



Universitatea Tehnică
de Construcții București

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII CIVILE, INDUSTRIALE ȘI AGRICOLE

Studii doctorale, *Specializarea: Construcții Metalice*

**TEZĂ DE DOCTORAT
- REZUMAT -**

**CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND
REALIZAREA, MODELAREA ȘI COMPORTAREA BARELOR CU
FLAMBAJ ÎMPIEDICAT**

Conducătorul lucrării de doctorat,
Prof.Univ.Dr.Ing. Șerban-Adrian Dima

Doctorand,
ing. Silviu-Cristian Ionescu-Lupeanu

București
2022

CUPRINS :

<u>1.</u>	<u>INTRODUCERE</u>	<u>4</u>
<u>2.</u>	<u>CONTINUTUL TEZEI DE DOCTORAT</u>	<u>6</u>
<u>3.</u>	<u>CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUȚII PERSONALE</u>	<u>8</u>
3.1	CONCLUZII	8
3.2	CONTRIBUȚII PERSONALE	10
<u>4.</u>	<u>BIBLIOGRAFIE</u>	<u>11</u>

Cuvânt înainte

” TREBUIE SĂ ÎNCERCI NECONTENIT SĂ URCI FOARTE SUS, DACĂ VREI SĂ POTI SĂ VEZI FOARTE DEPARTE”

Constantin Brâncuși

Pe parcursul desfășurării lucrărilor din cadrul tezei de doctorat, am beneficiat de sprijinul mai multor persoane cărora, pe această cale, doresc să le adresez mulțumiri. Această teză de doctorat nu ar fi putut fi realizată fără ajutorul lor.

Doresc să îmi exprim mulțumirea și recunoștința față de domnul prof.univ.dr.ing. Șerban-Adrian DIMA, în calitate de conducător științific și mentor, care mi-a oferit un sprijin deosebit înaintea și pe parcursul elaborării Tezei de Doctorat.

Mulțumesc membrilor Departamentului de Construcții Metalice, Management și Grafică Inginerească pentru sprijinul acordat pe parcursul pregătirii și susținerii Rapoartelor de Cercetare și a Tezei de Doctorat. Mulțumiri dl. conf.univ.dr.ing. Helmuth Kober și conf.univ.dr.ing. Bogdan Ștefănescu pentru sfaturile științifice valoroase și pentru îndrumarea competentă. De asemenea doresc să îmi exprim aprecierea și mulțumirile față de Școala Doctorală UTCB.

Familiei mele, părinților, ing.Silvia Ionescu-Lupeanu și ing.Marcel Ionescu-Lupeanu și fratelui meu, arh. Marcel Ionescu-Lupeanu, mulțumiri și recunoștință pentru constantul sprijin fizic, moral și material și înțelegerea oferite. Mulțumesc soției mele, dr. Ana-Maria Ionescu-Lupeanu, pentru încurajări și pentru suportul necondiționat. Vă prețuiesc!

Mulțumiri colegilor de la Allied Engineers Grup, dlui. ing. Mihai Dragomir, dlui. ing. Stelian Constantinescu, dlui. ing. Liviu Mihai Stefanescu Winterlik și dlui. ing. Mihai Ionescu pentru îndrumarea oferită pe parcursul elaborării Tezei de Doctorat.

Mulțumesc dlui.ing.Mandrilă Corneliu și companiei TEKNO EUROCONSTRUCT pentru sponsorizarea oferită, confecționarea pieselor componente ale prototipurilor testate.

Mulțumesc dlui. ing.Teodor Teodorescu și companiei SIKA ROMANIA pentru sprijinul oferit prin sponsorizarea cu materiale SIKA, găzduirea și ajutorul oferit pe parcursul execuției prototipurilor testate.

Mulțumiri dlui. conf.univ.dr.ing. Viorel Popa, dlui. conf.univ.dr.ing. Eugen Lozincă și dlui. șef.lucr.dr.ing.Andrei Papurcu pentru disponibilitatea și ajutorul oferite la testarea prototipurilor în laboratorul de încercări structurale din cadrul CERS (CENTRUL DE CERCETARE-EVALUAREA RISCULUI SEISMIC) - UTCB.

Deosebită grațitudine datorez Comisiei de Doctorat alcătuită din prof.univ.dr.ing. Ilinca Năstase, conf.univ.dr.ing. Helmuth Kober, prof.univ.dr.ing. Cristina Câmpian, conf.univ.dr.ing. Carmen Teleman pentru timpul prețios acordat, pentru sfaturile științifice valoroase cât și pentru îndrumarea competentă și permanentă pe parcursul elaborării și realizării acestei teze de doctorat.

Ing. Silviu-Cristian IONESCU-LUPEANU

1. INTRODUCERE

Comportarea structurilor în timpul cutremurelor recente a pus în evidență necesitatea creșterii rezistenței și a capacității stabile de disipare a energiei. Optimizarea acestor caracteristici mecanice este necesară pentru a menține la un nivel acceptabil drift-urile și deplasările globale.

