prezentarea a 5 lucrări în cadrul unor conferințe și simpozioane.

Cuprins

1	INTRODUCERE	
2	SINTEZA ACTIVITĂȚILOR	3
	2.1 PROIECTAREA STRUCTURILOR MODEL CONTRAVÂNTUITE CENTRIC ȘI DUALE	3
	2.1.1 Structurile CL16 și ML16	4
	2.1.2 Structurile DBL16 și DBM16	5
	2.2 DEZVOLTAREA ȘI PROIECTAREA CONCEPTUALĂ A DISPOZITIVELOR BRB "CONVENȚIONALE"	8
	2.3 DEZVOLTAREA ȘI PROIECTAREA CONCEPTUALĂ A DISPOZITIVELOR BRB "USCATE"	9
	2.4 SIMULĂRI NUMERICE PE DISPOZITIVE BRB	9
	2.4.1 Calibrarea parametrilor modelului numeric	9
	2.4.2 Simulări numerice pe soluția BRB-300 kN "convențional"	
	2.4.3 Simulări numerice pe soluția BRB-300 kN "uscat"	14
	2.5 EVALUAREA PERFORMANȚEI SEISMICE A CADRELOR DIN OȚEL CU BRB	15
	2.6 COORDONARE, ADMINISTRARE, RAPORTARE ȘI PUBLICAREA REZULTATELOR	17
3	CONCLUZII	18
В	BIBLIOGRAFIE	

1 Introducere

În cadrul etapei 2 / 2015 a proiectului "Implementarea în practica de proiectare anti-seismică din România a contravântuirilor cu flambaj împiedicat (IMSER)" au fost prevăzute următoarele activități:

- Act. 2.1 Proiectarea structurilor model contravântuite centric și duale
- Act. 2.2 Dezvoltarea și proiectarea conceptuală a dispozitivelor BRB "convenționale"
- Act. 2.3 Dezvoltarea și proiectarea conceptuală a dispozitivelor BRB "uscate"
- Act. 2.4 Simulări numerice pe dispozitive BRB
- Act. 2.5 Evaluarea performanței seismice a cadrelor din oțel cu BRB
- Act. 2.6 Coordonare, administrare, raportare și publicarea rezultatelor

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

2 Sinteza activităților

2.1 Proiectarea structurilor model contravântuite centric și duale

În urma analizei portofoliului de construcții proiectate de către partenerul P1 (Popp & Asociații), s-a constatat faptul că există o cerere substanțială pe piața din România pentru clădiri cu regim de înălțime mic și mediu.

Au fost selectate pentru analiză în cadrul acestui proiect nouă configurații structurale care diferă prin regimul de înălțime (jos și mediu), condițiile seismice din amplasament (București – a_g =0.3 g, T_c=1.6 s și Timișoara – a_g =0.2 g, T_c=0.7 s) și sistemul de preluare a încărcărilor laterale: cadre necontravântuite (MRF), cadre contravântuite centric (CBF), cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedicat (BRBF) și cadre duale cu contravântuiri cu flambaj împiedicat (D-BRBF). Structurile analizate sunt sintetizate în Tabelul 1. În cadrul etapei 2 / 2015 au fost proiectate opt structuri (CL16, CM16, DBL16 și DBM16), evidențiate în Tabelul 1.

Înălțime Amplasament		MRF	CBF	BRBF	D-BRBF
loacă (B+2)	$T_{\rm C} = 0.7 { m s}$ (Timișoara)			BL07	
JUasa (P+2)	$T_{\rm C} = 1.6$ s (București)	ML16	CL16	BL16	DBL16
Madia (DLE)	$T_{\rm C} = 0.7 { m s}$ (Timișoara)			BM07	
weule (P+5)	$T_{C} = 1.6s$ (București)		CM16	BM16	DBM16

Tabelul 1. Caracteristicile principale ale structurilor selectate.

Toate structurile model analizate au în comun următoarele caracteristici: dimensiunea în plan: 38.50 x 23.50 m; deschideri în plan: 3 x 7.50m pe o direcție și 5 x 7.50 m pe cealaltă direcție; înălțimea de nivel: 3.50 m; destinația: spații de birouri; încărcări gravitaționale (utile și permanente); clasa III de importanță și expunere conform P100-1/2013; sistemul de preluare a forțelor gravitaționale.

Elementele structurii de rezistență s-au considerat din profile laminate dublu T, din oțel S355, cu excepția grinzilor prinse rigid ale cadrelor necontravântuite, confecționate din oțel S235. Componentele nestructurale atașate structurii au fost considerate cu capacitate mare de deformare, astfel încât valoarea admisibilă a deplasării relative de nivel la starea limită de serviciu este de 0.0075 h, unde h este înălțimea de nivel. Structurile au fost proiectate pentru următoarele încărcări: încărcarea permanentă pe planșee și acoperiș, încărcarea permanentă din pereții exteriori (fațadă, greutatea proprie a structurii metalice și a planșeelor din b.a., încărcarea utilă pe planșeele curente și pe acoperiș, precum și acțiunea seismică. S-a adoptat conceptul de comportare disipativă, clasa de ductilitate înaltă a structurii DCH. Astfel, structurile fiind regulate pe verticală, conform P100-1/2013, pentru cadrele duale cu contravântuiri cu flambaj împiedicat rezultă un factor de comportare q= 6.0, iar pentru cadrele contravântuite centric un factor de comportare q=2.5.

