

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Mecanică

Drd. Ing. Florin DUMBRAVĂ

**Cercetări privind modelarea, simularea și testarea
elementelor din construcția structurilor metalice cu
pereți subțiri**

**Research on the modeling, simulation and testing of
elements in the construction of thin-walled metallic
structures**

REZUMAT

Conducător științific

Prof.dr. Ing. Camelia CERBU

BRAȘOV, 2024

PREFAȚĂ

Îi mulțumesc profund doamnei profesoare Camelia Cerbu pentru sprijinul său neprețuit. Fără ajutorul și răbdarea dumneaei, finalizarea studiilor doctorale nu ar fi fost posibilă. Îi sunt recunoscător pentru conducerea științifică, sugestiile constructive și asistența oferită în realizarea acestei lucrări, precum și pentru colaborarea în publicarea articolelor. Sper ca și dânsa să fie mândră de realizările noastre comune.

Aș dori să îmi exprim recunoștința față de comitetul de îndrumare (DI.Prof.Dr.Ing. Sorin Vlase, DI.Prof.Dr.Ing. Vasile Ciofoaia, DI.Prof.Dr.Ing. Ioan Călin Roșca și DI.Conf.Dr.Ing. Florin Baci) pentru îndrumarea și sfaturile valoroase pe parcursul întregului proces de elaborare a tezei mele de doctorat. În mod special, doresc să îi mulțumesc dlui decan Ioan Călin Roșca pentru susținerea acordată.

Doresc să aduc un omagiu profesorilor mei, în special domnului profesor Ioan Curțu, pe care îl admir profund. Dânsul mi-a insuflat pasiunea pentru rezistența materialelor și pentru calculul structural, fiind un mentor esențial în parcursul meu profesional. Îi sunt recunoscător pentru inspirația și entuziasmul pe care mi le-a transmis.

Îi exprim profunda recunoștință domnului Brian Howson, cu care am privilegiul de a colabora de peste 10 ani la Dexion Storage Solutions. Dânsul, un adevărat susținător al României și un profesionist desăvârșit, a avut un impact semnificativ asupra dezvoltării mele profesionale și personale. Îi sunt profund recunoscător pentru încrederea acordată și pentru sprijinul oferit în îmbunătățirea abilităților mele ca inginer. Sper ca, la rândul meu, să pot oferi altora aceeași încredere și sprijin pe care le-am primit de la dânsul.

De asemenea, aș dori să îmi exprim aprecierea față de colegii mei, în mod special față de domnul Marian Ioniță, a cărui inteligență extraordinară mi-a oferit zilnic oportunități de învățare.

Aș dori să îmi exprim recunoștința față de familia mea, în special față de mama mea, Ioana Dumbrava, care mi-a oferit un sprijin constant pe parcursul tuturor etapelor vieții și a fost un adevărat pilon de susținere. Sunt conștient că multe persoane au contribuit la parcursul meu și, deși nu pot să îi menționez pe toți, îi asigur că sunt profund recunoscător tuturor celor care au avut un rol în formarea mea.

Îmi doresc să le mulțumesc tuturor celor care m-au susținut, fiind alături de mine în momentele cele mai dificile.

Fiicei mele Ingrid îi transmit toată dragostea mea și îmi cer scuze pentru timpul pe care nu l-am petrecut alături de ea din cauza angajamentului meu față de studii. Sper că, atunci când va crește, să fie mândră de mine și de efortul pe care l-am depus.