În ultimii ani una din soluțiile studiate și apoi aplicate a fost utilizarea barelor cu flambaj împiedicat (BRB). În perioada recentă multe construcții civile sau industriale din SUA, Europa, Japonia și Taiwan se realizează cu contravântuiri cu flambaj împiedicat. Lucrarea de față urmărește elaborarea unor completări pentru studiile de caz privind proiectarea, fabricarea și modelarea contravântuirilor cu flambaj împiedicat dar și scoaterea în evidență a avantajelor și dezavantajelor utilizării acestor tipuri de contravântuiri prin evaluarea comportării barelor cu flambaj împiedicat, supuse la solicitări statice sau dinamice, pe baza modelelor numerice și a încercărilor experimentale. Evaluarea răspunsului neliniar, capacitatea de deformare, distribuția eforturilor precum și modul de cedare a sistemelor structurale, care utilizează astfel de contravântuiri, sunt informații de interes deosebit pentru inginerii proiectanți de structuri.

Ideea de utilizare a unor dispozitive metalice cu capacitate mare de disipare a energiei, integrate în cadrele structurilor, a apărut de mai mult de 30 de ani. Primele cercetări din domeniul protecției seismice a structurilor considerau grinzi de torsiune, grinzi încovoiate și alte mecanisme structurale ca bază pentru dispozitivele de disipare a energiei induse în barele supuse la încovoiere sau forțe axiale. Ulterior, a fost propusă o gamă largă de dispozitive eficiente de disipare a energiei. Motivația utilizării acestor dispozitive este aceea de a realiza o plastificare uniform distribuită în tot materialul, și pentru a evita deformări locale, care vor duce rapid la cedarea dispozitivelor din cauza oboselii după un număr redus de cicluri de încărcare-descărcare.[1]

Conceptul de bare cu flambaj împiedicat a fost dezvoltat în Japonia, la sfârșitul anilor 1980 iar în Statele Unite după cutremurul de la Northridge în 1994 și este în prezent o soluție de preluare a forțelor laterale, dependentă de deplasări, acceptată și reglementată în standardele actuale. Nevoia de soluții economice care prevăd o rezistență adecvată structurilor noi este acum în creștere în Europa și accelerează utilizarea barelor cu flambaj împiedicat.

Barele cu flambaj împiedicat (BRB) sunt compuse dintr-un miez de oțel ductil aflat în interiorul unui tub exterior cu rol de împiedicare a flambajului (Fig.1.1). Miezul și carcasa sunt decuplate prin intermediul unui material neaderent pentru a preveni interacțiunea dintre ele.

În secțiunea transversală a barelor cu flambaj împiedicat se disting următoarele componente:

- miezul de oțel
- material neaderent
- tub exterior (țeavă)

Tipurile de contravântuiri cu flambaj împiedicat utilizate în mod obișnuit (secțiune transversală) sunt prezentate în fig.1.

Stratul format din materialul neaderent decuplează tubul exterior de miezul din oțel. Prin urmare, efortul axial al contravântuirilor este transmis numai prin intermediul miezului de oțel, în timp ce tubul exterior (prin rigiditatea sa la încovoiere) asigură rezemarea laterală adecvată împotriva flambajului prin încovoiere al miezului.

Miezul de oțel trebuie să reziste la întreaga forță axială dezvoltată în contravântuire. Secțiunea transversală la barele cu flambaj împiedicat poate fi semnificativ mai mică decât cea a contravântuirilor obișnuite, deoarece performanțele sale nu sunt limitate de flambaj. În lungul miezului se disting trei zone: partea din mijloc care se plastifică (yielding length) și capetele rigide care nu se plastifică. Mărirea și de obicei ranforsarea acestora asigură comportarea capetelor în domeniul elastic, și astfel plastificarea se va dezvolta în partea de mijloc a miezului. O astfel de configurație a contravântuirilor oferă un grad ridicat de încredere și o bună predicție asupra comportării și cedării elementului.

Carcasa exterioră este de obicei realizată din tuburi din oțel umplute cu beton sau cu alte materiale neaderente la miezul metalic. Tubul exterior trebuie proiectat astfel încât să fie împiedicat flambajul lateral al miezului din oțel.