2.1.1 Structurile CL16 și ML16

Date generale despre structuri:

- Amplasament: București
- Regim de înălțime: 3 niveluri (CL16) și 6 niveluri (CM16)



Schema spațială a structurii este prezentată în Figura 1. 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 pe direcția X în axele 1 și 6 și pe direcția Y în axele A și D, vezi Figura 2 și Figura 3.



Figura 3. Elevații structură prin axele 1, 6, A și D pentru structurile CL16 (a) și CM16 (b).

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 cadrelor contravântuite au fost încastrați la bază, iar stâlpii ceilalți au fost articulați la bază. Legăturile dintre bare (rigide/articulate) au fost modelate conform datelor din Figura 2 și Figura 3. Încărcările gravitaționale au fost aplicate pe planșee (încărcările permanente și utile) și pe grinzile perimetrale (încărcarea din pereți exteriori). Masele structurii au fost calculate automat din încărcările gravitaționale aplicate pe structură.

Secțiunile contravântuirilor precum și cele ale stâlpilor și grinzilor de cadru contravântuit au fost determinate pe baza capacității acestora din combinația seismică pentru ULS. Secțiunile grinzilor secundare, ale grinzilor principale și ale stâlpilor din cadrele necontravântuite, au rezultat din combinația fundamentală de proiectare. Secțiunile finale ale elementelor structurale rezultate în urma proiectării structurii sunt prezentate în Tabelul 2 și Tabelul 3.

Nivol	Grinzi	Grinzi	Grinzi cadru	Stâlpi	Stâlpi	Stâlpi cadru	Secțiune	
NIVEI	secundare	principale	contravântuit	centrali	perimetrali	contravântuit	diagonale	
2	IDE 220						CHS	
Э	IPE 220 IPE	IPE 400	IPE 400 HE 550 B		TE 220 B	TIE SOU B	193.7x6.3	
2	IDE 220						CHS	
Z	IPE 220 IPE 400		HE 200 B		HE 360 B	219.1x8		
1	IDE 220						CHS	
T	IPE 220	IPE 220 IPE 400 HE 050 B	TE 200 B	HE 200 B HE 220 B	TE 200 B	244.5x8		

Tabelul 2. Secțiunile profilelor laminate și ale diagonalelor utilizate pentru structura CL16.

Tabelul 3. Sec	tiunile profilelor	laminate si ale diagonalelo	or utilizate pentru structura	structura CM16.
	/· · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · ·	

Nivol	Grinzi	Grinzi	Grinzi cadru	Stâlpi	Stâlpi cadru	Secțiune
Niver	secundare	principale	contravântuit	centrali	contravântuit	diagonale
6	IPE 220	IPE 400	HE400B	HE 260 B	HD360x162	CHS 168.3x5
5	IPE 220	IPE 400	HE500B	HE 260 B	HD360x162	CHS 193.7x6.3
4	IPE 220	IPE 400	HE550B	HE 260 B	HD400x187	CHS 193.7x8
3	IPE 220	IPE 400	HE700B	HE 260 M	HD400x187	CHS 244.5x8
2	IPE 220	IPE 400	HE700B	HE 260 M	HD400x314	CHS 244.5x10
1	IPE 220	IPE 400	HE600B	HE 260 M	HD400x314	CHS 244.5x8

2.1.2 Structurile DBL16 și DBM16

Date generale despre structură:

- Amplasament: București
- Regim de înălțime: 3 niveluri (DBL16) și 6 niveluri (DBM16)

Schema spațială a structurii este prezentată în Figura 4. 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 și cadre necontravântuite dispuse perimetral pe direcția X în axele 1 și 6 și pe direcția Y în axele A și D, vezi Figura 5 și Figura 6.

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 cadrelor contravântuite și necontravântuite care preiau încărcări laterale au fost încastrați la bază, iar stâlpii ceilalți au fost articulați la bază. Legăturile dintre bare (rigide/articulate) au fost modelate conform datelor din Figura 5 și Figura 6. Încărcările gravitaționale au fost aplicate pe planșee (încărcările permanente și utile) și pe grinzile perimetrale (încărcarea din pereți exteriori). Masele structurii au fost calculate automat din încărcările gravitaționale aplicate pe structură.







Figura 5. Planul structurilor DBL16 și DBM16.



Figura 6. Elevații structură prin axele 1, 6, A și D pentru structurile DBL16 și DBM16.

Secțiunile BRB-urilor, cele ale stâlpilor și grinzilor de cadru contravântuit, precum și cele ale cadrelor necontravântuite ce preiau încărcări laterale au fost determinate pe baza capacității acestora din combinația seismică pentru ULS. Secțiunile grinzilor secundare, ale grinzilor principale și ale stâlpilor din cadrele necontravântuite au rezultat din combinația fundamentală de proiectare. Secțiunile finale ale elementelor structurale rezultate în urma proiectării structurii sunt prezentate în Tabelul 4, Tabelul 5, Tabelul 6, Tabelul 7, Tabelul 8 și în Tabelul 9.

