

PERFORMANȚA SEISMICĂ A STRUCTURILOR MULTIETAJATE ÎN CADRE CU NODURI GRINDĂ-STÂLP DE TIP SLIM-FLOOR

Teză de doctorat – rezumat extins

pentru obținerea titlului științific de Doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Civilă și Instalații

autor Ing. Rafaela-Florina DON

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Adrian Liviu CIUTINA

Mai 2023

1. Introducere

Sistemul slim-floor este o metodă alternativă de realizare a planșelor, fiind caracterizat prin integrarea mai multor componente într-un element structural unitar. Acest lucru înseamnă că elementul structural principal, grinda de oțel asimetrică, dar și celelalte componente sunt încorporate în planșeul de beton armat. De la introducerea lor pe piața construcțiilor în anii 1990, sistemele slim-floor au fost folosite în structurile de rezistență metalice și compuse ale clădirilor de înălțime medie și mare în țări din Europa Occidentală și nordică, și chiar și în China [1]. În cele mai multe cazuri, funcțiunile acestor clădiri sunt birouri, locuințe, spitale sau unități recuperare medicală [2] [3]. Potrivit unui fabricant de soluții pentru planșeele subțiri [4], cerințele la Starea Limită Ultimă SLU (rezistență, stabilitate) și la Starea Limită de Serviciu SLS (vibrații, deformații) pot fi îndeplinite cu succes. Astfel, integrarea sistemelor de tip slim-floor în clădirile multietajate nu mai este o noutate în ingineria civilă. Cu toate acestea, din cauza tipologiei actuale a îmbinărilor dintre grinzile de tip slim-floor și stâlpii de oțel, care sunt articulate, dar și a faptului că aceste sisteme de planșeu sunt proiectate exclusiv la încărcări gravitaționale în domeniul elastic, soluția tehnică actuală este incompatibilă cu proiectarea seismică a cadrelor. O altă problemă constă în proiectarea propriu-zisă a sistemului de tip slim-floor, ea fiind reglementată predominant de diverse aprobări tehnice și nu de normele europene. Până la intrarea în vigoare a noii versiuni a codului european pentru construcții compuse oțel-beton, prEN 1994-1-1 [5], în care sunt incluse unele reguli pentru planșeele de tip slim-floor și în care este definit un domeniu de aplicare pentru acestea, proiectarea lor rămâne greu neaccesibilă, iar aplicațiile sunt limitate. Studiul de față este elaborat cu scopul de a oferi o soluție tehnică pentru nodurile grindă-stâlp ale planșeelor de tip slim-floor, ceea ce ar face ca acest sistem să se preteze structurilor proiectate la seismicitate medie și ridicată. Pentru a aplica principiile proiectării bazate pe capacitate îmbinărilor grindă-stâlp de tip slim-floor, în așa fel încât criteriile de rezistență, rigiditate și capacitate de rotire – specifice clasei de ductilitate 3 - să fie îndeplinite în conformitate cu prEN 1998-1-2 [6], în studiul actual este prezentată o procedură structurată care implică următoarele etape principale:

- **Proiectarea ansamblelor de nod grindă-stâlp de tip slim-floor**
 - estimarea cerințelor de rezistență și rigiditate a unor structuri cu noduri de tip slim-floor rezistente la încărcări seismice;
 - proiectare asistată de analize cu element finit a nodurilor grindă-stâlp slim-floor;
- **Studiul experimental**
 - dezvoltarea unui program experimental cu teste monotone și ciclice pe ansamble de nod grindă-stâlp de tip slim-floor;

- procesarea și interpretarea rezultatelor experimentale;
- **Studiul numeric**
 - calibrarea unui model numeric și dezvoltarea unui studiu parametric pentru analizarea cu element finit a unor parametri;
 - procesarea și interpretarea rezultatelor numerice;
- **Dezvoltarea unei proceduri de proiectare și detaliere**
 - evaluarea caracteristicilor mecanice ale grinzii slim-floor;
 - proiectarea bazată pe capacitate a nodului grindă-stâlp de tip slim-floor;
 - clasificarea nodului grindă-stâlp de tip slim-floor pe criterii de rezistență și rigiditate în conformitate cu prEN 1993-1-8 [7];
 - reguli de detaliere a nodului grindă-stâlp de tip slim-floor;
- **Analize structurale și evaluarea performanței seismice**
 - dezvoltarea unui model numeric al nodului grindă-stâlp de tip slim-floor pentru integrarea acestuia în modele structurale ale unor cadre necontravântuite, contravântuite centric și duale contravântuite centric;
 - validarea modelării nodului prin compararea cu rezultatele obținute pe cale experimentală;
 - calculul cerinței de rotire plastică a grinzii de tip slim-floor, a deplasării orizontale relative a structurilor cu noduri grindă-stâlp slim-floor și, evaluarea performanței seismice a cadrelor necontravântuite, contravântuite centric și duale contravântuite centric prin utilizarea analizelor neliniare statice și dinamice.

2. Programul Experimental

Programul experimental dezvoltat pentru nodurile grindă-stâlp de tip slim-floor a fost constituit din teste monotone și ciclice. Componentele de bază ale specimenelor au fost următoarele: ▪ grindă slim-floor cu secțiune transversală asimetrică și cu *Reduced Flange Section RFS* (secțiunea redusă a tălpii inferioare) din oțel S355, *Reduced Flange Section Reduced Flange Section*, ▪ îmbinare cu placă de capăt extinsă și șuruburi de înaltă rezistență 8*M36, 10.9, ▪ stâlp de oțel S355 cu secțiunea H, ▪ planșeu de beton armat (clasa betonului C30/37; armături de oțel cu marca B500B), ▪ armături de oțel pentru conectorii de tip *concrete dowels*. Obiectivul principal al testelor a fost dovedirea pe cale experimentală a unei capacități totale de rotire a nodului grindă-stâlp de $\pm 40 \text{ mrad}$ la Siguranța Vieții (Significant Damage) – impuse de AISC 341-16 [8] pentru noduri ale structurilor necontravântuite proiectate la încărcări seismice. Noutatea testelor experimentale a fost reflectată de următoarele:

- utilizarea unei îmbinări cu rezistență la moment încovoietor (îmbinare cu placă de capăt extinsă, cu șuruburi de înaltă rezistență și cu suduri cu penetrare completă și resudarea rădăcinii) for grinzile de tip slim-floor;
- aplicarea tehnicii *RFS* (secțiunea redusă a tălpii inferioare) ca măsură de asigurare a ductilității la nivel de element structural și de prevenire a cedării fragile a șuruburilor;
- aplicarea unui protocol ciclic de încărcare nodurilor grindă-stâlp de tip slim-floor.

2.1 Testul experimental monoton

Ansamblul de nod grindă-stâlp *SF J-M* a fost testat sub o încărcare laterală aplicată în regim monoton printr-o creștere incrementală a deplasării (la moment încovoietor negativ), urmată de o încărcare în sens invers (la moment încovoietor pozitiv). După ce a atins un moment încovoietor considerabil de $- 907 \text{ kNm}$ și o rotire de $- 93 \text{ mrad}$ sub moment încovoietor negativ, sudura dintre o rigidizare și talpa stâlpului a cedat la inversarea sarcinii. Cedarea acestei suduri a condus, într-un interval scurt de timp, la multiple ruperi de suduri sub moment încovoietor pozitiv. Deși valoarea momentului încovoietor la momentul primei cedări a fost ridicată (e.g., 730 kNm), fenomenul survenit nu a fost așteptat. Inspecția sudurilor realizată după testul

monoton a scos la iveală defecte de execuție, ceea ce a dus la consolidarea sudurilor dintre rigidizări și talpa stâlpului înainte de testul experimental ciclic.

