
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 final

Cuprins

1	INTRODUCERE.....	3
2	OBIECTIVE	3
3	SINTEZA ACTIVITĂȚILOR.....	4
4	CONCLUZII	18

1 Introducere

Contravântuirile cu flambaj împiedicat au un potențial ridicat în domeniul proiectării antiseismice a structurilor datorită ductilității ridicate și a răspunsului ciclic simetric, comparativ cu contravântuirile convenționale. Acestea pot fi folosite atât pentru structuri noi cât și pentru reabilitarea structurilor existente din beton armat, oțel sau zidărie. Cadrele cu BRB-uri furnizează două proprietăți cheie ale structurilor anti-seismice: rigiditatea ridicată (pentru reducerea deplasărilor relative de nivel la cutremure moderate) și ductilitate (pentru capacitatea de disipare de energie în cazul unor cutremure severe). BRB-urile au fost studiate intens la nivel mondial în ultimii 30 de ani și se regăsesc în multe aplicații practice în special în Japonia și Statele Unite. Deși au fost studiate și în Europa, ele se regăsesc aici în foarte puține aplicații. Această situație se datorează mai multor motive: lipsa prevederilor de proiectare din EN 1998-1, necunoașterea sistemului de către inginerii proiectanți practicieni, nevoia de validare experimentală a sistemului (ceea de conduce la creșterea costurilor și creșterea timpului necesar pentru implementarea proiectului) și caracterul de dispozitive brevetate pe care o au majoritatea BRB-urilor.

Acest proiect s-a adresat unui tip relativ nou de sistem structural antiseismic: cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedicat (BRB). Codul românesc de proiectare seismică (P100-1/2013) a introdus prescripții de proiectare pentru cadre din oțel cu BRB, în premieră în Europa.

Proiectul a fost construit pe parteneriatul între trei actori importanți în industria de construcții: o organizație de cercetare (Universitatea Politehnica Timișoara), un proiectant (SC Popp & Asociații SRL) și un fabricant (SC Hydromatic Sistem SRL). Acest parteneriat a făcut ca problema studiată să fie adresată într-o manieră sistematică și holistică facilitând astfel tranziția unui produs inovativ (contravântuiri cu flambaj împiedicat) de la cercetare la practică, garantând faptul că produsul final nu este doar inovativ ci și fiabil.

2 Obiective

Proiectul de față a avut ca obiectiv principal implementarea BRB-urilor în practica de proiectare din România, prin întreprinderea următoarelor acțiuni:

- Dezvoltarea a două prototipuri de BRB-uri diferite: unul "convențional" și unul "uscat".
- Realizarea unui program experimental de precalificare, pe un set de BRB-uri de capacități diferite, pentru eliminarea necesității efectuării de încercări experimentale pentru fiecare proiect, cel puțin pentru situațiile de proiectare mai frecvente.
- Transferul de cunoștințe despre proiectarea și fabricarea dispozitivelor BRB către partenerul industrial, în vederea producerii în serie a acestora.
- Dezvoltarea unui ghid de proiectare pentru contravântuiri cu flambaj împiedicat (la nivel de dispozitiv).
- Dezvoltarea unui ghid de proiectare și exemple de calcul pentru structuri din oțel cu BRB-uri (la nivel de sistem).
- Diseminarea rezultatelor proiectului în rândul inginerilor practicieni prin intermediul a două seminarii organizate la București și Timișoara, precum și a publicării rezultatelor obținute în cadrul lucrărilor unor conferințe științifice.

3 Sinteza activităților

În cele ce urmează se prezintă, defalcat pe etape și activități, realizarea acestor obiective, evidențiind gradul de atingere a rezultatelor estimate.

Act. 1.1 Selectarea unor configurații tipice de clădiri cu înălțimea mică și medie.

(100 %) 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 (3 niveluri) și mediu (6 niveluri). 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). Deși a trebuie să se reducă numărul structurilor selectate (la nouă) datorită reducerii finanțării, partenerul P1 le-a proiectat pe toate 16 (vezi Tabelul 1).

Tabelul 1. Caracteristicile principale ale structurilor selectate.

Înălțime	Amplasament	MRF	CBF	BRBF	D-BRBF
Joasă (P+2)	$T_C = 0.7s$ (TM)	ML07	CL07	BL07	DBL07
	$T_C = 1.6s$ (BUC)	ML16	CL16	BL16	DBL16
Medie (P+5)	$T_C = 0.7s$ (TM)	MH07	CM07	BM07	DBM07
	$T_C = 1.6s$ (BUC)	MH16	CM16	BM16	DBM16

Act. 1.2 Proiectarea structurilor model cu BRB.

(100 %) Au fost proiectate patru structuri cu BRB-uri, câte două pentru fiecare amplasament (cu trei și cu 6 niveluri). Folosind modele spațiale într-un program de calcul comercial, aceste structuri au fost proiectate utilizând conceptul de comportare disipativă, clasa de ductilitate înaltă a structurii DCH (factor de comportare $q=6,5$).

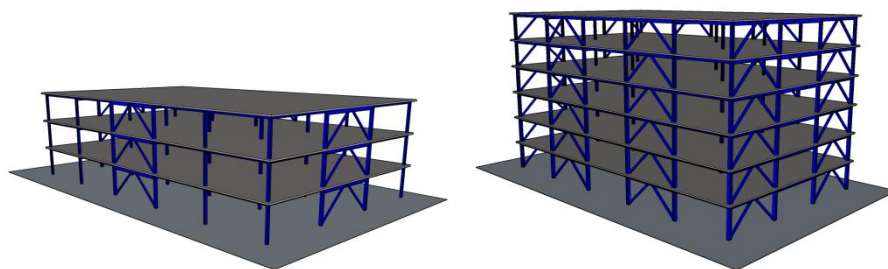


Figura 1. Schema spațială a structurilor cu BRB-uri.