Tabelul 4. Secțiunile profilelor laminate ale cadrelor contravântuite și ale miezului diagonalelor utilizate în structura DBL16 pentru preluarea forțelor laterale.

			1 ,	
Nivol	Grinzi cadru	Stâlpi cadru	Stâlpi cadru	Secțiune diagonale
Niver	contravântuit X și Y	contravântuit X	contravântuit Y	(mm)
3	HE400A	HE320B	HE300B	20 x 55
2	HE400A	HE320B	HE300B	30 x 65
1	HE450A	HE320B	HE300B	30 x 75

Tabelul 5. Secțiunile profilelor laminate ale cadrelor necontravântuite utilizate în structura DBL16 pentru preluarea forțelor laterale

Nivel	Grinzi cadru	Grinzi cadru	Stâlpi cadru	Stâlpi cadru
Niver	necontravântuit X	necontravântuit Y	necontravântuit X	necontravântuit Y
3	IPE500	IPE450	HE300B	HE260B
2	IPE500	IPE500	HE300B	HE260B
1	IPE550	IPE500	HE300B	HE260B

Tabelul 6. Secțiunile profilelor laminate utilizate în structura DBL16 pentru preluarea încărcărilor gravitaționale

Nivel	Grinzi secundare	Grinzi principale	Stâlpi centrali
3	IPE 220	IPE 400	HE 260 B
2	IPE 220	IPE 400	HE 260 B
1	IPE 220	IPE 400	HE 260 B

Tabelul 7. Secțiunile profilelor laminate ale cadrelor contravântuite și ale miezului diagonalelor utilizate în structura DBM16 pentru preluarea forțelor laterale

Nivel	Grinzi cadru contravântuit X și Y	Stâlpi cadru contravântuit X	Stâlpi cadru contravântuit Y	Secțiune diagonale (mm)
6	HE320A	HE260B	HE260B	15 x 40
5	HE320A	HE260B	HE260B	20 x 55
4	HE400A	HE280B	HE280B	25 x 60
3	HE400A	HE280B	HE280B	30 x 65
2	HE400A	HD320x158	HD320x198	30 x 75
1	HE400A	HD320x158	HD320x198	30 x 65

Tabelul 8. Secțiunile profilelor laminate ale cadrelor necontravântuite utilizate în structura DBM16pentru preluarea forțelor laterale

Nivol	Grinzi cadru	Grinzi cadru	Stâlpi cadru	Stâlpi cadru
NIVEI	necontravântuit X	necontravântuit Y	necontravântuit X	necontravântuit Y
6	IPE550	IPE500	HE400B	HE400B
5	IPE600	IPE600	HE400B	HE400B
4	HE550A	HE500A	HE450B	HE450B
3	HE550A	HE550A	HE450B	HE450B
2	HE600A	HE550A	HE500B	HE500B
1	HE600A	HE600A	HE500B	HE500B

Tabelul 9. Secțiunile profilelor laminate utilizate în structura DBM16 pentru preluarea încărcărilor gravitaționale

		<u> </u>	
Nivel	Grinzi secundare	Grinzi principale	Stâlpi centrali
6	IPE 220	IPE 400	HE 260 B
5	IPE 220	IPE 400	HE 260 B
4	IPE 220	IPE 400	HE 260 B
3	IPE 220	IPE 400	HE 260 M
2	IPE 220	IPE 400	HE 260 M
1	IPE 220	IPE 400	HE 260 M

2.2 Dezvoltarea și proiectarea conceptuală a dispozitivelor BRB "convenționale"

La proiectarea conceptuală a soluției contravântuiri cu flambaj împiedecat BRB "convențional", s-a avut în vedere respectarea următoarelor cerințe de proiectare privind:

- Prevenirea pierderii stabilității globale a tecii de oțel prin limitarea raportului dintre rezistența elastică de flambaj a tecii, P_e, și rezistența la curgere a miezului, P_y la valoarea P_e/P_y = 1,66 ≥ 1,5.
- Dimensionarea secțiunii miezului de oțel din zona disipativă: favorizarea apariției flambajului după axa slabă de inerție prin limitarea raportului dintre lățimea, b_c, și grosimea miezului, t_c, la valoarea b_c/t_c > 2
- Dimensionarea secțiunii miezului de oțel din zona de îmbinare: prevenirea pierderii stabilității platbandelor de oțel prin limitarea raportului dintre lățimea, b_j, și grosimea acestora, t_j, la valoarea b_j /t_j < 5.

În urma analizei structurale a cadrelor considerate, au rezultat mai multe capacități necesare ale contravântuirilor de tip BRB, dintre care au fost selectate două tipuri corespunzătoare unor capacități de 300 kN, respectiv, de 700 kN. Pentru aceste nivele ale capacității necesare au fost concepute soluțiile de principiu a două contravântuiri de tip BRB. În continuare se prezentă spre exemplificare soluția conceptuală aleasă și investigată numeric pentru contravântuirea de tip BRB cu capacitatea de 300 kN.