2.2 Testul experimental ciclic

Încercarea experimentală ciclică a fost efectuată pe specimenul denumit *SF J-C* prin aplicarea protocolului de încărcare din AISC 341-16 [8]. În timpul încercării ciclice, deformații plastice semnificative au fost dezvoltate în zona disipativă a grinzii slim-floor – acestea fiind observate la fața locului prin fisurarea și desprinderea varului - dar și măsurate de senzorii instalați. Rezultatele experimentale confirmă dezvoltarea unei articulații plastice în zona disipativă cu *RFS* a grinzii slim-floor. Testul a fost oprit după primul ciclu de ± 60 *mrad*, când sudura dintre talpa inferioară a grinzii slim-floor și placa de capăt a cedat. Specimenul *SF J-C* a evidențiat un comportament histeretic simetric și relativ stabil, cu o degradare redusă a rigidității și rezistenței. Acest răspuns poate fi considerat adecvat pentru nodurile grindă-stâlp ale structurilor din clasa 3 de ductilitate. Evaluarea performanței seismice a fost realizată utilizând prevederile din FEMA P-795 [9] pentru construirea curbelor înfășurătoare. În plus, procedura ECCS [10] a fost utilizată pentru a calculul rotirilor nodului grindă-stâlp corespunzătoare Stării Limită de Serviciu (*Damage Limitation*), Siguranței Vieții (*Significant Damage*) și Stării Limită de Prevenire a Colapsului (*Near Collapse*). Astfel, au fost obținute următoarele rotiri ale nodului grindă-stâlp: ± 16 *mrad* la Stării Limită de Serviciu (*Damage Limitation*), $\pm 45,4$ *mrad* la Siguranței Vieții (*Significant Damage*) și $\pm 60,5$ *mrad* la Stării Limită de Prevenire a Colapsului (*Near Collapse*). Deoarece rotirea obținută la Siguranței Vieții (*Significant Damage*) este de $\pm 45,4$ *mrad*, cu 13 % mai mult decât rotirea necesară de ± 40 *mrad*, cerința AISC 341-16 [8] a fost îndeplinită.

Implementarea principiilor de proiectare bazată pe capacitate nodului grindă-stâlp de tip slim-floor, conform cărora suprarezistența îmbinării cu șuruburi și a sudurilor adiacente trebuie asigurate în cazul nodurilor disipative, a condus la utilizarea unei îmbinări cu placă de capăt extinsă, a șuruburilor de înaltă rezistență, dar și la aplicarea tehnicii *RFS* la talpa inferioară a grinzii de oțel. Astfel, îmbinarea cu șuruburi a putut dezvolta rezistență la moment încovoietor mai mare decât cea a elementului structural conectat, și anume, a secțiunii reduse a grinzii slim-floor. În conformitate cu clasificarea din punct de vedere a rezistenței a prEN 1993-1-8 [7], îmbinarea este catalogată ca fiind total rezistentă. Considerând criteriul de rigiditate din prEN 1993-1-8 [7], îmbinarea este clasificată ca semi-rigidă atunci când este utilizată în cadre necontravântuite și rigidă - în cadre contravântuite.

3. Program Numeric

3.1 Modelul numeric de referință

Modelul numeric de referință (*RM*) a fost dezvoltat cu Abaqus v19 [11] utilizând elemente de tip *solid* și *beam*. Pentru legea care definește modul în care componentele interacționează, următoarele au fost aplicate: “*tie constraint*” (modelarea sudurilor); “*embedded constraint*” (modelarea interacțiunii dintre armături și planșeul de beton); și “*contact interaction*” (modelarea interacțiunii dintre componentele modelului numeric și planșeul de beton, grinda slim-floor și stâlpul de oțel, respectiv dintre șuruburi, placa de capăt și talpa stâlpului). Pentru interacțiunea de tip “*contact interaction*” – o lege de contact a fost definită considerând atât proprietăți pe direcție normală, cât și tangențială. Contactul pe direcție normală s-a definit ca “*normal hard contact*” cu posibilitatea de separare după contact. Contactul pe direcție tangențială a fost definit cu opțiunea “*friction / penalty contact*” aplicând un coeficient de frecare μ cu valoarea 0,6. Această valoare a coeficientului de frecare a rezultat în urma calibrării modelului finit al nodului grindă-stâlp. Relațiile tensiune-deformație specifică ale materialelor introduse în modelul numeric de referință *RM* au fost calibrate prin comparație cu rezultatele obținute în urma testelor pe probe. Tipul de analiză utilizat în cadrul programului numeric a

fost “*dynamic, explicit*”, luând în considerare și neliniaritatea geometrică.

Rezultatele modelului numeric de referință, precum și ale modelelor din studiul parametric, au fost obținute prin efectuarea unor analize avansate cu element finit (FEA) și au condus la concluzii importante. Prima dintre aceste concluzii este legată de rezultatele calibrării modelului numeric de referință *RM*, care a evidențiat o acuratețe ridicată în reproducerea curbei experimentale de testare. Pentru a susține acuratețea acestuia, au fost calculate abaterile dintre curba experimentală și cea obținută pe cale numerică. Ca urmare, abaterile s-au dovedit a fi în intervalul $0,1 \div 3,2$ %. O altă concluzie este legată de acuratețea modelului de referință *RM* în reproducerea evoluției mecanismului de cedare. La moment încovoiator negativ maxim, cea mai mare parte a deformației plastice a fost dezvoltată în zona disipativă a grinzii slim-floor – caz în care deformațiile au apărut din compresiune. Alte componente ale modelului de referință *RM* au suferit doar deformații inelastice locale. Astfel, rezultatele modelului de referință *RM* la moment încovoiator negativ au întărit observațiile făcute în timpul testelor experimentale: comportamentul ductil al grinzii slim-floor și un răspuns preponderent elastic al îmbinării cu șuruburi. Sub moment încovoiator pozitiv, zona disipativă a grinzii slim-floor a răspuns ductil, dezvoltând deformații plastice ridicate. În general, în punctele de încovoiere maximă indicate pe curba moment-rotire corespunzătoare modelului de referință *RM*, cele mai mari valori ale deformațiilor plastice au fost dezvoltate în zona disipativă a grinzii slim-floor. În comparație cu zona disipativă a grinzii, deformațiile plastice echivalente (PEEQ) în interiorul șuruburilor au fost scăzute, iar distribuția a fost una limitată (fenomene localizate), ceea ce susține concluzia că mecanismul de cedare a fost ductil. Această observație este în concordanță cu concluziile studiului experimental.