Act. 1.3 Selectarea unor capacități tipice ale BRB

(100 %) Valorile de calcul ale rezistenței dispozitivelor BRB (N_{Rd}) pentru structurile proiectate a variat într-o plajă largă: de la 136 kN la 839 kN. AISC 341 (2010) prevede ca rezistența dispozitivului BRB încercat experimental în scopul calificării acestuia trebuie să fie cuprinsă într-un interval de 50% - 120% din rezistența prototipului. Aplicând acest principiu unor BRB-uri cu capacitatea de calcul N_{Rd} de 300 kN, respectiv 700 kN, rezultă că se poate acoperi o plajă de capacități ale prototipurilor cuprinse între 150 kN și 360 kN, respectiv 350 kN și 840 kN. Cumulat, pentru ambele capacități, rezultă o plajă de 150 kN – 840 kN.

Act. 1.4 Sinteza informației existente despre performanța și proiectarea dispozitivelor BRB

(100 %) A fost realizată o sinteză amplă, cuprinzând mai multe subiecte de interes atât despre BRB-urile „convenționale”, cât și despre cele „uscate”: concepte de alcătuire a miezului și a mecanismului de împiedicare a flambajului (BRM), recomandări de proiectare, recomandări tehnologice, materiale utilizate, modelare numerică, evaluarea performanței ciclice.

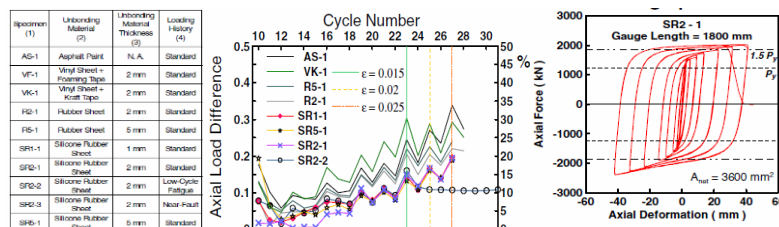


Figura 2. Încercări experimentale pe BRB-uri cu diferite interfețe neaderente

Act. 1.5 Proiectarea structurilor model necontravântuite

(100 %) Au fost proiectate patru structuri cu BRB-uri, câte două pentru fiecare amplasament (cu trei și cu 6 niveluri). Folosind modele spațiale într-un program de calcul comercial, aceste structuri au fost proiectate utilizând conceptul de comportare disipativă, clasa de ductilitate înaltă a structurii DCH (factor de comportare $q=6,5$). Suplimentar, s-a efectuat un calcul comparativ pentru $q=3,0$ pentru a obține un sistem structural mai economic și evitarea creșterii dimensiunilor elementelor structurale.

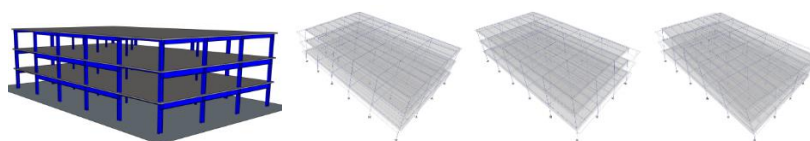


Figura 3. Structura necontravântuită: schema spațială și moduri proprii de vibrație

Act. 1.6 Coordonare, administrare, raportare și publicarea rezultatelor

(100 %) Au fost organizate două ședințe de lucru: una la București, la sediul SC Popp & Asociații SRL (P1) și alta la Timișoara, la sediul SC Hydromatic Sistem SRL (P2). Principalul rezultat al acestora a constat în stabilirea clară a sarcinilor fiecărui partener, a modului de elaborare a rapoartelor tehnice și financiare, precum și selectarea unor configurații tipice de clădiri cu înălțimea mică și medie. În plus, s-au desfășurat mai multe întruniri bilaterale (P1-CO) la distanță, în vederea identificării unor soluții optime de proiectare.

Act. 2.1 Proiectarea structurilor model contravântuite centric și duale

(100 %) Au fost proiectate opt structuri (CL07, CL16, CM07, CM16, DBL07, DBL16, DBM07 și DBM16). S-a adoptat conceptul de comportare disipativă, clasa de ductilitate înaltă a structurii DCH. Pentru cadrele duale cu contravântuiri cu flambaj împiedicat s-a utilizat un factor de comportare $q= 6,0$, iar pentru cadrele contravântuite centric, $q=2,5$.

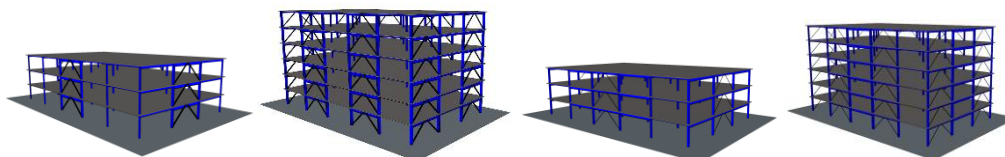


Figura 4. Schema spațială a structurilor: CL16, CM16, DBL și DBM

Act. 2.2 Dezvoltarea și proiectarea conceptuală a dispozitivelor BRB "convenționale"

(100 %) La proiectarea conceptuală a soluției BRB „convențional”, s-a avut în vedere respectarea următoarelor cerințe de proiectare privind: capacitatea nominală: $N_{pl} = 300 \text{ kN}$ și 700 kN ; forma secțiunii transversale a miezului: dreptunghiulară și pătrată (pentru a evalua influența formei miezului); metodologia de proiectare a BRM-ului: $N_{cr}/N_{pl} = 1,5$ și $3,0$ (pentru a evalua metodologia de proiectare propusă de literatură).