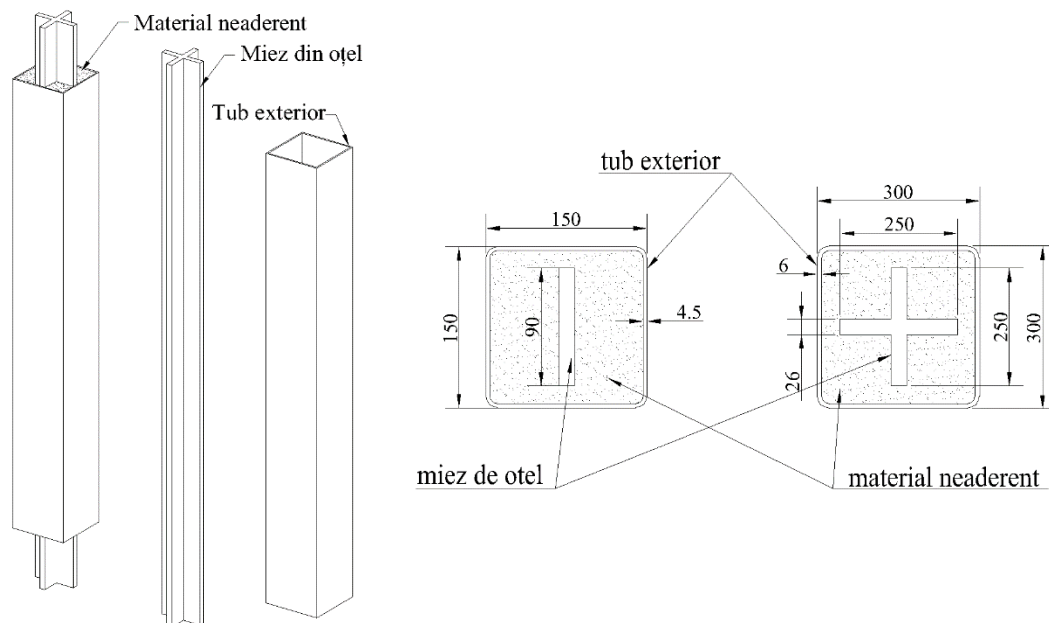


Fig. 1 - Componentele barelor cu flambaj împiedicat și tipurile uzuale de secțiuni BRB[49]

Dificultățile de estimare a performanței cadrelor contravântuite centric, apărute prin diferența de capacitate la solicitări de compresiune și de întindere a contravântuirilor și datorită degradării rezistenței în urma unor încărcări ciclice, au dus la cercetări care urmăreau crearea unei contravântuiri cu comportare elasto-plastică mai stabilă. În acest scop s-a ajuns la ideea de a împiedica flambajul barelor printr-un sistem exterior.

Cadrelor echipate cu contravântuiri cu flambaj împiedicat au o capacitate mare de absorbție a energiei seismice, comportarea histeretică a acestor cadre fiind simetrică și stabilă în domeniul plastic (Fig.2).

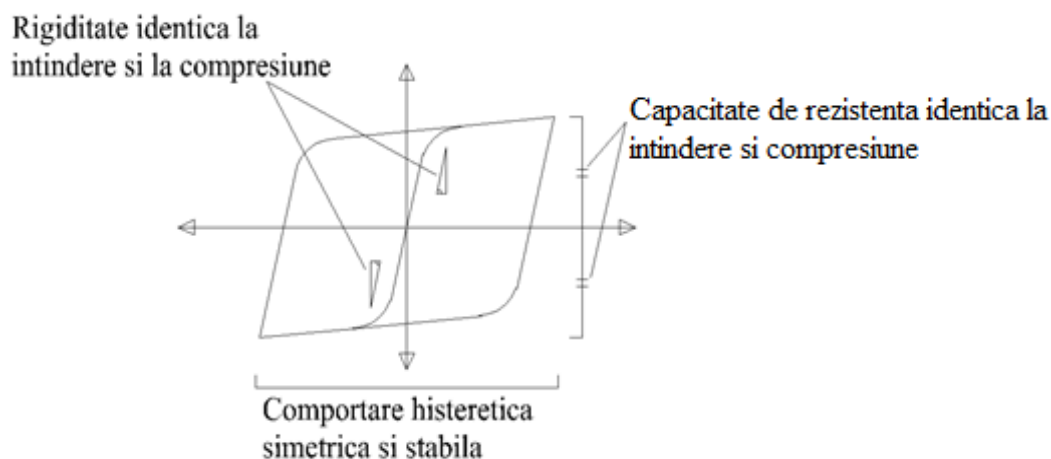


Fig. 2- Comportarea contravântuirilor cu flambaj împiedicat[49]

Prinderile la capete ale BRB-urilor pot fi de mai multe tipuri, fiecare având avantaje și dezavantaje specifice:

- prinderi articulate cu bolț - avantajul este reducerea momentului de ordinul 2 indus de deplasările de nivel dar și creșterea lungimii efective a miezului de oțel, realizându-se astfel reducerea deformației specifice.
- dezavantajul este toleranța mică de montaj

Prin acest tip de prindere se izolează bara disipativă de momentele încovoietoare și forțele tăietoare din structură

- prinderi sudate/cu șuruburi - avantajul acestui model este timpul redus de punere în practică

- dezavantajul este reprezentat de momentele de ordinul 2 la nivelul îmbinărilor și elementelor

Odată cu apariția și dezvoltarea metodei elementului finit multe din încercările experimentale sunt optimizate prin utilizarea acestei metode la determinarea comportării unor elemente sau sisteme structurale. Experiența și cunoștințele dobândite de-a lungul timpului, pe baza numeroaselor modele analitice validate pe baza testelor experimentale, efectuate pe bare cu flambaj împiedicat, au condus la îmbunătățirea tehnicilor de modelare și a instrumentelor (programelor) de calcul, ce pot oferi în prezent rezultate cu un grad de încredere ridicat.