Respectând recomandările de proiectare enumerate în paragraful precedent, au fost propuse și testate numeric câteva geometrii ale miezul din oțel în vederea alegerii unei soluții optime. Soluția conceptuală aleasă pentru BRB-ul "convențional" cu o capacitate de 300 kN este prezentată în Figura 7. Sunt reprezentate în figură zonele componente, precum și dimensiunile geometrice ale acesteia.



Figura 7. Soluția conceptuală BRB-300kN "convențional"

2.3 Dezvoltarea și proiectarea conceptuală a dispozitivelor BRB "uscate"

Respectând recomandările de proiectare enumerate în secțiunea 0, a fost propusă și testată numeric geometria miezul din oțel rezultată pentru contravântuirea BRB-300 kN "convențională", la care s-a modificat mecanismul de împiedicare a flambajului. Soluția conceptuală aleasă pentru BRB-ul "uscat" cu o capacitate de 300 kN este prezentată în Figura 8. Sunt reprezentate în figură zonele componente, precum și dimensiunile geometrice ale acesteia.



2.4 Simulări numerice pe dispozitive BRB

2.4.1 Calibrarea parametrilor modelului numeric

Dezvoltarea conceptuală a dispozitivelor de contravântuire cu flambaj împiedecat "BRB convenționale" a avut ca punct de pornire investigațiile numerice efectuate pe modele cu element finit, cu ajutorul programul Abaqus/CAE 6.13.4. Modelul numeric adoptat a fost calibrat pe baza rezultatelor experimentale disponibile în literatura de specialitate (Dunai et al., 2011).



Figura 9. Modelul experimental de referință (Dunai et al., 2011).

În Figura 9 sunt prezentate: schema de principiu a BRB-ului împreună cu principalele dimensiuni geometrice și standul experimental, protocolul de încărcare și comportarea histeretică determinată

experimental. Simulările numerice efectuate cu ajutorul modelului numeric cu element finit au avut scopul de a furniza informații cu privire la o serie de parametrii (coeficientul de frecare, $c_f = 0,1$, și spațiile vertical ($s_v = 1mm$), și orizontal ($s_o = 0.2mm$), dintre miezul de oțel și beton), ce vor fi necesari la modelarea și proiectarea noilor modele de contravântuiri cu flambaj împiedecat "BRB".

Respectând schema geometrică și toate dimensiunile geometrice prezentate în Figura 9 s-a realizat un model numeric cu element finit al specimenului experimental (Dunai et al., 2011). În Figura 10 sunt prezentate părțile componente ale contravântuirii și modul de discretizare. Fiecare componentă (miezul de oțel, teaca tubulară și zona de beton) a fost modelată direct. Stratul de separație dintre miezul activ de oțel și zona de beton, cu rol de blocaj lateral, a fost modelat prin intermediul unei legi de contact fără grosime. Părțile asamblate constituie contravântuirea, realizată ca un micro-model (sunt reprezentate toate părțile componente) simplificat (stratul neaderent de rupere a legăturii este reprezentat cu ajutorul unei legi de contact).



Figura 10. Modelul numeric de referință

Luând în considerare numărul mare de suprafețe de contact, componentele independente precum și regimul de încărcare ciclic, s-a optat pentru o analiză de tip dinamic explicit. Pentru a reduce cât mai mult efectele dinamice a fost aleasă o scalare a masei de 0.0001 și o perioada de 79, realizându-se în acest fel efectul cvasi-static al încărcării.

Pentru a surprinde cât mai exact natura stării de solicitare spațială, toate componentele contravântuirii au fost modelate geometric cu elementelor solide tri-dimensionale deformabile. Discretizarea s-a făcut cu elemente finite tri-dimensionale cu scop general pentru analize structurale (tensiune/deplasare) C3D8I de forma hexaedrală cu opt noduri, cu o variație liniară a deplasărilor în lungul laturilor și moduri incompatibile. Introducerea unor moduri de deformație incompatibile este util pentru elementele liniare (de ordinul I) supuse la încovoiere. Pentru elementele cu forme cubice au aproape aceiași acuratețe ca elementele parabolice (de ordinul II). Corpurile geometrice cu forme complexe au fost partiționate în vederea realizării unor porțiuni cu forme regulate ce influențează pozitiv textura rețelei de discretizare, folosindu-se elemente finite de formă regulată și o dispunere uniformă a nodurilor. Acest fapt permite aplicarea unei tehnici structurate de generare a discretizării, și obținerea de elemente de formă hexaedrală, preferabile celor de formă tetraedrică.

Pentru fiecare material component, oțel și beton, au fost definite legi de comportare specifice. Pentru a reduce timpul de analiză, pentru beton și pentru elementele metalice auxiliare (teaca, capace etc.) au fost considerate doar caracteristicile elastice de comportare, și anume modulul de elasticitate longitudinal și coeficientul lui Poisson precum și greutatea volumică. Pentru beton au fost considerați următorii parametrii, E=21000 MPa, v =0,18, iar γ =2,5 E-9 N/mm2, și pentru oțel E=210000 MPa, v =0,3, iar γ =7,85 E-9 N/mm2.