3.2 Studiul Parametric

A doua parte a programului numeric a fost dedicată dezvoltării unui studiu parametric. Studiul parametric s-a concentrat pe izolarea influenței parametrilor care făceau parte din soluția tehnică testată (de exemplu, *RFS*, placa de beton armat, etc.) pentru a evalua mai bine sensibilitatea modelului FE la aceștia, dar a inclus și parametri noi (e.g., plăci de dublare, nervuri din beton armat, tablă metalică trapezoidală, etc.). În cadrul studiului parametric a fost analizată influența următorilor parametri:

- lipsa reducerii secțiunii tălpii inferioare a grinzii *RFS* în modelul numeric M_1 ;
- lipsa planșeului de beton armat în modelul numeric M_2 ;
- lipsa conectorilor de tip *concrete dowels* în modelul numeric M_3 ;
- lipsa conectorilor de tip *concrete dowels* plus eliminarea frecării dintre componentele nodului “*frictionless contact*” în modelul numeric M_4 ;
- creșterea procentului de armare longitudinală în modelul numeric M_5 ;
- adăugarea de plăci de dublare în modelul numeric M_6 ;
- creșterea clasei de beton în modelele numerice M_7 și M_8 ;
- adăugarea nervurilor de beton armat în modelul numeric M_9 ;
- adăugarea nervurilor de beton armat și a tablei trapezoidale în modelul numeric M_{10} ;
- adăugarea unei rigidizări sudate pe talpa superioară a grinzii slim-floor în modelul numeric M_{11} ;
- decuplarea zonei disipative a grinzii slim-floor de beton în modelul numeric M_{12} .

Influența *RFS*. Aplicarea tehnicii *RFS* asigură ductilitatea elementului structural disipativ, care se manifestă printr-un răspuns simetric al nodului grindă-stâlp slim-floor. Astfel, o altă concluzie importantă desprinsă din programul numeric este aceea că forma grinzii slim-floor în zona disipativă are o influență semnificativă asupra mecanismului de cedare a nodului grindă-stâlp slim-floor. Prin aplicarea tehnicii *RFS*, tensiunile și deformațiile sunt distribuite uniform pe înălțimea zonei disipative, ceea ce duce în cele din urmă la un mod de cedare ductil în zona

disipativă. Dacă *RFS* este eliminat, rândurile inferioare de șuruburi cedează la moment încovoietor pozitiv. Înainte de scăderea bruscă a rezistenței pe curba moment-rotire, componentele care au susținut cele mai mari valori ale deformației plastice au fost șuruburile (e.g., $0,119 \text{ mm/mm}$). În același timp, valoarea maximă a deformației plastice în zona disipativă a fost jumătate din cea a șuruburilor (e.g., $0,055 \text{ mm/mm}$). La o concluzie similară s-a ajuns și în studiul efectuat de Plumier [12], în care a fost investigat experimental mecanismul de cedare al îmbinărilor cu secțiune redusă a grinzii (RBS), dar și celor fără RBS. În studiul menționat anterior, s-a concluzionat că speciamele investigate, care nu includeau o secțiune redusă a grinzii (RBS), au suferit cedări fragile materializate prin ruperea șuruburilor.

Influența planșeului de beton armat. Prezența planșeului din beton armat a influențat rezistența la încovoiere, rigiditatea și capacitatea de rotire a modelului numeric. De exemplu, atunci când planșeul de beton a fost îndepărtat din modelul M_2 , rezistența la încovoiere, rigiditatea inițială și rotirea la momentele de încovoiere maximă au fost mai mici decât în modelul numeric de referință *RM*.

Influența concrete dowels. Interacțiunea în modelele numerice studiate a fost asigurată prin dispunerea de armături de oțel și a conectorilor de tip *concrete dowels*. Deși conectorii de tip *concrete dowels* au fost eliminați din modelul numeric M_3 , tensiunile au fost transferate prin intermediul armăturilor înclinate, dar și prin frecare, astfel încât curba moment-rotire a rămas similară cu cea a modelului numeric de referință *RM*. În consecință, în afară de eliminarea conectorilor de tip *concrete dowels*, în următorul model M_4 a fost eliminată și frecarea dintre componente. Efectul acestuia din urmă a produs o serie de modificări, dintre care cea mai importantă este o valoare ridicată a alunecării relative, e.g., $17,6 \text{ mm}$. Având în vedere acest lucru, s-a ajuns la concluzia că soluția tehnică a nodului grindă-stâlp slim-floor ar trebui să includă conectori de tip *concrete dowels*. Concluzia este cu atât mai importantă în regiunile seismice, unde ciclurile de încărcare multiple ar putea diminua frecarea și conduce la consecințe nedorite.

Influența unui procent mai ridicat de armare. Un raport mai mare de armare longitudinală a planșeului de beton a condus la un mecanism de cedare diferit. Dezvoltarea deformațiilor plastice în porțiunile de beton din planșeul de beton aflate în compresiune a început la valori ale momentului de încovoietor egale cu 450 kNm . La 940 kNm , porțiuni ale planșeului de beton aflate în compresiune au prezentat fisuri severe, iar una dintre armăturile transversale situate în spatele stâlpului s-a rupt, ceea ce a dus la încheierea analizei. Parametrul ar putea fi investigat în continuare, dar creșterea raportului de armare longitudinală ar trebui să fie însoțită și de o creștere a clasei de beton.

Influența plăcilor de dublare, a rigidizării pe talpa superioară a grinzii și a decuplării zonei disipative de beton. Având în vedere parametrii investigați, s-a concluzionat că pot fi utilizate măsuri pentru a reduce dezvoltarea deformațiilor plastice în îmbinarea grindă-stâlp cu șuruburi. În acest sens, adăugarea de plăci de dublare în modelul M_6 , adăugarea unei rigidizări pe talpa superioară a grinzii slim-floor în modelul M_{11} și decuplarea zonei disipative de betonul armat în modelul M_{12} și-au dovedit eficiența:

- modelul numeric M_6 : scădere de 17.6% a deformațiilor plastice din șuruburi sub moment încovoietor pozitiv;
- modelul numeric M_{11} : scădere de 32% a deformațiilor plastice din șuruburi sub moment încovoietor pozitiv și de 24% sub moment încovoietor negativ;
- modelul numeric M_{12} : scădere de 24% a deformațiilor plastice din șuruburi sub moment încovoietor pozitiv, și de 6.7% sub moment încovoietor negativ.

Influența claselor superioare de beton. S-a constatat că mărirea clasei de beton ca parametru de sine stătător în modelele numerice M_7 și M_8 nu a avut nicio influență asupra rigidității inițiale.

În ambele modele numerice analizate, valoarea rigidității inițiale a rămas aproape identică cu cea din modelul de referință *RM*. Nu a putut fi demonstrată nici o inițiere mai târzie a fisurării sau chiar o reducere a fisurării planșului de beton armat.

Influența nervurilor de beton armat și a tablei metalice trapezoidale. Nici adăugarea de nervuri din beton armat, nici cea de tablă trapezoidală în modelele numerice M_9 , M_{10} nu au împiedicat dezvoltarea unei articulații plastice în zona disipativă a grinzii slim-floor. Prezența tablei trapezoidale a fost inclusă în programul experimental al lui Wang et al. [13], care au concluzionat că adăugarea acestui parametru nu a modificat mecanismul de cedare obținut anterior.