Gradul de acuratețe al rezultatelor depinde de complexitatea modelelor utilizate. Pentru evaluarea comportării BRB-urilor se pot utiliza elemente finite ce pot simula fenomene complexe precum contactul dintre beton și oțel, fenomenul de zdrobire a betonului, flambajul barelor de oțel sub eforturi de compresiune.

Structurile sunt supuse la forțe ciclice mari în timpul unui seism. Barele cu flambaj împiedicat sunt utilizate pentru a crește capacitatea de rezistență a cadrelor structurilor prin disiparea de energie și prin comportamentul neliniar. Testarea și evaluarea barelor cu flambaj împiedicat sunt necesare pentru proiectarea și asigurarea controlului calității execuției. Deși experimentele în laborator conduc la rezultate în concordanță cu comportarea reală a acestor dispozitive antiseismice, aceste teste necesită resurse financiare semnificative și deasemenea prelungesc programele de desfășurare ale proiectului.

Cercetarea dispozitivelor are două scopuri importante: de a analiza comportamentul histeretic al BRB (rezistența suplimentară la compresiune, frecarea dintre inima de oțel și sistemul de împiedicare a flambajului, distribuția deformațiilor plastice) și în al doilea rând, găsirea unui model numeric cât mai apropiat de comportarea reală pentru a înlocui și reduce numărul de teste experimentale costisitoare.

În timpul unui seism, BRB-urile trebuie să preia forțe ciclice și deformații plastice mari. De aceea, în modelele de calcul pentru barele cu flambaj împiedicat este important să se descrie în mod adecvat comportarea ciclică a materialului.

Oțelul obișnuit are comportare diferită sub încărcare ciclică și sub încărcare monotonă, așa cum au arătat mai multe experimente [22]. Când frecarea dintre cristalele materialului scade, efectul Bauschinger ajunge în stare de saturație și aria închisă de bucla de histerezis se micșorează din ce în ce mai mult.

2. CONȚINUTUL TEZEI DE DOCTORAT

Lucrarea este structurată în 6 capitole după cum urmează:

Capitolul 1 - Introducere

Primul capitol are caracter introductiv, stabilește domeniul în care se încadrează teza de doctorat și prezintă obiectivele tezei. Astfel se prezintă considerații privind alcătuirea și utilitatea barelor cu flambaj împiedicat dar și importanța îmbunătățirii comportării structurilor supuse la acțiuni seismice. În ultimii ani s-a dezvoltat conceptul de control al răspunsului seismic în vederea limitării avariilor produse de seisme și pentru optimizarea costurilor de execuție. Acest control se realizează introducând în structură dispozitive de disipare a energiei seismice (disipatori).

Deoarece în România aceste sisteme nu sunt foarte utilizate este nevoie de recomandări privind implementarea acestora în condițiile specifice de seismicitate ale țării noastre.

Capitolul 2 - Stadiul actual al utilizării barelor disipative cu flambaj împiedicat în România și în lume

Capitolul al doilea prezintă stadiul actual al utilizării dispozitivelor de disipare a energiei seismice de tip BRB pe plan internațional și detalii de execuție utilizate la fabricarea acestor dispozitive. Pe plan internațional preocuparea privind utilizarea BRB-urilor a început în anii 1970. În anul 1973 Wakayabashi împreună cu o întreaga echipă de cercetare a realizat un studiu complet al tuturor componentelor BRB dar dispozitivele BRB au început să fie utilizate pe scară largă începând cu anul 1987. Pe plan național, reținerile proiectanților privind utilizarea disipatorilor de energie seismică de tip BRB provin din lipsa unor modele și a unor metode de calcul ale structurilor echipate cu aceste tipuri de dispozitive, corelate codurilor de proiectare din România.

Capitolul 3 - Elemente teoretice privind barele cu flambaj împiedicat

În prima parte a capitolului, sunt prezentate principiile și modelele de calcul utilizate la proiectarea contravântuirii cu flambaj împiedicat. În cea de-a doua parte a capitolului este prezentată analiza comparativă a 6 modele de structuri care urmăresc scoaterea în evidență a anumitor caracteristici favorabile sau defavorabile contravântuirilor cu BRB utilizate. Sistemul BRB a fost introdus fie sub formă de V inversat, fie sub formă de X pe 2 niveluri prins articulat la capete. Analiza statică neliniară a fost aplicată pentru 6 clădiri de birouri cu 15 niveluri situate în București. Datorită unei contribuții semnificative a sistemelor BRB la comportarea seismică a structurilor, a apărut ideea completării studiului teoretic cu un studiu experimental. A fost izolat un cadru cu contravântuiri BRB în V inversat în vederea realizării unor încercări experimentale. Proiectarea contravântuirilor cu flambaj împiedicat realizată în acest capitol a oferit datele de intrare pentru testele experimentale descrise în capitolul 4.