CUPRINS

PREFAȚĂ.....	1
1. INTRODUCERE.....	4
1.1 Actualitatea și importanța temei de cercetare	4
1.2 Conținutul tezei de doctorat	5
2. CERINȚE ȘI SOLUȚII ACTUALE PRIVIND CONSTRUCȚIA STRUCTURILOR METALICE DE TIP RAFTURI PENTRU DEPOZITARE	6
2.1 Clasificarea sistemelor de depozitare.....	6
2.2 Elemente constructive ale structurilor metalice de tip rafturi	10
2.3 Tipuri de îmbinări folosite la structurile metalice de tip rafturi	12
2.4 Tipuri de stâlpi folosiți la structurile metalice de tip rafturi	12
2.5 Aspectele privind tehnologia de fabricație a elementelor din structurile de depozitare.....	13
2.6 Concluzii și problematică	13
3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND MODELAREA ȘI TESTAREA ELEMENTELOR COMPONENTE DIN STRUCTURILE METALICE PENTRU DEPOZITARE	14
3.1 Normative și coduri de proiectare folosite pentru calculul structurilor metalice de depozitare	14
3.2 Aspecte teoretice și experimentale referitoare la îmbinările grindă-stâlp folosite în industria structurilor metalice de tip rafturi	15
3.3. Cercetări actuale referitoare la îmbinările grindă-stâlp folosite în industria structurilor metalice de tip rafturi	17
3.4. Aspecte teoretice referitoare la compresiunea barelor	18
3.5. Cercetările actuale referitoare la coloanele cu secțiuni de forma Omega, solicitate la compresiune	19
3.6 Concluzii	19
4. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT.....	20
5. CERCETĂRI PRIVIND EFECTELE PARAMETRILOR CONSTRUCTIVI ASUPRA RIGIDITĂȚII CONEXIUNILOR DINTRE GRINZILE ȘI STÂLPII SISTEMELOR DE DEPOZITARE	22
5.1 Introducere.....	22
5.2 Îmbinările testate.....	22
5.3. Metodele de testare utilizate pentru determinarea rigidității la rotire a conexiunii grindă-stâlp	25
5.3.1. Teste de tracțiune pentru oțel	25
5.3.2. Teste de încovoiere pentru ansambelele stâlp-conector-grindă	26
5.4 Rezultatele experimentale și discuții	27
5.4.1. Rezultate obținute la testele de tracțiune pentru oțel	27
5.4.2. Rezultate obținute la testele de încovoiere	28
5.5 Modurile de cedare a conexiunilor grindă-stâlp în încercările de încovoiere	32
5.6 Efectele rigidității la rotire a conexiunilor de capăt dintre grindă și stâlp, asupra comportării mecanice a grinzilor	34

5.7 Concluzii	36
6. CERCETĂRI PRIVIND EFECTELE JOCURILOR DIN CONEXIUNILE DINTRE GRINDĂ ȘI STÂLP, ASUPRA EFORTURILOR SECȚIONALE ȘI ASUPRA DEPLASĂRILOR GRINZII.....	37
6.1. Aspecte privind jocurile din conexiunile dintre grindă și stâlp utilizate în structurile metalice de depozitare cu rafturi pentru paleți.....	37
6.2. Materialele testate și metoda de lucru	38
6.2.1. Tipuri de ansamble testate	38
6.2.2. Metoda de lucru pentru testele de încovoiere realizate pentru determinarea efectelor jocurilor existente în conexiunea dintre grindă și stâlp	40
6.3. Rezultatele experimentale.....	41
6.4. Efectele jocurilor din conexiunea grindă-stâlp.....	44
6.5. Concluzii	45
7. CERCETĂRI PRIVIND COMPRESIUNEA STÂLPILOR DIN STRUCTURILE METALICE PENTRU DEPOZITARE	47
7.1. Cercetări experimentale privind flambajul local al stâlpilor din structurile pentru depozitare	47
7.1.1. Geometria stâlpilor testați	47
7.1.2. Metoda de încercare pentru determinarea forței critice de pierdere a stabilității stâlpilor	50
7.1.3. Rezultatele încercării la compresiune a stâlpilor	51
7.2. Simularea numerică a stărilor de tensiune și deformații din stâlpii sistemelor de depozitare, solicitați la compresiune	52
7.3. Validarea modelului numeric	54
7.4. Concluzii	59
8. CONCLUZIILE GENERALE. CONTRIBUȚIILE PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE....	60
8.1. Concluziile generale.....	60
8.2. Contribuții personale	63
8.3. Direcții viitoare de cercetare.....	64
BIBLIOGRAFIE	66