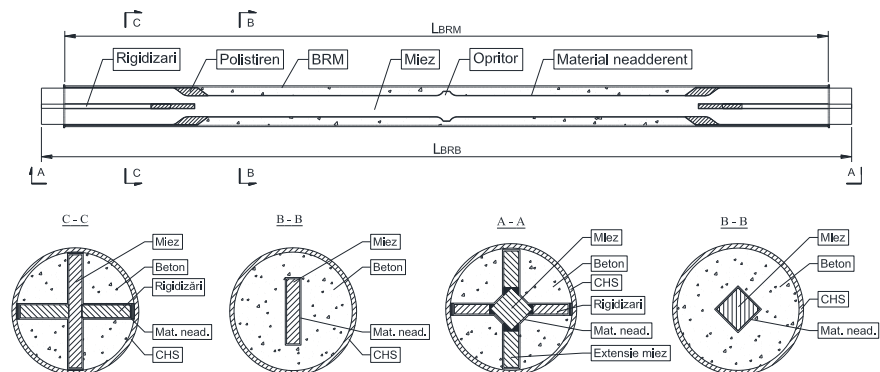


Figura 5. Soluțiile conceptuale ale BRB-ului „convențional”

Act. 2.3 Dezvoltarea și proiectarea conceptuală a dispozitivelor BRB "uscate"

(100 %) La proiectarea conceptuală a soluției BRB „uscat”, s-a avut în vedere respectarea următoarelor cerințe de proiectare privind: capacitatea nominală: $N_{pl} = 300 \text{ kN}$ și 700 kN ; forma secțiunii transversale a miezului: dreptunghiulară; metodologia de proiectare a BRM-ului: $N_{cr}/N_{pl} = 3,0$.

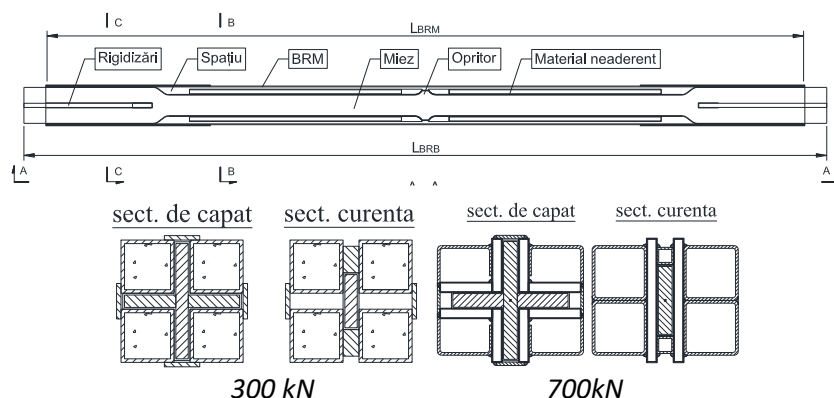


Figura 6. Soluțiile conceptuale ale BRB-ului „uscat”

Act. 2.4 Simulări numerice pe dispozitive BRB

(100 %) 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. A fost efectuat un program de pretestări numerice în vederea determinării soluției optime și analizei răspunsului ciclic.

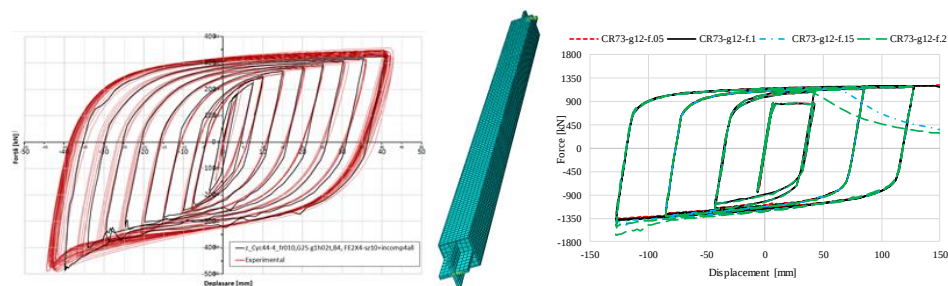


Figura 7. Calibrarea model MEF BRB. Dezvoltare BRB pe baza analizelor MEF

Act. 2.5 Evaluarea performanței seismice a cadrelor din oțel cu BRB

(100 %) Performanța seismică a cadrelor cu BRB-uri a fost evaluată pentru trei obiective de performanță: starea limită de serviciu (SLS), starea limită ultimă (SLU), starea limită de prevenire a colapsului (PC). Performanța seismică a structurilor cu BRB-uri a fost evaluată folosind două metode de calcul: static nelinier (pushover) și dinamic nelinier.