Capitolul 4 - Descrierea cadrului de cercetare experimentală

Programul experimental descris în acest capitol contribuie la cercetarea dispozitivelor cu flambaj împiedicat din România. Pe baza calculelor efectuate în capitolul 3, au fost proiectate 3 prototipuri BRB care au fost ulterior executate și testate experimental la scara 1:1 (fig.3.) în laboratorul CERS (CENTRUL DE CERCETARE-EVALUAREA RISCULUI SEISMIC) din cadrul Universității Tehnice de Construcții București. Regimul de încărcare al elementelor BRB în laborator a fost de tip ciclic crescător. Prototipurile realizate sunt alcătuite dintr-o platbandă de oțel introdusă într-un tub de oțel umplut ulterior cu beton. Pentru prevenirea frecării dintre miezul de oțel și beton au fost utilizate trei tipuri diferite de materiale. Decofrol la prototipul BRB-1, plăci de PTFE pentru prototipul BRB-2 iar pentru prototipul BRB-3 a fost utilizată o „teacă” din table teflonate ca material neaderent. În acest capitol sunt de asemenea descrise procesele de execuție ale contravântuirilor cu flambaj împiedicat și de validare experimentală a rezultatelor obținute în urma testărilor prototipurilor.

Capitolul 5 - Rezultatele cercetării experimentale

În acest capitol sunt prezentate rezultatele obținute experimental pentru fiecare prototip testat. Acestea au arătat că elementele BRB, realizate prin mijloace simple de izolare a miezului de umplutura de beton, nu și-au dovedit funcționalitatea. Chiar dacă pe parcursul testărilor au fost observate deficiențe iar unele elemente componente ale prototipurilor a trebuit să fie re-proiectate, rezultatele pot fi considerate încurajatoare datorită unei îmbunătățiri semnificative în comportare a acestora după efectuarea remedierilor.

Capitolul 6 - Concluzii generale și contribuții personale

Acest capitol sintetizează concluziile, contribuțiile personale și direcțiile viitoare de cercetare cu privire la subiectul tezei.



Fig.3 – Testarea prototipurilor de bare cu flambaj împiedicat

3. CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUȚII PERSONALE

3.1 Concluzii

Programul experimental descris reprezintă o completare a studiilor efectuate pe bare cu flambaj împiedicat. Lucrarea descrie procesul de proiectare a 3 prototipuri de BRB, execuția prototipurilor, testarea acestora și prezintă analiza rezultatelor din programul de testare. Cele 3 prototipuri de BRB au fost calculate pentru modelele de structuri cu contravântuiri în V inversat.

În capitolul 3 au fost identificate avantaje și dezavantaje pentru 6 structuri echipate cu contravântuiri clasice și BRB-uri utilizând analiza neliniară la nivel geometric și de element și au fost prezentate concluziile și observațiile rezultate în urma studiului realizat. Răspunsul structural a fost analizat prin prisma următorilor parametri: consumul de oțel, deplasarea la vârf și stadiile în care s-au aflat articulațiile plastice ale elementelor structurale disipative conform nivelurilor de performanță reglementate în România. Studiul efectuat pe cele 6 modele atât cu bare disipative cât și fără (în soluție clasică cu contravântuiri în X și V inversat) a condus la următoarele concluzii:

- Pe plan internațional preocuparea privind utilizarea dispozitivelor de disipare a energiei seismice de tip BRB este veche (anii 1980), în timp ce pe plan național utilizarea disipatorilor a început recent, iar tendința este de aplicare a lor cât mai extins.
- pentru aceeași cantitate de energie disipată, structurile cu BRB-uri au deplasări mai mari
- în cazul structurilor cu BRB, după acțiunea seismului de cod, singurele elemente care trebuie înlocuite sunt BRB-urile, celelalte elemente având incursiuni minime în domeniul inelastic. BRB-urile pot fi înlocuite ușor și rapid oferind economii semnificative de timp și bani.
- pentru soluția cu contravântuiri în X și în V inversat fără BRB, incursiunile în domeniul inelastic sunt semnificative astfel încât ar trebui înlocuite după acțiunea seismului de cod, atât grinzile cât și contravântuirile. Aceasta este o intervenție dificilă din punct de vedere tehnic, scumpă și practic imposibilă.

- Structurile contravântuite clasic (fără BRB) sunt mai rigide decât cele cu BRB atâta timp cât nu flambează barele comprimate, proiectate din criterii de rezistență și rigiditate.