Parametrii materialului din miezului de oțel s-au definit pentru a ține seama de comportarea inelastică, în regim de încărcare monoton și ciclic. Pentru simulările numerice în regim de încărcare monoton s-a definit curba de comportare uniaxială a oțelului, considerându-se criteriul de cedare plastică Huber-von Misses ($f_y = 282 MPa$, $f_u = 510 MPa$, $f_r = 490 MPa$). Curba caracteristică de

material reală utilizată în cadrul analizelor numerice monotonice (întindere / compresiune) este prezentată în Figura 11.



Figura 11. Curba caracteristică de material reală utilizată în cadrul încercărilor monotone

A fost aleasă opțiunea de consolidare combinată (izotropică și cinematică), fiind ceea mai potrivită pentru cazul încărcării ciclice. Parametrii consolidării cinematice (C_k si γ_k) și limita de curgere au fost introduși direct. Modelul folosit se bazează pe parametrii propuși de Lemaitre și Chaboche (1990), în vederea redării cât mai fidele a curbei histeretice, efectului Baushinger, consolidării, etc. Pentru a surprinde cât mai corect cumularea deformațiilor plastice, modelul Chaboche descompune curba caracteristică în trei zone de comportare; prima până la inițierea curgerii, cea de-a doua surprinde trecerea neliniară până la cea de-a treia zonă liniară în intervalul deformaților specifice mari. Au fost introduse 5 segmente de comportare cu următorii parametrii: (1) $C_1 = 25000 \text{ MPa}$, $\gamma_1 = 500$; (2) $C_2 = 21000 \text{ MPa}$, $\gamma_2 = 375$; (3) $C_3 = 5950 \text{ MPa}$, $\gamma_3 = 120$; (4) $C_4 = 935 \text{ MPa}$, $\gamma_4 = 25$; (5) $C_5 = 300 \text{ MPa}$, $\gamma_5 = 0$. A fost definită și evoluția zonei elastice prin intermediul opțiunii "Cyclic Hardening", prin introducerea directă a parametrilor de consolidare izotropică $Qi_{nfinity} = 60 \text{ MPa și } b = 4$.

Între toate suprafețele exterioare ale modelului numeric ("all with self") a fost definită o suprafață de contact de tip general, pentru a modela zona neaderentă dintre miezul de oțel și zona din beton de împiedecare a deplasărilor laterale. Legea de contact consideră ambele componente, în planul suprafețelor este considerată frecarea cu un coeficient de frecare $\mu = 0,1$, și perpendicular este introdusă o lege de tip "hard contact" ce nu introduce nicio presiune de contact până la contactul suprafețelor, iar odată intrate în contact presiunea de contact nu este limitată. De asemenea suprafețele intrate în contact sunt libere să se separe.

Între stratul de beton și teaca metalică a fost definită o constrângere de tip "tie", cea ce face ca toate gradele de libertate ale celor două suprafețe să fie identice.

Ambele capete ale zonei de tranziție au fost blocate. Încărcarea a fost aplicată la un capăt în control de deplasare. În Figura 12 este prezentat protocolul de încărcare ciclică, similar cu cel folosit în testul experimental. Încărcarea se aplică gradual folosind "smooth step", ceea ce ajută la păstrarea caracterului cvasi-static al simulării.



Figura 12. Protocolul de încărcare ciclică aplicat modelului FEM de referință

În urma simulărilor numerice a rezultat o foarte bună corelare între datele experimentale și rezultatele numerice. Astfel, modelul numeric este capabil să reproducă cu exactitate toate caracteristicile reale ale contravântuirii cu flambaj împiedecat testată experimental, în termeni de rigiditate inițială, consolidarea, forța de curgere si maximă, deplasarea la curgere, energia disipată, supra-rezistența la compresiune etc.



Figura 13. Curba forță-deplasare: experimental vs. numeric: (a) monotonic-întindere; (b) ciclic.

2.4.2 Simulări numerice pe soluția BRB-300 kN "convențional"

Pe baza concluziilor și rezultatelor modelului numeric calibrat anterior a fost realizat un model numeric detaliat pentru soluția aleasă în cadrul proiectului. S-au păstrat toți parametrii determinați anterior în urma calibrării numerice a testelor experimentale. Geometria modelului cu element finit al soluției conceptuale BRB-300kN, și discretizarea miezului din oțel, sunt prezentate în Figura 14. Discretizarea subansamblurilor s-a făcut cu elemente finite tri-dimensionale de tip C3D8I. Elementele solicitate preponderent în domeniul elastic (teacă, beton) au fost discretizate grosier (25 mm); discretizarea miezului a fost mai fină în vederea creșterii acurateței rezultatelor (10 mm).



Figura 14. Modelul FEM al BRB-300kN "convențional": (a) neasamblat, (b) asamblat; (c) vedere laterală.