Rezultatele FEA au subliniat rolul central al *RFS* în zona disipativă a grinzii slim-floor, ca element "mai slab", și al îmbinării cu placă de capăt extinsă ca o componentă suprarezistentă, în obținerea unei performanțe seismice adecvate a nodului grindă-stâlp slim-floor. Cu toate acestea, programul numeric ar trebui extins cu analize suplimentare pentru a contribui la stabilirea unui domeniu de aplicare pentru nodurile grindă-stâlp de tip slim-floor.

4. Procedura de Proiectare și Detaliere

Proiectarea nodurilor grindă-stâlp de tip slim-floor nu este acoperită de codurile europene, deși, datorită interesului tot mai mare și a impulsului în direcția eficienței și a sustenabilității, acest lucru s-ar putea schimba în curând. Prin urmare, sunt necesare prevederi pentru sistemele slim-floor. Procedura actuală de proiectare se bazează pe reguli noi și pe un număr restrâns de reguli de proiectare existente pentru elementele structurale compuse din oțel și oțel-beton, care au fost propuse pentru a fi extinse la nodurile grindă-stâlp de tip slim-floor. Procedura de proiectare propusă în cadrul acestui studiu se adresează nodurilor grindă-stâlp de tip slim-floor integrate în structurile rezistente la seisme și care sunt dezvoltate pentru a îndeplini criteriile clasei 3 de ductilitate. Având în vedere clasificările de rezistență și rigiditate din prEN 1993-1-8 [7], nodurile grindă-stâlp ale cadrelor necontravântuite trebuie clasificate ca total rezistente și rigide sau semi-rigide, conform lui Landolfo et al. [14]. Pentru a obține un răspuns adecvat al nodului slim-floor, au fost utilizate mai multe strategii, precum:

- asigurarea ductilității componentei disipative principale (zona disipativă a grinzii slim-floor);
- asigurarea suprarezistenței îmbinării cu șuruburi;
- asigurarea suprarezistenței sudurilor din zona nodului;
- asigurarea suprarezistenței elementului structural adiacent (stâlpului).

Grinda slim-floor ar trebui să fie obținută dintr-o jumătate de profil I din oțel [1]. Pe jumătatea rămasă a profilului de oțel ar trebui sudată o placă de oțel mai lată pentru a-i servi ca talpă inferioară, formând astfel o grindă asimetrică. Ductilitatea la nivelul elementului structural este obținută prin aplicarea tehnicii *RFS*. Deoarece grinda slim-floor este componenta disipativă principală, au fost propuse următoarele reguli în procedura de proiectare, pentru a asigura ductilitatea grinzii:

- aplicarea cerințelor de materiale material din variantele în vigoare și variantele prenormative ale normelor europene (i.e., prEN 1998-1-2 [6], EN 1993-1-1 [15], prEN 1993-1-1 [14]) corespunzătoare elementelor structurale disipative compuse oțel-beton;
- aplicarea cerințelor de materiale material din avizul tehnic național (*National Technical Approval Z-26.4-59* pentru *CoSFB* [17]);
- aplicarea regulilor pentru stabilirea clasei secțiunii pentru grinzile de tip slim-floor din varianta prenormativă a prEN 1994-1-1 [5];
- aplicarea tehnicii *RFS* tălpii inferioare a grinzii slim-floor.

În consecință, clasa de oțel a profilului grinzii slim-floor trebuie să fie în intervalul S355 ÷ S420

[17], iar materialul trebuie să asigure o ductilitate minimă, i.e., $f_u / f_y \geq 1.10$, o alungire mai mare de 15 %, în conformitate cu prEN 1998-1-2 [6] și cu EN 1993-1-1-1 [15]. În conformitate cu versiunea prenormativă a Eurocodului 4 [5], clasa de secțiune transversală a grinzii slim-floor trebuie să fie 1. *RFS* ar trebui să se aplice tălpii inferioare a grinzii SF, iar forma tăieturii ar trebui să fie de tip radial. Dimensiunile propuse pentru *RFS* s-au bazat pe cele din AISC 358-16 [8] pentru îmbinările cu RBS. Cu toate acestea, din cauza lățimii mai mari a tălpii inferioare a grinzii slim-floor și a existenței betonului armat în jurul profilului metalic - ambele diferențiind sistemele slim-floor de configurațiile clasice cu planșeu deasupra unui profil metalic - dimensiunile *RFS* au fost adaptate la particularitățile sistemelor cu planșeu subțire.

Îmbinarea cu șuruburi trebuie să fie menținută în domeniul de răspuns elastic. Astfel, îmbinarea grindă-stâlp cu șuruburi ar trebui proiectată pentru a dezvolta o rezistență mai mare decât zona disipativă cu *RFS* a grinzii slim-floor, atât la moment încovoietor negativ, cât și la moment încovoietor pozitiv. Pentru a realiza acest lucru, s-a propus ca tipul de îmbinare să fie cu placă de capăt extinsă și cu șuruburi de înaltă rezistență 10.9. Verificarea îmbinării cu șuruburi trebuie efectuată în conformitate cu prEN 1998-1-2 [6] și EN 1993-1-8 [7], incluzând efectele suprazistenței materialului γ_{rm} și ale factorului de întărire γ_{sh} (strain hardening factor). Momentul încovoietor și solicitarea de forfecare pentru îmbinarea cu șuruburi trebuie calculate luând în considerare eforturile interne din zona disipativă cu *RFS* proiectate pe fața stâlpului și înmulțite cu factorii γ_{rm} și γ_{sh} . Sudurile adiacente îmbinării grindă-stâlp cu șuruburi trebuie proiectate astfel încât să dezvolte o rezistență mai mare decât zona disipativă a grinzii slim-floor. În conformitate cu regulile codului seismic european [6], trebuie respectate și următoarele:

- sudurile critice ar trebui realizate cu penetrare completă și resudarea rădăcinii; următoarele suduri trebuie considerate ca fiind critice:
 - sudurile dintre tălpile grinzii slim-floor și placa de capăt;
 - sudurile dintre rigidizările de pe stâlp și tălpile stâlpului;
- sudurile de colț ar trebui să aibă o grosime minimum de $0.8 \cdot t_{min}$, unde t_{min} este grosimea cea mai mică a componentelor sudate.

Stâlpul ar trebui să fie din oțel, fie realizat într-o soluție compusă oțel-beton cu profil H. Pentru întărirea panoului de inimă al stâlpului se pot utiliza rigidizări și plăci suplimentare sudate pe inimă în conformitate cu prEN 1998-1-2 [6] și prEN 1993-1-8 [7]. Rezistența la forfecare $V_{wp,Rd}$ a panoului de inimă al stâlpului ar trebui considerată ca fiind rezistența elastică la forfecare a panoului fără un surplus de rezistență dat de adăugarea plăcilor de continuitate, în conformitate cu EN 1998-1 [18].