- consumul de oțel scade cu aprox. 12% în cazul structurilor proiectate cu ductilitate înaltă atât pentru structurile echipate cu contravântuiri clasice cât și pentru structurile echipate cu BRB față de consumul structurilor proiectate cu ductilitate medie.

- structura contravântuită cu BRB în X și proiectată astfel încât să satisfacă cerința de ductilitate înaltă este mai scumpă cu aprox. 2% decât structura fără BRB.

- o problemă studiată intens în ultima perioadă constă în analiza amplasării optime a disipatorilor în structură, folosind un număr redus de dispozitive. Pentru a reduce costurile, BRB-urile din treimea superioară care nu au avut incursiuni în domeniul plastic pot fi înlocuite cu contravântuiri clasice care pot lucra în domeniul elastic.

- rezultatele obținute în urma analizei parametrilor arată că modelele cu diagonale dispuse în V inversat prezintă eforturi și deplasări mai mici sub acțiunea seismului de cod față de modelele cu diagonale dispuse în X pe 2 niveluri.

- prin comparația raportului dintre deplasarea la vârf și forța tăietoare de bază (la modelele cu și fără contravântuiri BRB) se poate concluziona că modelele contravântuite cu BRB pot absorbi mai multă energie în timpul acțiunii seismului de cod.

- din studiul comparativ al modelelor și din analiza rezultatelor, se poate concluziona că în cazul seismelor de cod, modelele echipate cu BRB prezintă performanțe mai bune față de modelele echipate contravântuiri clasice. Dispozitivele BRB reduc eforturile din modelele de calcul și asigură stabilitatea clădirii.

Lucrarea de față constituie o documentație utilă pentru elaborarea unor recomandări de proiectare, fabricare și modelare a contravântuirilor cu flambaj împiedicat dar și scoaterea în evidență a avantajelor și dezavantajelor utilizării acestor tipuri de contravântuiri prin evaluarea comportării barelor cu flambaj împiedicat, supuse la solicitări statice sau dinamice, pe baza modelelor numerice și a încercărilor experimentale. Evaluarea răspunsului neliniar, capacitatea de deformare, distribuția eforturilor precum și modul de cedare a acestor sisteme structurale, sunt informații de interes deosebit pentru inginerii proiectanți de structuri. Prelucrarea experimentelor numerice pe structurile echipate cu BRB-uri au scos în evidență avantajele și dezavantajele introducerii acestor dispozitive la structuri metalice multietajate.

Studiul efectuat pe cele 3 prototipuri de bare disipative a condus la următoarele concluzii:

- rezultatele obținute în urma testărilor realizate au dovedit că trebuie asigurat un control riguros al execuției barelor disipative. Nu se recomandă execuția acestor dispozitive antiseismice în șantier ci doar în condiții de uzină unde se va realiza controlul tehnic neîntrerupt al execuției. De asemenea se va face controlul calității la capetele tubului metalic în zonele sensibile, acolo unde este posibilă pierderea stabilității locale prin flambaj lateral al zonei exterioare a miezului metalic. Execuția va respecta prevederile standardelor și normativelor în vigoare dar și a instrucțiunilor tehnice elaborate de proiectantul barelor cu flambaj împiedicat.

- pentru toate testările efectuate cedarea s-a produs la capătul inferior al barelor raportat la poziția de turnare, aceasta producându-se în bună parte datorită comportării deficitare a mortarului

de umplutură. Cedarea s-a produs la toate cele 3 specimene prin pierderea stabilității locale a miezului de oțel în afara planului acestuia. Prin urmare, pentru capătul inferior al BRB-urilor raportat la poziția de turnare trebuie realizat un sistem de vibrație a mortarului mai eficient.

- Zona critică a miezului de oțel este în zona din interiorul țevii, lângă zona ranforsată a miezului de oțel, zona în care s-a produs cedarea prin flambaj în afara planului miezului de oțel.

- asigurarea unui reazem lateral împotriva pierderii stabilității locale pentru miezul de oțel în zonele de capăt ale tubului exterior metalic prin prevederea de „capace” mai groase sudate de acesta, în timpul încărcărilor ciclice, îmbunătățește semnificativ comportarea de ansamblu a BRB-ului.

- a fost observată o îmbunătățire semnificativă a comportării prototipurilor prin înlocuirea plăcuțelor (capacelor), cu grosime de 3mm de la capetele țevii, cu plăcuțe (capace) cu grosimea de 10mm. Plăcuțele de 3mm au fost expulzate de beton la prototipurile BRB-1 și BRB-2 dar nu și la prototipul BRB-3 unde au fost utilizate plăcuțe de capăt (capace) cu grosimea de 10mm. De asemenea este recomandată utilizarea unor plăcuțe de capăt în contact cu miezul de oțel (fără lufturi) astfel încât acestea să constituie reazeme laterale fixe împotriva cedării prin flambaj lateral.