În vederea împiedicării glisării libere a betonului și tecii relativ față de miez, au fost create două legături de tip "tie – surface to surface", local în zona centrală, între fețele laterale ale miezului și fețele interioare ale betonului. Acestea au rolul de a simula prezența opritorilor în zona centrală din BRB-ul real. Aplicarea încărcării în cazul încercărilor monotone de întindere și compresiune a fost similară cu cea pentru modelul calibrat, prin introducerea unei cedării de reazem controlate.

În urma rezultatelor numerice au fost determinați parametrii de comportare ai BRB-ului necesari determinării parametrilor de proiectare. A fost determinată comportarea BRB la solicitări monotone de întindere și compresiune (vezi Figura 15), precum și răspunsul în regim de încărcare ciclic aplicând un protocol de încărcare prevăzut în AISC 341-10 (vezi Figura 16). Rezultatele simulărilor numerice în regim de încărcare ciclic cu protocolul AISC, sunt prezentare în Figura 17.



BRB-300kN - "convențional": FEM monotonic uniaxial întindere/compresiune

Figura 15. BRB-300kN "convențional": rezultate FEM - monotonic întindere/compresiune



Figura 16. Protocolul de încărcare AISC.



Figura 17. BRB-300kN "convențional": rezultate FEM – ciclic (protocol AISC)

În urma simulărilor numerice în regim de încărcare ciclic au rezultat următoarele valori ale parametrilor definitorii ale BRB-ului: rigiditatea inițială, $K_{el,FEM}$ = 73628 [N/mm]; factorul de supra-rezistență datorat consolidării oțelului: ω = 1,44; factorul de supra-rezistență la compresiune β = 1,12.

2.4.3 Simulări numerice pe soluția BRB-300 kN "uscat"

În Figura 18 este prezentat modelul numeric al contravântuirii BRB-300 kN "uscat". Discretizarea subansamblurilor s-a făcut cu elemente finite tri-dimensionale de tip C3D8I. Elementele solicitate preponderent în domeniul elastic (teacă, beton) au fost discretizate grosier (25 mm); discretizarea miezului a fost mai fină în vederea creșterii acurateței rezultatelor (10 mm).



Figura 18. Modelul FEM al BRB-300kN "uscat": (a) neasamblat, (b) asamblat; (c) vedere laterală.

În urma rezultatelor numerice au fost determinați parametrii de comportare ai BRB-ului necesari determinării parametrilor de proiectare. A fost determinată comportarea BRB la solicitări monotone de întindere și compresiune (vezi Figura 19), precum și răspunsul în regim de încărcare ciclic (vezi Figura 20).



Figura 19. BRB-300kN "uscat": rezultate FEM - monotonic întindere/compresiune.



Figura 20. BRB-300kN "uscat": rezultate FEM – ciclic (protocol AISC).

2.5 Evaluarea performanței seismice a cadrelor din oțel cu BRB

Performanța seismică a cadrelor cu BRB-uri a fost evaluată pentru trei obiective de performanță (Tabelul 10):

- Starea limită (sau nivel de performanță) de serviciu (SLS), asociată unui nivel al hazardului seismic caracterizat de un interval mediu de recurență (IMR) de 42 de ani.
- Starea limită ultimă (SLU), asociată unui nivel al hazardului seismic caracterizat de un interval mediu de recurență (IMR) de 224 de ani.
- Starea limită de prevenire a colapsului (PC), asociată unui nivel al hazardului seismic caracterizat de un interval mediu de recurență (IMR) de 975 de ani.

Nivelul de referință al hazardului seismic (definit prin accelerația de vârf a terenului *a*_g, precum și spectrul de răspuns elastic) a fost considerat cel asociat unui interval mediu de recurență de 224 de ani, folosit la proiectarea structurilor conform P100-1/2013. Valorile accelerației de vârf a terenului asociate intervalelor medii de recurență de 42 și 975 de ani s-au stabilit pe baza curbelor de hazard seismic pentru cele două amplasamente (Timișoara și București) descrise în Văcăreanu et al., 2014.

TUDEN	rubelui 10. Nivele de nazardalai seisinie și nivele de performanța considerate.						
Nivelul de Nivelul hazardı		lul hazardului seismic	Timișoara		București		
performanță structurală	IMR, ani	Probabilitatea de depășire în 50 de ani	<i>a_g,</i> g	ag/ag,SLU	a _g , g	ag/ag,SLU	
SLS	42	0.7	0.072	0.36	0.150	0.50	
SLU	224	0.2	0.200	1.00	0.300	1.00	
PC	975	0.05	0.428	2.14	0.465	1.55	

Tabelul 10. Nivele ale hazardului seismic și nivele de performanță considerate.

Performanța seismică a structurilor cu BRB-uri a fost evaluată folosind două metode de calcul: static neliniar (pushover) și dinamic neliniar.

Analizele statice neliniare s-au efectuat conform prevederilor din P100-1/2013, pentru două distribuții de forțe laterale, triunghiulară și uniformă. S-a adoptat câte un model plan al structurii pentru fiecare direcție orizontală a structurii. BRB-urile au fost modelate cu ajutorul unui element de tip bară, cu secțiunea egală cu cea a zonei plastice. S-a folosit un factor de ajustare a ariei transversale, pentru a corecta rigiditatea sistemului. Comportarea neliniară al BRB-urilor fost modelată cu ajutorul unei articulații plastice de forță axială, plasate la jumătatea diagonalei.