Actuala procedură de proiectare promovează aplicarea anumitor reguli de cod existente și a altora care vor fi incluse în viitoarea versiune a prEN 1998-1-2 [6] și prEN 1994-1-1-1 [5] pentru elemente din oțel și compuse oțel-beton proiectate ca elemente structurale disipative, precum și a regulilor din avizul tehnic național pentru CoSFB [17]. În plus față de acestea, utilizarea *RFS* a fost introdusă în procedura de proiectare actuală, împreună cu dimensiunile corespunzătoare. În esență, obiectivul procedurii de proiectare propuse este de a obține o performanță seismică adecvată a nodului grindă-stâlp de tip slim-floor (e.g., noduri cu rezistență totală și rigide sau semi-rigide, capacitate de rotire de nod la Siguranța Vieții de $\pm 40 \text{ mrad}$, mecanism de cedare ductil). După cum s-a dovedit prin mijloace experimentale și numerice, se poate obține o performanță seismică adecvată atât timp cât dezvoltarea articulației plastice este direcționată către zona disipativă a grinzii slim-floor. Cu toate acestea, dezvoltarea articulației plastice în grinzii slim-floor este posibilă numai dacă aceasta este un element structural ductil, în timp ce îmbinarea cu placă de capăt și șuruburi, sudurile și panoul de inimă al stâlpului au o suprazistență suficientă față de zona disipativă cu *RFS*.

5. Analize structurale

5.1 Studiul de caz pe cadre necontravântuite

Evaluarea performanței seismice a unui cadru necontravântuit cu îmbinări grindă-stâlp de tip slim-floor, *MRF-SF*, cu analize statice și dinamice neliniare a fost realizată cu SAP2000 [19]. În paralel, a fost dezvoltat un cadru necontravântuit de referință cu grinzi compuse clasice și cu interacțiune parțială, *MRF-RF*. Obiectivele analizelor structurale au fost: (i) de a verifica cerința de rotire de nod rezultată din situația de proiectare seismică asupra nodului grindă-stâlp de tip slim-floor, (ii) de a o compara cerința de rotire cu capacitatea de rotire obținută pe cale experimentală și (iii) de a evalua performanța seismică a cadrului *MRF-SF* cu noduri grindă-stâlp slim-floor.

Modul optim de modelare al nodului grindă-stâlp de tip slim-floor în programul de analiză structurală presupune parcurgerea următoarelor etaje:

- modelarea secțiunii “complete” a grinzii slim-floor (ținând cont de secțiunea transversală asimetrică a acesteia):
 - caracteristici geometrice și de material rezultate în urma testelor experimentale;
 - introducerea unui moment de inerție echivalent al secțiunii “complete” a grinzii slim-floor, $I_{eq,full\ section}$;
- modelarea zonei disipative cu *RFS* a grinzii slim-floor:
 - caracteristici geometrice și de material rezultate în urma testelor experimentale;
 - introducerea unui moment de inerție echivalent al secțiunii cu *RFS* a grinzii slim-floor, $I_{eq,RFS}$;
 - crearea și introducerea unui model de articulație plastică bazat pe date experimentale post-procesate, aceasta conținând rotirea plastică a zonei disipative a grinzii slim-floor;
- modelarea îmbinării grindă-stâlp:
 - crearea unui element elastic de tip *linear link*;
 - introducerea rigidității inițiale a îmbinării grindă-stâlp în acest element;
- modelarea panoului de inimă al stâlpului:
 - crearea unui element de tip resort;
 - introducerea rigidității inițiale a panoului de inimă al stâlpului în acest element.

Contribuția planșeului de beton armat la rezistența și rigiditatea nodului grindă-stâlp slim-floor a fost inclusă în modelul nodului prin intermediul momentului de inerție echivalent al secțiunii "complete" și al zonei disipative cu *RFS*. În plus, modelul de articulație plastică al grinzilor slim-floor a conținut rotirea plastică a zonei disipative, care includea și planșeul din beton armat. Curba înfășurătoare a zonei disipative a grinzii slim-floor a fost obținută din curba experimentală ciclică, urmând prevederile FEMA P-795 [9] și luând în considerare primul ciclu al fiecărei amplitudini. Parametrii de răspuns și criteriile corespunzătoare modelului de articulație plastică a zonei disipative au fost calculate pe baza conform Landolfo et al. [14].

Performanța seismică a fost evaluată prin analize neliniare statice (*Pushover* cu metoda *N2* [20]) și dinamice (*Response-History Analysis* cu un set de 7 accelerograme selectate dintr-o bază de date [21]). Deplasările relative de etaje maxime obținute prin aplicarea analizei *Pushover* pe cadrul *MRF-SF* au fost: 7.8 mrad la SLS, 16.8 mrad la SLU și 24.3 mrad la Starea Limită de Prevenire a Colapsului. Deplasările relative de etaje medii obținute prin aplicarea analizei *Response-History Analyses* pe cadrul *MRF-SF* au fost: 6.5 mrad la SLS, 13.1 mrad la SLU și 19.4 mrad la Starea Limită de Prevenire a Colapsului. Valorile maxime ale deplasărilor relative de etaj obținute din analiza *Response-History Analyses* cu cea mai defavorabilă accelerogramă #A1 pe cadrul *MRF-SF* au fost: 6.8 mrad la SLS, 13.7 mrad la SLU și 21.1 mrad la Starea Limită de Prevenire a Colapsului. Astfel, s-a putut concluziona faptul că performanța seismică

a cadrului cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor a fost una bună, deplasările maxime permise nefiind depășite, iar răspunsul structural la SLS și SLU a fost unul dezirabil. În comparație cu capacitatea de rotire experimentală a nodului slim-floor la SLU de $\pm 45.35 \text{ mrad}$, valoarea medie a cerinței de rotire a unui etaj din cadrul *MRF-SF* a fost de 13.1 mrad . La aceste concluzii se adaugă și valorile mai mici ale rotirilor în articulațiile plastice ale grinzilor slim-floor obținute în urma analizelor neliniare decât capacitatea de rotire dovedită pe cale experimentală. Valoarea maximă a rotirii din articulațiile grinzilor slim-floor a fost 7.7 mrad la SLU, iar capacitatea de rotire a zonei disipative a fost 29.4 mrad .

În continuare, s-a efectuat o evaluare simplificată a consumului de oțel pe cele două cadre, luând în considerare grinzile principale, stâlpii și grinzile secundare pe direcția longitudinală (corespunzătoare unei deschideri de 6 metri). În cazul cadrului *MRF-SF*, consumul de oțel este de $22,3 \text{ tone}$ sau $51,5 \text{ kg/m}^2$. În schimb în cazul cadrului *MRF-RF* se obține un consum al oțelului de $23,2 \text{ tone}$ sau $53,7 \text{ kg/m}^2$. General vorbind, utilizarea oțelului este cu $3,9\%$ mai mică în cazul cadrului *MRF-SF*. Cu toate acestea, deoarece această evaluare a fost efectuată pe cadre 2D, ignorând armăturile, betonul și tabla trapezoidală, o abordare mai realistă ar trebui să le includă și pe acestea.

În cele din urmă, după cum au evidențiat rezultatele analizelor structurale neliniare, integrarea grinzii slim-floor într-un sistem de preluare a forțelor laterale, precum un cadru necontravântuit, a fost posibilă și a condus la rezultate bune în domeniul de răspuns neliniar. Pentru a dezvolta un model precis al nodului slim-floor, caracteristicile geometrice și mecanice ale acestuia trebuie să fie introduse în structură pentru analize în domeniul elastic. În domeniul neliniar, modelul de articulație plastică trebuie construit din curba ciclică, urmând prevederile relevante ale normelor. În comparație cu cadrul *MRF-RF*, în *MRF-SF* s-a obținut un câștig de spațiu vertical de $0,20 \text{ m}$ pe etaj datorită înălțimii reduse a sistemului slim-floor. Astfel, pentru o performanță seismică relativ similară, în cadrul *MRF-SF* s-a câștigat un total de $0,80 \text{ m}$ de spațiu vertical, ce corespunde la 4 etaje ale clădirii.