- a fost observat un comportament elastic al prototipurilor în timpul primelor două cicluri de încărcare. Randamentul prototipurilor BRB a început în ciclurile 3 și 4 la aproximativ 20% din driftul de etaj.

- un nou capac pentru BRB-uri trebuie proiectat și testat. Conexiunea capacului cu tubul ar trebui să elimine unele dintre problemele care au fost observate la prototipurile BRB la testele de laborator. Este recomandat ca aceste capace să fie suficient de rigide pentru a împiedica flambajul miezului de oțel în zonele de capăt.

3.2 *Contribuții personale*

Principalele contribuții personale aduse domeniului studiat care rezultă din această lucrare sunt următoarele:

- Prezenta Teză este o lucrare de pionierat în România în care este prezentat modul în care au fost confecționate și testate (din fonduri proprii și sponsorizări) prototipuri de bare cu flambaj împiedicat. Aceasta este printre primele teze de doctorat din România care studiază în detaliu acest tip de dispozitive cu flambaj împiedicat.

- Realizarea unui studiu documentar referitor la utilizarea barelor cu flambaj împiedicat pe plan național și internațional.

- Am exemplificat, adaptat și aplicat conform standardelor în vigoare, o procedură de proiectare a structurilor metalice multietajate echipate cu bare cu flambaj împiedicat.

- Analiza mai multor studii de caz care au pus în evidență procedura de dimensionare a barelor cu flambaj împiedicat pentru configurații diferite de contravântuiri.

- A fost realizată o procedură de proiectare a barelor cu flambaj împiedicat.

- A fost realizată o procedură de execuție a barelor cu flambaj împiedicat și de realizare a sistemului de împiedicare a flambajului.
- Am descris procedura de calificare experimentală a barelor cu flambaj împiedicat pentru tipul de BRB-uri testate în această teză.
- Am fabricat și testat 3 prototipuri de bare cu flambaj împiedicat.
- Am propus o serie de recomandări privind proiectarea și execuția barelor cu flambaj împiedicat.
- Rezultatele obținute experimental s-au dovedit încurajatoare pentru o cercetare viitoare mai complexă și încercări experimentale ulterioare cu moduri diferite de prevenire a frecării dintre miezul de oțel și mortar și cu obturarea capetelor tubului metalic exterior astfel încât să fie prevenită expulzarea mortarului și slăbirea rezistenței secțiunii acestuia în respectiva zonă.

4. BIBLIOGRAFIE

- [1] C.Black, N.Makris, I.Aiken - *Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces* – Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2002
- [2] *Star Seismic® | Buckling Restrained Braces* - <http://www.starseismic.eu/>
- [3] Chia-Ming Uang, Masayoshi Nakashima and Keh-Chyuan Tsai – Research and application of buckling –restrained braced frames – *Steel Structures* 4 (2004) 301-313
- [4] P100-1/2013 - *Cod de proiectare seismică, Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri*, 2013
- [5] SR EN 1993-1-1, *Eurocod 3:- Proiectarea structurilor de oțel, Partea 1-1:Reguli generale și reguli pentru clădiri*, ASRO, 2006
- [6] SR EN 1998-1, *Eurocod 8: Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur, Partea 1: Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri*, ASRO, 2004
- [7] Dipti R.Sahoo, Shih-Ho Chao – Performances-based plastic design method for buckling restrained braced frames – *Engineering Structures*, 17 July 2010
- [8] Jiun-Wei Lai and Keh-Chyuan Tsai – *Research and Application of Buckling Restrained Braces in Taiwan*
- [9] Yuanjie Li – *Performance-based design and evaluation of innovative steel knee braced truss moment frames* – B.Sc., South China University of Technology, 2012 , B.Sc., Polytechnic Institute of New York University, 2012
- [10] EN15129 – *Normativ european pentru dispozitive antiseismice*, CEN, 2009