1. INTRODUCERE

1.1 Actualitatea și importanța temei de cercetare

Sistemele de depozitare cu rafturi pentru paleți reprezintă o componentă esențială în logistica modernă, facilitând stocarea eficientă și accesibilă a bunurilor în diverse industrii. O dată cu dezvoltarea rapidă a comerțului electronic și a logisticii, cererea pentru spații de depozitare eficiente și bine organizate, a crescut considerabil. Structurile metalice pentru depozitare, cum ar fi cele cu rafturi pentru paleți, joacă un rol crucial în optimizarea spațiilor de depozitare și în facilitarea accesului rapid la bunuri.

Siguranța structurilor metalice este esențială pentru prevenirea accidentelor și a deteriorărilor bunurilor depozitate. Cercetarea îmbunătățirii îmbinărilor și a componentelor structurale contribuie la dezvoltarea unor sisteme de depozitare mai sigure și mai fiabile. Literatura de specialitate recunoaște importanța analizei comportării structurale a acestor conexiuni. Studiile anterioare au demonstrat că rigiditatea la rotire și capacitatea portantă în solicitarea de încovoiere a îmbinărilor, au un impact semnificativ asupra deplasărilor și asupra tensiunilor din sistemele de rafturi. Cu toate acestea, există încă aspecte contradictorii și insuficient explorate, în special în ceea ce privește influența grosimii stâlpilor și a tipului de conector asupra acestor caracteristici ale conexiunilor dintre grinzi și stâlpi. Progresele înregistrate în ceea ce privește tehnologia de fabricație, precum și utilizarea materialelor avansate, cum ar fi oțelurile de înaltă rezistență, necesită o actualizare constantă a metodelor de proiectare și a celor de testare a structurilor. Cercetarea continuă asigură integrarea acestor inovații în soluțiile de depozitare.

Respectarea normelor și reglementărilor actuale impune adoptarea unor practici de proiectare și testare bazate pe cele mai recente cunoștințe și standarde. Cercetarea contribuie la dezvoltarea și actualizarea acestor norme, asigurând conformitatea structurilor metalice cu cerințele legale și de siguranță. Eficientizarea costurilor de producție și instalare a structurilor metalice este un aspect important pentru companiile de logistică și depozitare. Studiile de cercetare pot identifica soluții mai economice și eficiente din punct de vedere al costurilor, fără a compromite calitatea și siguranța. Dezvoltarea soluțiilor de depozitare sustenabile, care utilizează resursele într-un mod eficient și reduc impactul asupra mediului, este un alt motiv pentru care tema de cercetare este importantă. Utilizarea materialelor reciclabile și reducerea amprente de carbon sunt obiective esențiale în proiectarea modernă a structurilor metalice.

Necesitatea unor cercetări suplimentare este subliniată și de utilizarea pe scară largă a sistemelor de depozitare cu paleți, care impune o înțelegere profundă a efectelor jocurilor dintre pinii metalici ai conectorului și perforațiile stâlpului, asupra performanței grinzilor portante. Deși anumite studii au abordat acest subiect, rezultatele obținute nu sunt întotdeauna concludente indicând necesitatea unei investigații suplimentare. În acest context, această lucrare își propune să umple golurile din literatura de specialitate, printr-o analiză obiectivă și detaliată în ceea ce privește comportarea mecanică a conexiunilor semirigide, utilizate în sistemele de depozitare. Studiul se va concentra pe investigații privind efectele grosimii stâlpilor și a tipului de conector cu pini metalici, asupra rigidității la rotire și asupra momentului capabil de încovoiere, care sunt caracteristici conexiunilor testate. De asemenea, se va explora impactul imperfecțiunilor geometrice asupra stabilității și forțelor critice de flambaj ale

coloanelor fabricate din profiluri cu secțiune în formă de litera Omega, supuse solicitării de compresiune.