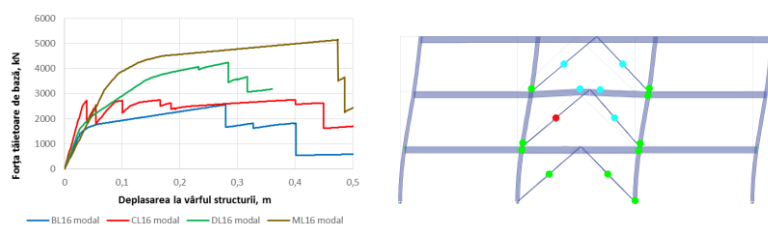


Figura 8. . Curbele de capacitate pentru structurile analizate. Deformata structurii și articulațiile plastice formate la PC

Act. 2.6 Coordonare, administrare, raportare și publicarea rezultatelor

(100 %) 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. Diseminarea a avut loc prin prezentarea rezultatelor obținute în cadrul proiectului la conferințe și simpozioane.

Act. 3.1 Proiectare finală, desene și caiet de sarcini pentru speciamentele experimentale

(100 %) În cadrul acestei etape s-au elaborat proiectul tehnic și proiectului de execuție pentru specimene și standul experimental. Elaborarea proiectului tehnic pentru specimene a avut la bază metodologia finală de proiectare a contravântuirilor cu flambaj împiedicat (BRB). Proiectul tehnic pentru standul experimental a constat în proiectarea elementelor principale ale acestuia (stâlp, îmbinări), în determinarea capacităților necesare și numărul actuatorilor hidraulici pe baza forțelor maxime dezvoltate de BRB-uri, alcătuirea unui sistem de ghidare. S-a elaborat caietul de sarcini, care conține condițiile tehnice de execuție ale BRB-urilor și tehnologia fabricării acestora. Caietul de sarcini face referire la următoarele aspecte: date generale despre proiect, materiale utilizate, etapele de realizare BRB/stand, proceduri și tehnologii de execuție, condiții de calitate și recepție a pieselor, elementelor și ansamblurilor. În cadrul etapelor de realizare a BRB-urilor, au fost elaborate: tehnologia de aplicare a unui strat neaderent între miezul de oțel și mortar, tehnologia de punerea în operă a mortarului și tehnologia de sudare a elementelor structurale. Au fost realizate extrase de materiale atât pentru BRB-uri cât și pentru stand.

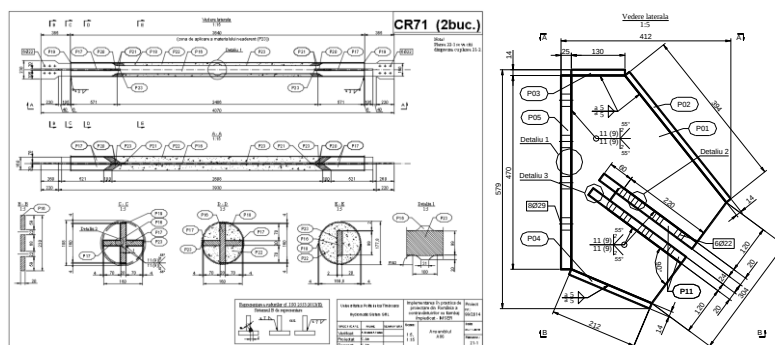


Figura 9. Planșele de execuție pentru BRB și îmbinarea cu șuruburi BRB-guseu-stâlp

Act. 3.2 Fabricarea specimenelor experimentale și a standului de încercare

(100 %) În cadrul acestei etape, pe baza cerințelor din proiectul tehnic și a celor din caietul de sarcini au fost fabricate 14 BRB-uri, 9 specimene pentru studiul zonei de tranziție, standul experimental și seturi a câte trei epruvete pentru încercări la tracțiune. Au fost fabricate 10 BRB-uri „convenționale” și 4 BRB-uri „uscate”. Au fost fabricate piesele pentru cele două standuri corespunzătoare celor două capacități ale BRB-urilor, de 300 kN și 700 kN.