5.2 Studiul de caz pe un cadru contravântuit centric

Evaluarea performanței seismice a unui cadru de 16 etaje contravântuit centric cu nodur grindă-stâlp de tip slim-floor (*CBF-SF*) a fost efectuată în acest studiu de caz. Performanța seismică a fost evaluată prin aplicarea analizelor neliniare statice și dinamice (e.g., *Pushover* cu metoda *N2* [20], *Response History Analysis* cu 7 accelerograme) cu ajutorului programului de calcul SAP2000 [19]. Scopul acestui studiu de caz pe cadrul *CBF-SF* a fost de a: (i) verifica cerința de rotire rezultată în urma aplicării analizelor neliniare, (ii) compara cerința de rotire a nodului cu capacitatea de rotire a acestuia obținută pe cale experimentală și (iii) evalua performanța seismică a cadrului *CBF-SF* cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor.

Modelarea răspunsului grinzilor slim-floor din deschiderea centrală a cadrului *CBF-SF* în domeniul neliniar s-a efectuat în aceeași manieră ca și în studiul de caz pe cadre necontravântuite (e.g., pentru cadrul *MRF-SF*). În schimb, spre deosebire de studiul de caz pe cadrul *MRF-SF*, îmbinările grinzilor slim-floor din deschiderea centrală a cadrului *CBF-SF* s-au considerat ca fiind rigide, în conformitate cu norma europeană prEN 1993-1-8 [7]. Rigiditatea inițială a îmbinării a fost verificată în conformitate cu prEN 1993-1-8 [7], permițându-se astfel clasificarea ei ca fiind rigidă. O procedură riguroasă a fost urmată și în cazul modelării contravântuirilor în "X" pe 2 etaje din cadrul *CBF-SF*. Bazat pe studii de specialitate (e.g., D'Aniello et al. [22] [23], Dicleli and Calik [24]) și pe iterații, două modele au fost create pentru contravântuirile în "X", e.g., un model fenomenologic de tip *P hinge* pentru analiza *Pushover* și un model fizic de tip *P-M2-M3* (*P-M2-M3 fibre plastic hinge*) pentru analiza *Response History Analysis*. Prin compararea cu rezultatele experimentale ale unei contravântuiri cu aceeași secțiune transversală (specimenul de contravântuire *SP59-1* din [25])

s-a dovedit acuratețea celor două modele de contravântuiri dezvoltate.

Performanța seismică a cadrului *CBF-SF* poate fi clasificată diferit în funcție de tipul de analiză neliniară efectuată. Spre exemplu, valorile deplasărilor relative de etaj rezultate în urma aplicării analizei *Pushover* au depășit limitele impuse de codul seismic [6] (e.g., $18.5 \text{ mrad} > 15 \text{ mrad}$ reprezentând limita maximă admisă la SLU). Cu toate acestea, rezultatele medii ale analizei *Response History Analysis RHA* au dovedit că deplasările relative de etaj ale cadrului s-au aflat în limitele impuse de cod (e.g., 6.6 mrad la SLS și 13.8 mrad la SLU). Un alt indicator al unei performanțe seismice adecvate este modul de dezvoltare al mecanismului global. În cadrele cu contravântuiri, dezvoltarea articulațiilor plastice trebuie să aibă loc în contravântuiri înainte de oricare alte elemente structurale, așa cum prevede codul seismic. Această condiție este în principal îndeplinită indiferent de analiza neliniară aplicată cadrului.

Deplasările relative de etaj la SLU rezultate în urma aplicării analizei *Pushover* și *RHA* au fost: 18.5 mrad , respectiv 13.8 mrad (valoare medie). În acest context, capacitatea de rotire a nodului slim-floor la SLU de $\pm 45.35 \text{ mrad}$ este mai mare decât cerințele rezultate din analizele structurale pe cadrul *CBF-SF*. De asemenea, și rotirile din articulațiile plastice ale grinzilor slim-floor au fost mai mici la SLU (e.g., 8.82 mrad) decât capacitatea acestora de rotire dovedită pe cale experimentală (e.g., 29.4 mrad). Astfel, s-a putut demonstra o bună comportare seismică a cadrului *CBF-SF* cu noduri grindă-stâlp slim-floor.

5.3 Studiul de caz pe un cadru dual contravântuit centric

Evaluarea performanței seismice a unui cadru dual contravântuit centric de 16 etaje (*D-CBF*), care a inclus noduri grindă-stâlp slim-floor în toate deschiderile sale, s-a efectuat în studiul de caz curent. Performanța seismică a fost evaluată prin aplicarea analizelor neliniare statice și dinamice (e.g., *Pushover* cu metoda *N2* [20], *Response History Analysis* cu 7 accelerograme) cu ajutorul programului de calcul *SAP2000* [19]. Scopul acestui studiu de caz pe cadrul *D-CBF* a fost de a: (i) verifica cerința de rotire rezultată în urma aplicării analizelor neliniare, (ii) compara cerința de rotire a nodului cu capacitatea de rotire a acestuia obținută pe cale experimentală, (iii) evalua performanța seismică a cadrului *CBF-SF* cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor și (iv) de a verifica dacă structura este recentrabilă după cutremure SLS până la SLU.

Contribuția de 25 % a subsistemelor *MRF* la rezistența totală a cadrului dual a fost verificată prin trei metode, toate acestea evidențiind o rezistență / capacitate suficientă a deschiderilor necontravântuite. Acest lucru a permis utilizarea valorii maxime a factorului de comportare pentru cadrele duale cu un subsistem *CBF*, și anume 4,8. Prima metodă s-a bazat pe formule existente în diferite studii. Ca parte a celei de-a doua metode utilizate, a fost propusă o abordare diferită pentru evaluarea unui subsistem *CBF* cu grinzi cu îmbinări rigide. În abordarea analitică propusă, în afară de rezistența dată de contravântuiri, poate fi luată în considerare și rezistența grinzilor din subsistemul *CBF*. Cea de-a treia metodă a constatat într-o evaluare individuală a rezistenței subsistemelor cadrului dual prin intermediul analizelor neliniare. Rezultatele obținute sunt următoarele:

- utilizând metoda 1 (analitică): contribuție de 43 % a celor două subsisteme *MRF*;
- utilizând metoda 2 (analitică) : contribuție de 31 % a celor două subsisteme *MRF*;
- utilizând metoda 3 (analize structurale neliniare): contribuție de 25 % la SLS, 35 % la SLU și 36 % la Starea Limită de Prevenire a Colapsului (*Near Collapse*).

Indicatori ai unei bune performanțe seismice sunt deplasările relative de etaj la SLS și SLU. Deoarece valorile obținute în urma aplicării analizelor neliniare *Pushover* cu metoda *N2* și *Response History Analysis* au fost mai mici (e.g., 17.0 mrad la SLU din *Pushover* și 11.7 mrad la SLU din *RHA*) decât valorile maxime admise de norma seismică europeană (i.e., 20 mrad la

SLU), criteriile de deplasare s-au putut considera ca fiind satisfăcute. În comparație cu capacitatea de rotire a nodului dovedită pe cale experimentală de $\pm 45.35 \text{ mrad}$ la SLU, cerințele rezultate în urma aplicării analizelor structurale neliniare au fost mai mici. La acești indicatori de bună performanță seismică se adaugă și valorile mai mici ale rotirilor din articulațiile plastice ale grinzilor slim-floor decât capacitatea de rotire dovedită din punct de vedere experimental ($9.54 \text{ mrad} < 29.4 \text{ mrad}$ la SLU).