Prin această abordare, lucrarea își propune să ofere o perspectivă cuprinzătoare și critică asupra problematicii analizate, contribuind la dezvoltarea unor modele mai precise și eficiente pentru proiectarea și simularea comportării mecanice a elementelor componente din sistemele de depozitare. Se utilizează metode avansate pentru simulare numerică, precum și teste experimentale, pentru a valida și calibra modelele propuse, asigurând astfel relevanța și aplicabilitatea rezultatelor obținute.

1.2 Conținutul tezei de doctorat

În primele trei capitole ale acestei lucrări se prezintă justificarea alegerii temei de studiu și contextul care a condus la necesitatea realizării cercetărilor prezentate în teza de doctorat. Se prezintă o clasificare sintetizată a sistemelor de depozitare, inclusiv componentele structurale ale structurilor cu rafturi pentru paleți, tipurile de îmbinări și stâlpii utilizați, tehnologiile de fabricație, precum și concluziile și problemele identificate în această industrie. Se evidențiază importanța conexiunilor dintre grinzi și stâlpi în asigurarea stabilității și siguranței structurilor de depozitare. De asemenea, se prezintă stadiul actual al cercetărilor din literatura de specialitate, analizând normativele și codurile de proiectare utilizate în cazul unor astfel de structuri, aspectele teoretice și cercetările actuale referitoare la îmbinările utilizate între grinzi și stâlpi, compresiunea coloanelor cu pereți subțiri, având secțiunea de forma literei omega, subliniind aspectele care necesită studii suplimentare. Se efectuează o revizuire a literaturii de specialitate și se identifică lipsurile existente în cercetările efectuate pentru astfel de structuri, care justifică motivația alegerii temei de cercetare pentru teza de doctorat.

Capitolul 4 prezintă pe larg obiectivele principale ale tezei, precum și obiectivele specifice, care derivă din acestea.

Capitolul 5 și capitolul 6 se concentrează asupra cercetărilor privind rigiditatea la rotire a îmbinărilor cu conectori metalici, cu pini. Se studiază experimental efectele parametrilor constructivi ai conexiunii dintre grindă și stâlpi, asupra rigidității la rotire a acestor conexiuni, analizând diferitele moduri de cedare, precum și efectele rigidității la rotire asupra comportării mecanice a grinzilor. Se studiază de asemenea efectul jocurilor din îmbinările cu conectori cu pini, asupra eforturilor secționale și asupra deplasărilor grinzilor pe baza rezultatelor experimentale și a celor obținute cu modele de calcul. Se analizează efectele rotirii conectorului până la anularea jocurilor, precum și efectele rigidității la rotire a conectorului, asupra performanței structurale a sistemelor de depozitare.

Capitolul 7 prezintă cercetările experimentale și simulările numerice privind pierderea stabilității locale a stâlpilor de lungime mică, fabricați din profiluri cu perete subțire. Se prezintă caracteristicile geometrice principale ale stâlpilor, metodele de testare, rezultatele obținute și concluziile testelor efectuate. Se determină experimental forțele critice de flambaj și aria efectivă pentru coloanele realizate din profiluri cu perete subțire, având secțiunea în forma literei Omega.

Capitolul 8 este destinat concluziilor generale ale tezei de doctorat, contribuțiilor personale ale autorului, precum și direcțiilor de cercetare, care ar putea fi abordate în viitor, pentru îmbunătățirea și dezvoltarea structurilor metalice pentru depozitare. Se subliniază importanța continuării cercetărilor pentru a răspunde provocărilor viitoare și a îmbunătăți performanța sistemelor de depozitare.