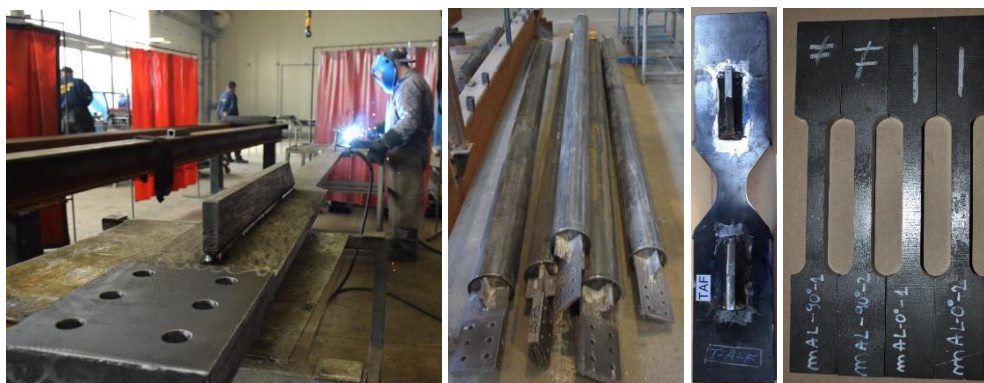


Figura 10. Fabricarea specimenelor BRB, a zonelor de tranziție și a epruvetelor

Act. 3.3 Încercarea experimentală a dispozitivelor BRB

(100 %) Au fost încercate ciclic 14 BRB-uri. Protocolul de încărcare adoptat a fost bazat pe specificațiile codului american AISC 341-10, la care s-a alternat sensul de aplicare a încărcării (întindere sau compresiune), în cazurile în care au existat dubluri de specimene. Subansamblul cu ajutorul căruia s-au încercat BRB-urile corespunde prevederilor din AISC 341-10, fiind alcătuit dintr-un stâlp articulat la bază și BRB-ul conectat de grinda de reacțiune și, respectiv, de stâlp cu îmbinări cu șuruburi. În vederea limitării deplasării (rotirii) în afara planului ale stâlpului, a fost prevăzut un sistem de ghidare prins de grinda de reacțiune, iar pe stâlp au fost dispuse două elemente metalice de ghidare prevăzute la capete cu elemente din teflon în vederea reducerii frecării ($\mu = 0,05$ în contact cu oțel). Încărcarea a fost aplicată la partea superioară a stâlpului în control de deplasare prin intermediul unuia sau a doi actuatori, funcție de capacitatea BRB-ului încercat. Toate speci-menele BRB au fost încercate cu un protocol ciclic bazat pe specificațiile din ANSI/AISC 341-10.

Pentru a monitoriza deplasările globale ale standului experimental și deformațiile locale ale diverselor elemente monitorizate (miez, BRM, îmbinări), au fost utilizați 19 captori de deplasare.

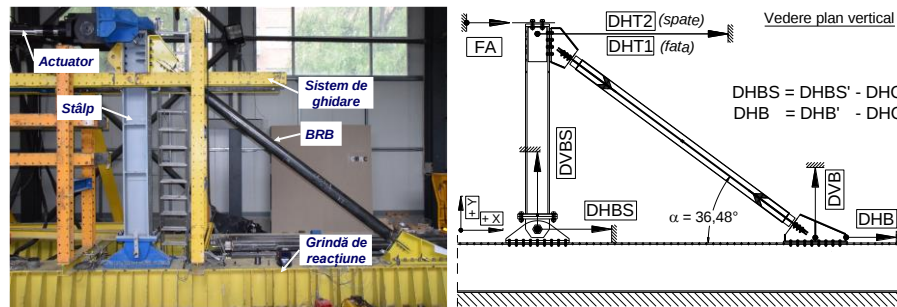


Figura 11. Standul experimental și dispunerea captorilor globali

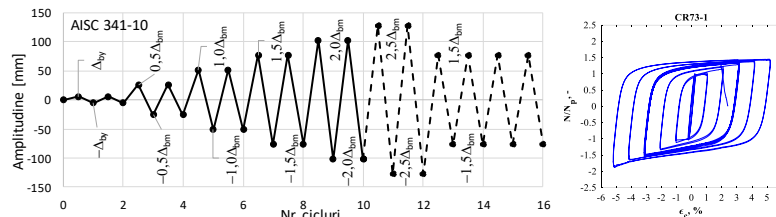


Figura 12. Protocolul de încărcare ANSI/AISC 341-10 (2010) și răspunsul ciclic pentru un BRB „convențional” de 700 kN

Act. 3.4 Evaluarea criteriilor de performanță a dispozitivelor BRB

(100 %)

În cadrul acestei activități au fost prelucrate datele prelevate din cadrul activității 3.3. Au fost determinați o serie de parametri, cum ar fi: deformația axială a miezului BRB, D_c , deformația axială a părții superioare miezului BRB, D_{ct} , deformația axială a îmbinării la partea superioară a BRB-ului, D_{jt} , rotirea îmbinării în afara planului cadrului la partea superioară a BRB-ului, $\theta_{jt,o}$, rotirea tecii față de miez în afara planului cadrului la partea superioară a BRB-ului, $\theta_{bt,o}$, rotirea tecii în afara planului cadrului la partea superioară a BRB-ului, $\theta_{t,o}$, deformația axială totală a BRB-ului, D_T , forța laterală, V_b , forța axială în contravântuirea cu flambaj împiedicat, N , deplasarea relativă de nivel a structurii de referință (BRBF), neglijând deformațiile îmbinărilor, D_{FB} , factorul de consolidare, ω , factorul de suprazistență la compresiune, β , energia histeretică E_h , deformația plastică cumulativă, η .

Act. 3.5 Coordonarea și organizarea activităților de cercetare, participare conferințe și workshop-uri, participare grupuri de lucru ECCS TC13 și CEN SC8, publicare articole

(100 %)

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 minutelor ședințelor etc. Pentru a urmări cercetările recente în domeniu, membrii echipei de cercetare au participat la două lucrări științifice: (1) Eighth International Workshop on Connections in Steel Structures (Connections VIII), 24-26 mai 2016, Boston, SUA și (2) The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures – SDSS'2016, 30 mai – 01 iunie 2016, Timișoara, România. 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 o lucrare de disertație cu titlul "Performanța seismică a cadrelor cu contravântuiri cu flambaj împiedicat", 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".

Act. 3.6 Întâlniri de lucru pentru pregătirea și analiza încercărilor experimentale

(100 %) Pentru coordonarea activităților desfășurate în cadrul proiectului a fost organizată o ședință de lucru la Timișoara, la sediul UPT, precum și o întrunire la distanță. Aceasta a permis un schimb de informații eficient în ceea ce privește dezvoltarea soluției tehnice finale pentru contravântuirile cu flambaj împiedicat, prin înglobarea experienței specifice fiecărui partener (CO – cercetare, P1 – proiectare și P2 – fabricare). În plus, au avut loc mai multe întruniri bilaterale CO-P2 necesare în faza de fabricare și încercare experimentală a contravântuirilor cu flambaj împiedicat.