- [11] Hiroshi NAKAMURA, Toru TAKEUCHI, Yasushi MAEDA, Yasuhiro NAKATA – *Fatigue properties of practical-scale unbonded braces* – Nippon Steel Technical Report No.82 July 2000
- [12] SR EN 10025-2: *Produse laminate la cald din oteluri pentru constructii. Partea 2: Conditii tehnice de livrare pentru oteluri de constructii nealiat*, ASRO, 2004
- [13] László Dunai D.Sc. Professor Head of Department - *Type testing of buckling restrained braces according to EN 15129*, Budapest University of Technology and Economics – Department of structural engineering, 2011
- [14] FEMA 273: *NEHRP GUIDELINES FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF BUILDINGS*, BSSC, 1997
- [15] Design of Seismic-Resistant Steel Building Structures Prepared by: Michael D. Engelhardt University of Texas at Austin with the support of the American Institute of Steel Construction.
- [16] Cost advantages of buckling restrained braced frame buildings – Dasse Design inc, San Francisco
- [17] Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames Walterio A. López Associate Rutherford & Chekene And Rafael Sabelli Senior Associate DASSE Design, Inc.
- [18] SUBASSEMBLAGE TESTING OF STAR SEISMIC BUCKLING-RESTRAINED BRACES - STEVE MERRITT CHIA-MING UANG GIANMARIO BENZONI, Department of Structural Engineering University of California, San Diego La Jolla, California 92093-0085, May 2003
- [19] ANSYS Release 11 documentation, “*Theory reference for ANSYS and ANSYS Workbench 11*”, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA (2007).
- [20] ANSI/AISC 341-16, “*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*”, INC, (2016).
- [21] Beer, F. P, Jr. Johnston, E. R, Dewolf, T. J, Mazurek, D. F, “*Mechanics of Materials*”, McGraw-Hill Companies, New York, (2009).
- [22] Youngjiu, S, Meng, W, Yuanqing, W, “*Experimental and constitutive model study of structural steel under cyclic loading*”, Journal of Constructional Steel Research 67, 1185-1197, (2011).
- [23] Lee, G, Chang, K. C, “*The experimental basis of material constitutive laws of structural steel under cyclic and nonproportional loading*”, Proc. of Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading, Osaka, Japan, 3-14, (2000).
- [24] SR EN 1993-1-8, *Eurocod 3: Proiectarea structurilor de oțel. Partea 1-8: Proiectarea îmbinărilor*, ASRO, 2006
- [25] Chaboche, J. L, “*A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories*”. International Journal of Plasticity 24, 1642-1693, (2008).

- [26] Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads, ECCS – Technical Committee 1 – Structural Safety and Loadings Technical Working Group 1.3 – Seismic Design, (1986).
- [29] Zsarnóczy, Á, Vigh, L. G, “*Experimental analysis of buckling restrained braces: Performance evaluation under cyclic loading*”, Proc of. 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary, pp. 945-950 (2011).
- [30] B. Sitler, G. MacRae, T. Takeuchi, “*BUCKLING RESTRAINED BRACE CONNECTION AND STABILITY PERFORMANCE ISSUES*”, Journal of Structural Engineering, Volume 111 Issue 3, 1985.
- [31] C. Dalban, E. Chesaru, S. Dima, C. Serbescu - *Construcții cu structură metalică*, Editura Didactică și Pedagogică, 1997
- [32] B. G. Rabbat, M. ASCE; and H. G. Russell, “ *Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout* ”, 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017, Paper N° 1380 (2017).
- [33] CR 1-1-3/2012: *Evaluarea acțiunii zăpezii asupra construcțiilor*, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2012
- [34] CR 1-1-4/2012 – *Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor*, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2012
- [35] CR0: *Bazele proiectării construcțiilor*, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2012
- [36] EN15129 – *Normativ european pentru dispozitive antiseismice*, CEN, 2009
- [37] *Enciclopedie în inginerie civilă* - <http://www.encyclopedia.org/>
- [38] The Engineering ToolBox - <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [39] University of Texas at Austin - <https://www.utexas.edu/>
- [40] University of California - <https://www.universityofcalifornia.edu/>
- [41] Dasse Design Inc - <http://www.thorntontomasetti.com>
- [42] Google Maps- <https://maps.google.com>
- [43] Clark, Aiken, Kasai si Kimura”*Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices*” in Proceedings of 69th Annual Convention of Seaoc, Sacramento, Canada, 1999.
- [44] Chen si Liaw ” *Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames*” Canadian Journal of Civil Engineering, vol.28, 2001, pg.823-836
- [45] ProSEP Teflon - <http://prosep.ro/ptfe-teflon/>
- [46] Centrul de Cercetare - Evaluarea Riscului Seismic - <http://ccers.utcb.ro/>

[47] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., “ *Theory of Elastic Stability*”, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., Toronto (1961).

[48] Fujimoto M, Wada A, Saeki E, Watanabe A, Hitomi Y, “ *A study on the unbounded brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube*”, Journal of Structural Engineering, (1988).

[49] ing.Silviu-Cristian Ionescu-Lupeanu , Prof.Univ.Dr.ing Șerban-Adrian Dima - *Assessment of multi-storey steel structures behaviour concentrically braced with or without BRBs* – 6TH NATIONAL CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND 2ND NATIONAL CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING AND SEISMOLOGY 2017

[50] Helmuth Köber, Emanuel Dima, Silviu Ionescu-Lupeanu - *About the seismic design of a "two storey-X" concentrically braced frame* – Vol. 63 No. 1 (2020): Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture

[51] SILVIU-CRISTIAN IONESCU-LUPEANU, EMANUEL-STEFAN DIMA, SERBAN-ADRIAN DIMA- *Evaluation of behaviour to seismic actions for multi-storey steel structures braced with or without BRBs* –, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Constructii. Arhitectura, Vol. 66(70), Nr.3, anul 2020