Caracteristicile articulației plastice au fost adoptate din ASCE/SEI 41-13 (2014). Au fost prevăzute articulații plastice la capătul stâlpilor, la capătul grinzilor de cadru la sistemele duale, cât și în zonele potențial plastice ale grinzilor cadrelor contravântuite. Articulațiile plastice prevăzute la stâlpi au fost de tip ductil / fragil, funcție de nivelul de forță axială, pentru a indica eventuala plasticizare sau cedare a acestora. Articulațiile plastice prevăzute la grinzi au fost de tip ductil. Toate articulațiile plastice prevăzute la stâlpi și grinzi au fost modelate conform prevederilor din ASCE/SEI 41-13 (2014).

Pentru estimarea cerinței de deplasare s-a folosit metoda N2 (Fajfar, 2000). Pentru biliniarizarea curbei de capacitate s-a preferat metoda din P100-1/2013, mai potrivită pentru structurile din oțel. Performanța structurilor a fost evaluată în termeni de cerințe de deformații inelastice în componentele ductile, respectiv eforturi în componentele fragile. A fost monitorizată de asemenea și dezvoltarea mecanismul plastic.

Figura 21 prezintă curbele de capacitate pentru setul de structuri cu 3 nivele amplasate la București, oferind o comparație globală a celor patru sisteme structurale din punct de vedere al rigidității, rezistenței și ductilității. Se poate observa faptul că rigiditatea structurilor cu BRB-uri (BL16 și DL16) ocupă o poziție intermediară între cea a structurii cu contravântuiri convenționale (CL16) și a cadrului necontravântuit (ML16). Rezistența la curgere a cadrelor cu BRB-uri este cea mai mică, datorită valorii ridicate a factorului de comportare q. Pe de lată parte, cadrele necontravântuite au cea mai mare rezistență, datorită proiectării guvernate de condiții de rigiditate. Toate structurile au o ductilitate globală importantă. Structura duală cu BRB-uri (DL16) are ca efect o suprarezistență importantă comparativ cu structura BL16.



Figura 21. Curbele de capacitate pentru structurile BL16, CL16, DL16 și ML16.

contravantuiri cu flambaj impledicat.												
Structură	Obiectiv de performanță											
	SLS – IMR=42 de ani			SLU – IMR=224 de ani			PC – IMR=975 de ani					
	$(\Delta/\Delta_y)_{Ed}$	$(\Delta/\Delta_y)_{Rd}$	E_d/R_d	$(\Delta/\Delta_y)_{Ed}$	$(\Delta/\Delta_y)_{Rd}$	E_d/R_d	$(\Delta/\Delta_y)_{Ed}$	$(\Delta/\Delta_y)_{Rd}$	E_d/R_d			
BL16	3.59	3.00	1.20	9.63	10.00	0.96	-	13.30	-			
BM16	2.96	3.00	0.99	7.24	10.00	0.72	12.93	13.30	0.97			
BL07	1.37	3.00	0.46	4.91	10.00	0.49	10.20	13.30	0.77			
BM07	1.31	3.00	0.44	4.84	10.00	0.48	9.71	13.30	0.73			

Tabelul 11: Deformații în elementele BRB pentru distribuția modală de forțe laterale la cadrele cu contravântuiri cu flambaj împiedicat.

Cerințele de deformații plastice în elementele disipative pentru cadrele BRBF sunt prezentate sintetic în Tabelul 11, iar nivelul de solicitare în elementele nedisipative – în Tabelul 12. Figura 22 prezintă deformata structurii și articulațiile plastice aferente celor tre nivele de hazard seismic. Structurile amplasate la Timișoara au o performanță satisfăcătoare la toate cele trei stări limită (SLS, SLU și PC). Structurile amplasate la București sunt caracterizate de cerințe mult mai ridicate, criteriile de performanță fiind depășite în câteva cazuri (structura BL16 la SLS și PC). O tendință similară se poate observa și în cazul structurilor duale cu BRB-uri.

Tabelul 12: Nivelul de solicitare al grinzilor și stâlpilor BRBF (E_d/R_d) pentru distribuția modală de forțe laterale la cadrele cu contravântuiri cu flambaj împiedicat.

	Obiectiv de performanță									
Structură	SLS – IMR	=42 de ani	SLS – IMR	=42 de ani	SLS – IMR=42 de ani					
	Grinzi	Stâlpi	Grinzi	Stâlpi	Grinzi	Stâlpi				
BL16	0.17	0.07	0.17	0.10	-	-				
BM16	0.28	0.04	0.29	0.12	0.21	0.23				
BL07	0.14	0.03	0.29	0.06	0.29	0.12				
BM07	0.18	0.04	0.33	0.08	0.35	0.15				





2.6 Coordonare, administrare, raportare și publicarea rezultatelor

Pentru coordonarea activităților desfășurate în cadrul proiectului a fost organizată o ședință de lucru: la Timișoara, la sediul SC Hydromatic Sistem SRL (P2). În plus, s-au desfășurat mai multe întruniri bilaterale (P1-CO) la distanță. Principalul rezultat al acestora 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 minutelor ședințelor etc.