Act. 4.1 Dispozitive BRB precalificate și ghid de proiectare

(100 %) În cadrul acestei etape au fost determinate 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. Calificarea dispozitivelor BRB a avut în vedere satisfacerea mai multor criterii, iar îndeplinirea acestora este prezentată în Tabelul 2:

- 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.
- 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 speciamele 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”.

Tabelul 2. Calificarea 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

Pe baza rezultatelor sintetizate în Tabelul 2, s-a concluzionat faptul că soluția BRB optimă pentru care să se elaboreze ghidul de proiectare, să fie BRB-ul „convențional” cu miez frezat, cu raportul $N_{cr}/N_p = 3$.

Elaborarea ghidului de proiectare pentru dispozitivele BRB precalificate (UPT, HMS) a avut la bază rezultatele experimentale obținute pe speciamele CRx3 care au avut capacități nominale de 300 kN, CR33, respectiv 700 kN, CR73. Au fost determinate valorile

recomandate a fi utilizate în cadrul proiectării unor noi BRB-uri pentru o serie de factori ce descriu comportamentul specimenelor calificate.

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

Tabelul 3. Valori recomandate în proiectarea BRB-urilor

ω	β	$\varepsilon_{c,max}$
1.45	1.17	4.0%
▪ ω și β sunt factori de suprarezistență; ▪ ε_c este deformația specifică a miezului BRB-ului, raportată la zona plastică, L_p; ▪ CID este deformația inelastică cumulativă.		

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.

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 contravânturi convenționale. Acest lucru implică un control mai riguros al calității, în special la realizarea miezului disipativ. Principalele etape sunt prezentate în Figura 13.

Urmând etapele de proiectare descrise mai sus, a fost proiectat un BRB având rezistența plastică a secțiunii la efort axial este $N_p = 334$ kN, și capabil să dezvolte deformații de ± 102 mm, corespunzătoare unei deplasări relative de nivel de 2%. Geometria cadrului contravântuit este: înălțime $H = 3,5$ m, deschidere $L = 7,5$ m, dispunerea BRB-urilor în V inversat. În Figura 14 se prezintă desenul de ansamblu pentru BRB-ul proiectat.



Figura 13. Etapele tehnologice de realizare a BRB-ului: debitarea pieselor metalice; asamblarea miezului; aplicarea materialului compresibil și a stratului neaderent; asamblarea BRB-ului și centrarea miezului; turnarea mortarului/betonului.

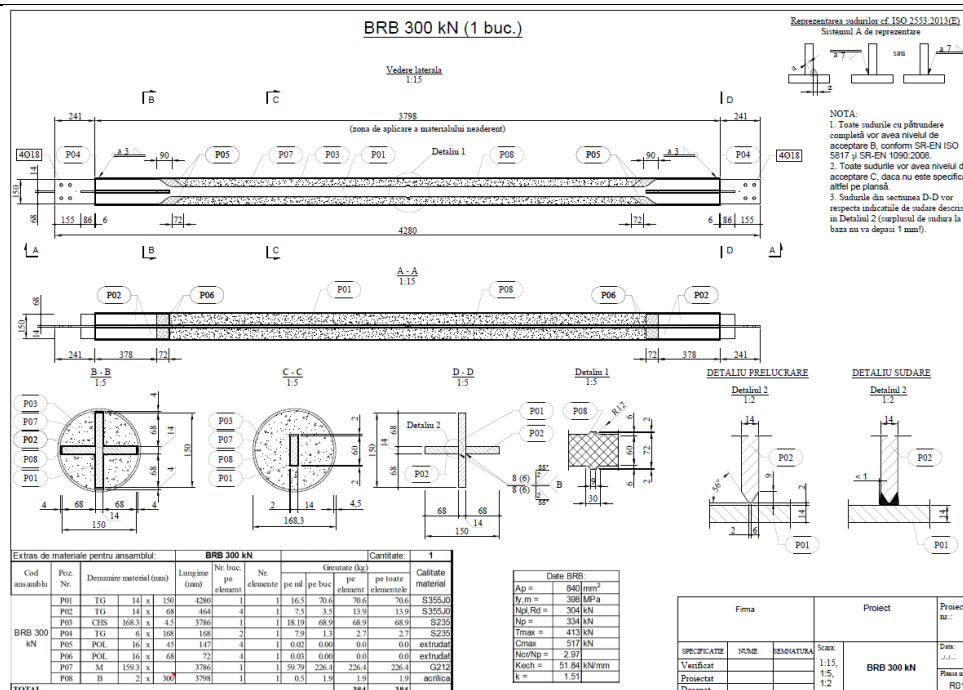


Figura 14. Desen de ansamblu al unui BRB

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

(100 %) În cadrul acestei activități au fost elaborate recomandările de proiectare ale sistemelor structurale alcătuite din cadre din oțel contravântuite cu BRB-uri (BRBF) 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. Ghidul de proiectare cuprinde: specificații pentru sistemele structurale ce se pot utiliza în configurații BRBF, procedura de proiectare pentru BRBF și DBRBF; specificații pentru calculul structural; verificări ale elementelor și ale îmbinărilor. În Figura 15 este ilustrată schema de principiu a procesului de proiectare a cadrelor cu BRB-uri.