Capacitatea de recentrare a cadrului dual *D-CBF* la intensități seismice până la SLU a fost verificată prin aplicarea unor analize structurale neliniare. Procedura folosită pentru această verificare a permis determinarea deplasărilor relative de etaj la care: (i) curgerea grinzilor slim-floor din deschiderile *MRF* a fost inițiată și (ii) la care s-a atins deformația ultimă a contravânturilor din deschiderea *CBF*. Deoarece deplasarea la vârful structurii la care se produce curgerea grinzilor slim-floor este mai mare decât cea la care se atinge deformația ultimă a contravânturilor, se concluzionează că *D-CBF* ar putea fi recentrat la intensități ale acțiunii seismice mai mici decât SLS.

6. Concluzii

Sistemul slim-floor este o metodă alternativă de realizare a planșeelor, fiind caracterizat prin integrarea mai multor componente într-un element structural unitar. Acest lucru înseamnă că elementul structural principal, grinda de oțel asimetrică, dar și celelalte componente sunt încorporate în planșeul de beton armat. Din cauza tipologiei actuale a îmbinărilor dintre grinzi de tip slim-floor și stâlpii de oțel, care sunt articulate, dar și a faptului că aceste sisteme de planșeu sunt proiectate exclusiv la încărcări gravitaționale în domeniul elastic, soluția tehnică actuală este incompatibilă cu proiectarea seismică a cadrelor. Studiul de față este elaborat cu scopul de a oferi o soluție tehnică pentru nodurile grindă-stâlp ale planșeelor de tip slim-floor, ceea ce ar face ca acest sistem să se preteze structurilor proiectate la seismicitate medie și ridicată.

Concluzii principale ale programului experimental. Luând în considerare clasificarea nodului ca total rezistent și semi-rigid, capacitatea de rotire a acestuia de $\pm 45,4 \text{ mrad}$ la SLU, zona disipativă a grinzii slim-floor ca sursă principală de disipare a energiei seismice, răspunsul histeretic stabil și simetric cu o degradare scăzută a rigidității și a rezistenței sub sarcini ciclice, dar și mecanismul de cedare ductil, nodul grindă-stâlp slim-floor a demonstrat o performanță seismică adecvată.

Concluzii principale ale programului numeric. Modelul numeric de referință calibrat al nodului slim-floor a dovedit o bună acuratețe în reproducerea curbei monotone experimentale (e.g., abateri în intervalul $0,1 \div 3,2 \%$). Astfel, modelul numeric de referință a întărit constatările experimentale în ceea ce privește mecanismul de cedare și sursa principală de disipare a energiei, permițând astfel dezvoltarea unui studiu parametric. Pe baza rezultatelor modelului calibrat, mecanismul ductil de cedare a constat în dezvoltarea unei articulații plastice în zona disipativă a grinzii slim-floor, indiferent de direcția de momentului încovoietor. Deși alte componente ale nodului, precum rigidizările și o parte din șuruburi, au suferit deformații plastice locale, cea mai mare parte a acestora a fost dezvoltată în zona disipativă a grinzii slim-floor. Având în vedere că deformația plastică în îmbinarea cu șuruburi a fost mică și limitată la câteva elemente finite, răspunsul acestei componente a fost caracterizat ca fiind în principal elastic.

Concluzii principale ale procedurii de proiectare și detaliere. Baza procedurii de proiectare propuse este reprezentată de următoarele: (i) anumite reguli de proiectare din versiunea prenormativă a prEN 1994-1-1 pentru slim-floor și (ii) principiile proiectării bazate pe capacitate pentru noduri grindă-stâlp din oțel și compuse ale cadrelor necontravântuite (DC3). În plus față de acestea, a fost propusă o metodă de asigurare a ductilității grinzii slim-floor prin

implementarea tehnicii *RFS*, care presupune slăbirea secțiunii tălpii inferioare a grinzii. O performanță seismică adecvată a nodurilor slim-floor cu secțiune transversală similară cu cea testată în studiul de față poate fi obținută prin dezvoltarea de noduri total rezistente și rigide sau semi-rigide, care pot dezvolta o capacitate de rotire de $\pm 40 \text{ mrad}$ la SLU (conform AISC 341-16) sau o rotire plastică de $\pm 30 \text{ mrad}$ (conform prEN 1998-1-2).

Concluzii principale legate de modelarea structurală. Secțiunea dedicată modelării și analizei structurale este cuprinzătoare, constând în studii de caz individuale pe cadre necontravântuite, cadre multietajate cu contravântuiri concentrice și cadre duale contravântuite centric, în care noduri grindă-stâlp slim-floor au fost integrate. Analizele structurale aplicate au fost neliniare statice și dinamice (e.g., *Pushover* cu *N2*, *Response History Analysis* cu șapte accelerograme). Scopul acestui capitol a fost de a: (i) verifica cerința de rotire rezultată în urma aplicării analizelor neliniare, (ii) compara cerința de rotire a nodului cu capacitatea de rotire a acestuia obținută pe cale experimentală și (iii) evalua performanța seismică a cadrelor cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor.

Pentru a verifica fiabilitatea modelului dezvoltat pentru nodul slim-floor, procedura de modelare a fost comparată cu rezultatele obținute pe cale experimentală. Iterațiile de modelare a nodului slim-floor au arătat că o abordare riguroasă, care implică o modelare precisă a geometriei (secțiune "completă", zonă disipativă cu *RFS*), a materialelor (materiale testate) și mecanică ($I_{eq,fullsection}$, $I_{eq,RFS}$) conduce la cele mai realiste rezultate. Procedura de modelare optimă a nodului slim-floor a constat în definirea: (i) răspunsului inelastic al grinzii slim-floor prin intermediul unei articulații plastice, (ii) îmbinării cu șuruburi prin intermediul unui element de tip *link* ce a conținut rigiditatea inițială a acesteia și (iii) panoului de inimă al stâlpului prin intermediul unui resort ce a conținut rigiditatea acestuia. În cazul contravânturilor, iterațiile efectuate au arătat că modelul acestora trebuie să fie adaptat la tipul de analiză neliniară. În consecință, a fost utilizat un model fenomenologic pentru analiza *Pushover* și un model de fizic pentru analiza *RHA* - ambele fiind validate anterior în raport cu rezultatele experimentale ale unei contravântuiri.