Diseminarea a avut loc prin prezentarea rezultatelor obținute în cadrul proiectului la conferințe și simpozioane:

- Stratan, A., Voica, F., Marcu, D., Zub, C., Dubina, D. (2015). "Proiectarea structurilor din oțel cu contravântuiri cu flambaj împiedicat conform P100-1/2013." "Construiește cu STEEL", A 14-a Conferință Națională de Construcții Metalice, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 19-20 Noiembrie 2015, ISBN 978-973-713-334-2, pp. 121–131.
- [2] Stratan, A., Dogariu, A., Zub, C., Dinu, F., Dubina, D. (2015). "Consolidarea cadrelor din beton armat folosind contravântuiri cu flambaj împiedicat: generalități și studiu de caz". Lucrările seminarului "Tehnici de consolidare anti-seismică a clădirilor existente bazate pe utilizarea oțelului", Timișoara, 23 Noiembrie 2015. Editura Orizonturi Universitare, Editor: Dan Dubina, ISBN: 978-973-638-608-4, pp. 100-137.
- [3] Stratan, A., Voica, F., Zub, C. (2015). "Capacity, stiffness and ductility demands of BRB's in relation with the target application". Workshop on "Steel for industrial and commercial buildings in earthquake prone regions", Tampere, Finland, 25 September 2015.
- [4] Stratan, A., Dubina, D., Voica, F., Dogariu, A., Zub, C. (2015). "Design requirements for buckling restrained braces for different target applications". Workshop on "Structural steel solutions in earthquake-prone areas: design and retrofitting", Volos, Greece, 4 December 2015.
- [5] Zub, C., Stratan, A., Dogariu, A., Dubina, D. (2015). "Numerical simulation of cyclic behaviour of buckling restrained braces". Eleventh International Miklós Iványi PhD & DLA Symposium, Pécs, Hungary, 19-20 October 2015.

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

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 - <u>http://www.steelconstruct.com/</u>), precum și a subcomitetului 8 "Eurocode 8: Calculul structurilor la acțiunea seismică" al Comitetului European de Standardizare (CEN/TC250/SC8 - <u>http://standards.cen.eu/</u>).

În activitatea de cercetare desfășurată în cadrul proiectului au fost implicați studenți din ciclul master și doctorat. Astfel, membri ai echipei de cercetare de la Universitatea Politehnica din Timișoara (CO) coordonează două lucrări de disertație cu titlul "Performanța seismică a cadrelor cu contravântuiri cu flambaj împiedicat" și "Influence of detailing parameters of buckling restrained braces using finite element analyses", precum și o teză de doctorat cu titlul "Soluții de reabilitare seismică a structurilor în cadre din beton armat cu sisteme disipative realizate din oțel".

3 Concluzii

Raportul tehnic și științific a sintetizat activitățile desfășurate în cadrul etapei 2 / 2015 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 proiectate structurile contravântuite centric și cele duale cu contravântuiri împiedicate la flambaj (activitatea 2.1). Au fost dezvoltate și proiectate conceptual câte două contravântuiri (cu capacitatea de 300 kN și 700 kN) în varianta "convențională" și "uscată" (activitățile 2.2 și 2.3). Performanța acestor dispozitive a fost verificată prin simulări numerice (activitatea 2.4). Performanța seismică la nivel de structură a cadrelor cu BRB-uri a fost evaluată folosind analize statice neliniare și dinamice neliniare (activitatea 2.5). Rezultatele obținute au fost diseminate prin intermediul paginii web a proiectului, prin publicarea și prezentarea a 5 lucrări în cadrul unor conferințe și simpozioane.

Bibliografie

AISC 341-10 (2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago, Illinois, USA.

ASCE/SEI 41-13 (2014). "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings". American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Chaboche, J.L., (1990). "Mehanics of Solid Materials", Cambridge University Press, ISBN 978-0521477581.

Dunai, L., Zsarnóczay, A., Kaltenbach, L., Kálló, M., Kachichian, M., Halász, A. (2011) "Type testing of Buckling Restrained Braces according to EN 15129 – EWC800 – Final report". http://www.starseismic.eu/pdf/110315%20Final%20report%20EWC800.pdf.

Fajfar, P. (2000). "A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design." Earthquake Spectra, 16(3), 573–592.

P100-1 (2013): "Cod de proiectare seismică. Partea I: prevederi de proiectare pentru clădiri;

Văcăreanu, R., Lungu, D., Aldea, A., Demetriu, S., Pave,I.F., Arion, C., Iancovici, M., Neagu, C. (2014). "Probabilistic seismic hazard assessment for Romania. Part III: Seismic Hazard Maps". In: Vacareanu, R., Ionescu, C. (eds). Proceedings of the 5th National Conference on Earthquake Engineering & 1st National Conference on Earthquake Engineering and Seismology, CONSPRESS, Bucharest, pp. 229-236.