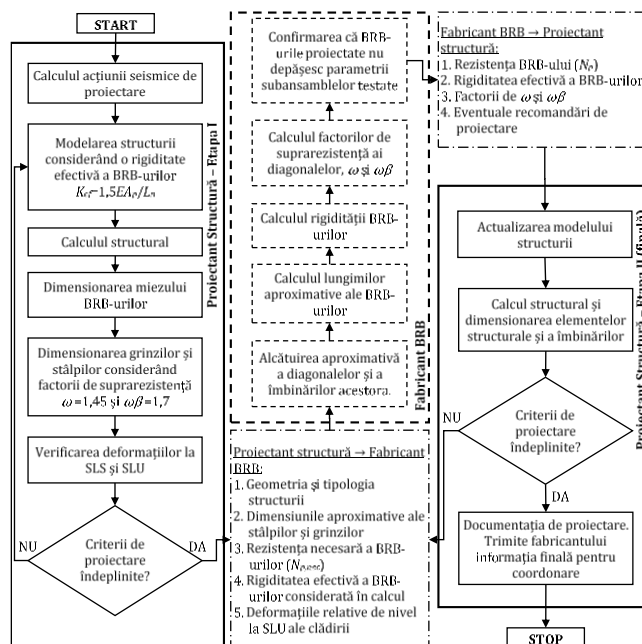


Figura 15. Schema de proiectare a cadrelor contravântuite cu BRB-uri.

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 16.

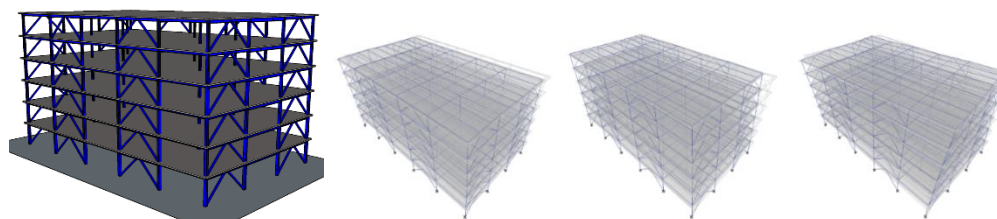


Figura 16. Schema spațială a structurii și primele trei moduri proprii de vibrație

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 17. 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.

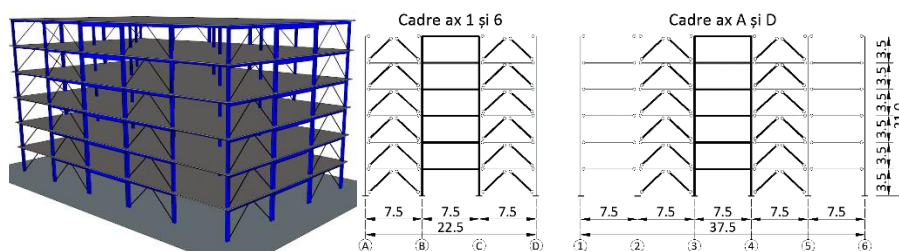


Figura 17. Schema spațială a structurii.

Toate rezultatele din activitățile 4.1 și 4.2 au fost utilizate la elaborarea unui ghid de proiectare atât la nivel de structură BRBF, cât și la nivel de element BRB (vezi Figura 18).

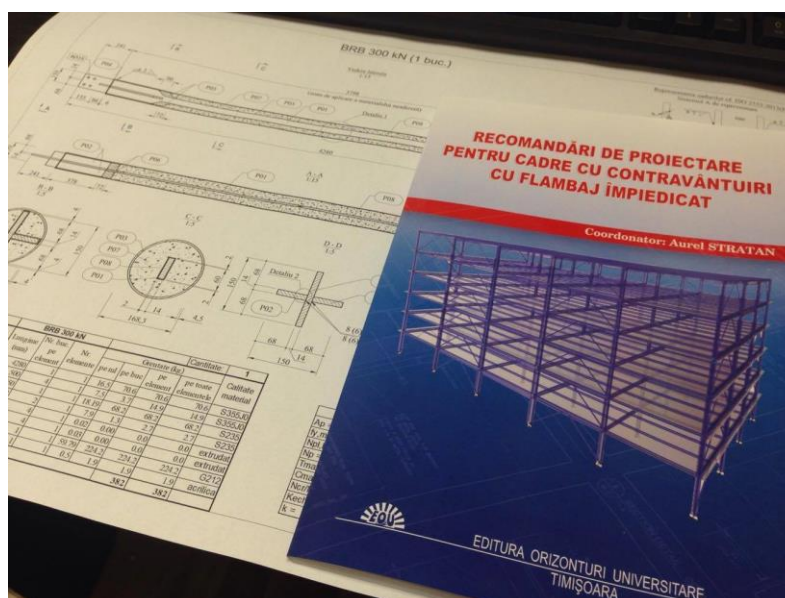


Figura 18. Recomandări de proiectare pentru cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedicat

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

(100 %) 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 1).