Concluzii principale ale analizelor structurale pe cadre necontravântuite, contravântuite centric, duale contravântuite centric. Performanța seismică a cadrelor analizate (e.g., cadre necontravântuite, contravântuite centric, duale contravântuite centric) s-a efectuat prin aplicarea analizelor structurale statice și dinamice în domeniul neliniar de răspuns. În general, rezultatele corespunzătoare structurilor analizate (în termeni de rotiri de etaj, de rotiri în articulațiile plastice, deformații la vârful structurilor, etc) și obținute ca urmare a aplicării *Pushover* cu metoda *N2*, au fost conservative, asemănându-se în valori cu cea mai defavorabilă accelerogramă din setul de cele 7 utilizate pentru *Response History Analysis*. Acest lucru a fost valabil pentru toate structurile analizate. Performanța seismică s-a evaluat prin următoarele metode: (i) comparația dintre deplasările relative de etaj la SLS și ULS – transformate în rotire de etaj – și limitele admise de codul seismic european, (ii) comparația dintre rotirea de etaj și capacitatea totală de rotire a nodului grindă-stâlp de tip slim-floor, (iii) comparația dintre rotirile plastice din articulațiile dezvoltate în grinzile slim-floor și capacitatea de rotire plastică obținută pe cale experimentală la SLU a grinzii și (iv) comparația dintre dezvoltarea mecanismului global al structurilor analize și criteriile proiectării bazate pe capacitate. Bazat pe aceste metode, o bună comportare seismică a structurilor necontravântuite, contravântuite centric și duale contravântuite centric a fost demonstrată. Cerințele de rotire de etaj la SLU rezultate din analizele structurale neliniare statice și dinamice au putut fi cuantificate, după cum urmează:

- Cadrul necontravântuit cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor (analiză *RHA*, valoare medie): $13.1 \text{ mrad} < 20 \text{ mrad}$ (limită la SLU pentru cadre MRF din prEN 1998-1-2);

- Cadrul contravântuit centric cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor (analiză *RHA*, valoare medie): $13.8 \text{ mrad} < 15.0 \text{ mrad}$ (limită la SLU pentru cadre CBF din prEN 1998-1-2);
- Cadrul dual contravântuit centric cu noduri grindă-stâlp de tip slim-floor (analiză *RHA*, valoare medie): $11.7 \text{ mrad} < 20.0 \text{ mrad}$ (limită la SLU pentru cadre duale contravântuite centric din prEN 1998-1-2);

Luând în considerare rezultatele experimentale, rezultatele modelului numeric de referință și ale studiului parametric, rezultatele analizelor structurale neliniare statice și dinamice ale cadrelor necontravântuite (*MRF-SF*), contravântuite centric (*CBF-SF*) și duale contravântuite centric (*D-CBF*), se confirmă posibilitatea de a adapta nodurile grindă-stâlp de tip slim-floor cerințelor codului seismic european [6] pentru structuri proiectate în clasa 3 de ductilitate. Principiile proiectării bazate pe capacitate sunt aplicabile nodurilor grindă-stâlp de tip slim-floor, iar o performanță seismică adecvată se poate obține dacă disiparea energiei seismice este direcționată către capetele grinzilor, în timp ce îmbinarea cu șuruburi, sudurile adiacente și panoul de inimă al stâlpului posedă suprazistență. În acest scop, este necesar ca nodurile slim-floor să fie total rezistente și minim semi-rigide, iar capacitatea totală de rotire a acestora să fie mai mare de $\pm 40 \text{ mrad}$ la Starea Limită Ultimă.

References

- [1] ArcelorMittal: Slim-floor – an innovative concept for floors (brochure). ArcelorMittal Europe – Long Products Sections and Merchant Bars (2021).
- [2] Lawson, R.M., Bode, H., Brekelmans, J.W.P.M., Wright, P.J., Mullet, D.L.: Slimflor and slimdeck construction: European developments. *The Structural Engineer*, 77(8), pp. 28-32 (1999).
- [3] Chen, Q., Shi, Y.J., Wang, Y.Q., Chen, H., Zhang, Y.: Structural analysis on light steel frame with steel-concrete composite slim beam. *Building Structures*, 32(2), pp. 17-20 (2002).
- [4] ArcelorMittal: High-rise buildings. ArcelorMittal Europe (brochure) – Long Products Sections and Merchant Bars (2017).
- [5] CEN European Committee for Standardization: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1:2021, pre-normative), Brussels, Belgium.
- [6] CEN European Committee for Standardization: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-2: Earthquake resistance design of structures (EN 1998-1-2:2021, pre-normative), Brussels, Belgium.
- [7] CEN European Committee for Standardization: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of connections (EN 1993-1-8:2020, pre-normative), Brussels, Belgium.
- [8] ANSI/AISC 341-16: Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute for Steel Construction, Chicago, USA (2016a).
- [9] FEMA P-795: Quantification of building seismic performance factors: Component equivalency methodology. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C, USA (2011).
- [10] ECCS (European Convention for Constructional Steelwork): Recommended testing procedures for assessing the behaviour of structural elements under cyclic loads. Brussels, Belgium (1986).
- [11] Abaqus v2019. Dassault Systèmes, Waltham, USA (2019).
- [12] Plumier, A.: The dogbone: back to the future. *Engineering Journal (New York)*, 34(2nd quarter), pp. 61-67 (1997).
- [13] Wang, Y., Yang, L., Shi, Y., Zhang, R.: Loading capacity of composite slim frame beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(3), pp. 650-661 (2009).

- [14] Landolfo, R., Mazzolani, F., Dubina, D., da Silva, L.S., D’Aniello, M.: Design of Steel Structures for Buildings in Seismic Areas. 1st Edition. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork (2017), ISBN (Ernst & Sohn): 978-3-433-03010-3.
- [15] CEN European Committee for Standardization: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1:2005), Brussels, Belgium.
- [16] CEN European Committee for Standardization: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1:2020, pre-normative), Brussels, Belgium.
- [17] DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik): National Technical Approval, No. Z-26.4-59, CoSFB-Betondübel, Applicant: ArcelorMittal Belval & Differdange S.A., Berlin (2014).
- [18] CEN European Committee for Standardization: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1:2004), Brussels, Belgium.
- [19] CSI Berkley: SAP2000 v21. Copyright Computers and Structures (2019).
- [20] Fajfar, P.: A nonlinear analysis method for performance-based seismic design. *Earthquake Spectra*, 16(3), pp. 573-92 (2000).
- [21] Akkar, S., Sandikkaya, M.A., Senyurt, M., Azari Sisi, A., Ay, B., Traversa, P., Douglas, J., Cotton, F., Luzi, L., Hernandez, B., Godey, S.: Ref. database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(1), pp. 311-339 (2014).
- [22] D’Aniello, M., L.M. Ambrosino, G., Portioli, F., Landolfo, R.: Modelling aspects of the seismic response of steel concentric braced frames. *Journal of Steel and Composite Structures*, 15(5), pp. 539-566 (2013).
- [23] D’Aniello, M., L.M. Ambrosino, G., Portioli, F., Landolfo, R.: The influence of out-of-straightness imperfection in physical theory models of bracing members on seismic performance assessment of concentric braced frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Wiley, 24(3), pp. 176-197 (2015).
- [24] Dicleli, M., Calik, E.: Physical theory hysteretic model for steel braces. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 134(7), pp. 1215-1228 (2008).
- [25] Gabor, G., Vulcu, C., Stratan, A., Dubina, D., Voica, F., Marcu, D., Alexandrescu, D.: Experimental and numerical validation of the technical solution of a brace with pinned connections for seismic-resistant multi-story structures. 15th World Conf. on Earthquake Eng., Lisbon, Portugal, paper 4431 (24-28.09.2012).