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

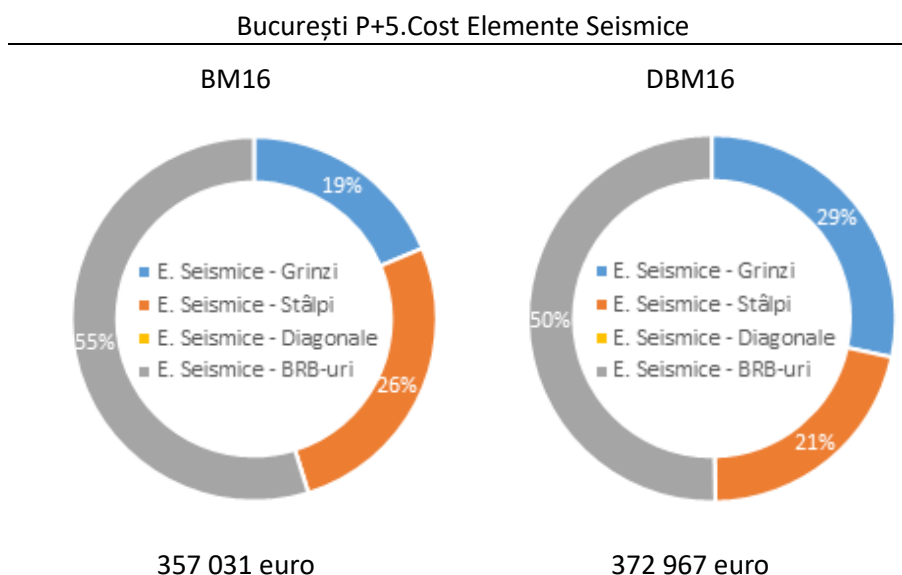
Costul dispozitivelor BRB a fost stabilit urmând metoda de calcul propusă de partenerul HMS a proiectului IMSER ($cost \text{ (euro)} = 1,3 \cdot (N_{pl}) + 1300$).

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.

Au fost realizate și grafice comparative ale distribuției costurilor elementelor seismice pentru structurile proiectate. În Figura 19 se prezintă un exemplu de grafic de cost pentru structura cu BRB-uri și cea duală cu BRB-uri amplasată în București, având 5 etaje (6 niveluri).



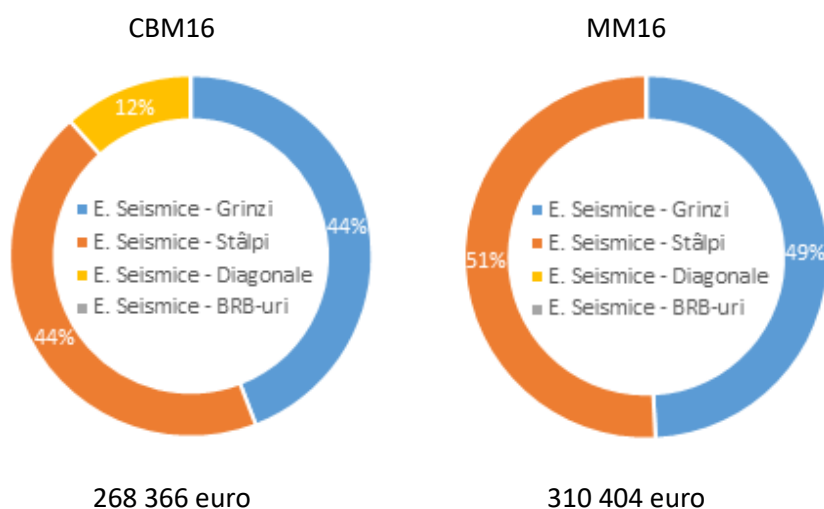


Figura 19. Grafice comparative ale distribuției costurilor elementelor seismice - imobil București P+5

Act. 4.4 Coordonare, administrare, raportare, publicarea rezultatelor

(100 %) 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 minutelor ședințelor etc. Rezultatele obținute au fost diseminate prin publicarea unor articole științifice la: (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

Act. 4.5 Organizarea unui seminar la Timișoara

(100 %) 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 a Universității Politehnica Timișoara. 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.



Figura 20. Seminar IMSER, Timișoara

Act. 4.6 Organizarea unui seminar la București

(100 %) În cadrul acestei activități a fost organizat un workshop de diseminare a rezultatelor obținute în cadrul proiectului IMSER. Acesta a avut loc în incinta Facultății 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.



Figura 21. Seminar IMSER, București

Act. 4.7 Întâlniri de lucru pentru elaborarea ghidurilor de proiectare

(100 %) 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 stabilirea procedurii de proiectare a cadrelor cu BRB și stabilirea tehnologiei de realizare pentru soluția BRB optimă aleasă (CO – cercetare, P1 – proiectare și P2 – fabricare). 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.

4 Concluzii

Raportul tehnic și științific sintetizează activitățile desfășurate în cadrul 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.

Proiectul IMSER a creat premisele utilizării BBR-urilor în practica curentă de proiectare, iar prin elaborarea ghidului de proiectare se facilitează, în primul rând, procesul de proiectare al structurilor echipate cu BRB-uri, iar în al doilea rând, de proiectare și fabricare a dispozitivelor BRB.

Rezultatele au fost diseminate și prezentate inginerilor proiectanți prin intermediul a două seminarii organizate la București și Timișoara, precum și prin publicarea unor lucrări științifice la conferințe naționale și internaționale. Utilizarea rezultatelor obținute și a recomandărilor de proiectare devine valabilă din momentul încheierii proiectului, rezultatele obținute fiind disponibile tuturor, fără restricții.

Rezultatul cel mai semnificativ obținut în cadrul proiectului IMSER îl constituie elaborarea și publicarea volumului „Recomandări de proiectare pentru cadre cu contravântuiri cu flambaj împiedicat”. Acest volum este unicul de acest gen în România și cuprinde atât recomandări de proiectare la nivel de structură, cât și la nivel de BRB, incluzând exemple de calcul și informații ce vizează tehnologia de fabricare a BRB-urilor.