2. CERINȚE ȘI SOLUȚII ACTUALE PRIVIND CONSTRUCȚIA STRUCTURILOR METALICE DE TIP RAFTURI PENTRU DEPOZITARE

2.1 Clasificarea sistemelor de depozitare

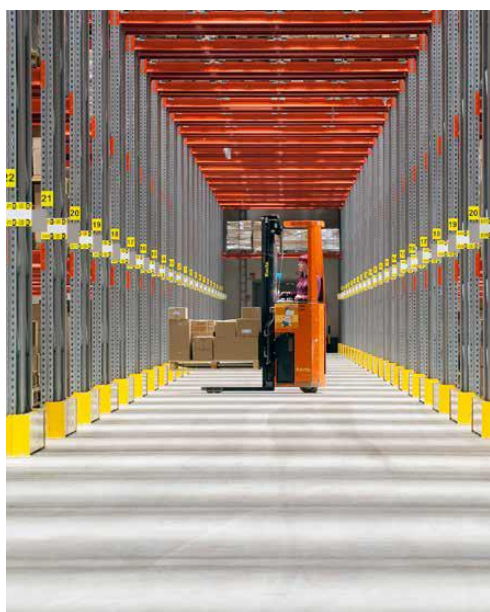
Sistemele de depozitare sunt în general, structuri metalice destinate depozitării mărfurilor în depozite sau spații comerciale. Acestea se clasifică, de obicei, în două mari categorii:

- sisteme de rafturi pentru depozitarea paleților;
- sisteme de rafturi de depozitare cu polițe.

Principala diferență între cele două tipuri de sisteme constă în faptul că, în primul caz, se folosesc paleți pentru depozitarea mărfurilor, în timp ce în al doilea al doilea caz, sistemele sunt destinate în general, depozitării obiectelor de mici dimensiuni, care pot fi manevrate manual.

Sistemele de depozitare cu rafturi pentru paleți se clasifică și ele mai departe în diverse tipuri, care pot oferi o eficiență mai ridicată a spațiului de depozitare sau pot fi mai economice. Principalele tipuri sunt următoarele: sistemele de rafturi convenționale; sistemele de rafturi pentru paleți, de tipul „drive-in”; sistemele de rafturi, cu cărucior automat pentru paleți; sistemele de rafturi cu role pentru paleți, sistemele de rafturi mobile pentru paleți și sisteme de rafturi pentru paleți în care manevrarea paleților se face cu macarale. În continuare, fiecare tip se prezintă pe rând, cu exemple.

În figura 2.1 se prezintă sistemele de rafturi convenționale pentru paleți.



(a)



(b)

Figura 2.1. Sistem de rafturi convenționale (***, 2019).

Aceste tipuri de sisteme asigură accesul nerestricționat la toți paleții în orice moment. Accesul către paleți se face cu ajutorul stivuitorului. Structura de rezistență pentru acest tip de structură este alcătuită din elemente orizontale numite grinzi, care sunt prevăzute la capetele lor cu conectori metalici, cu ajutorul cărora se realizează legătura cu elementele verticale (cadre), care sunt la rândul lor alcătuite din coloane și zăbrele. La partea inferioară a coloanelor, sunt prevăzute așa numitele plăci de bază, care fac legătura cu pardoseala (fig. 2.2).

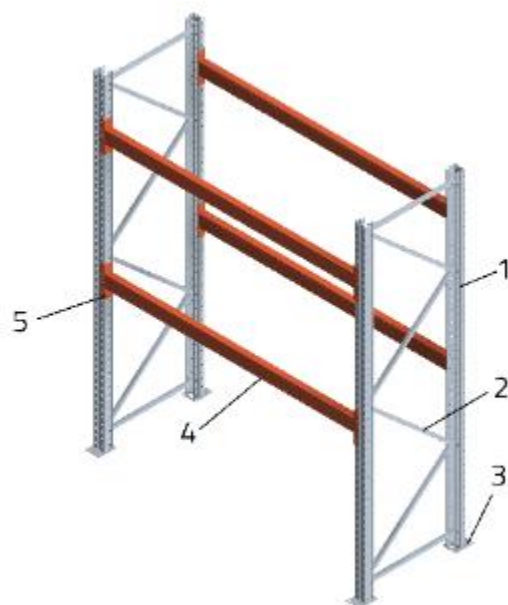


Figura 2.2 Elemente constitutive ale unui cadru: (1) – stâlp; (2) – elemente diagonale (zăbrele); (3) – placa de bază; (4) – grinda; 5 – connector.

În figura 2.3 se prezintă câteva sisteme de rafturi pentru depozitarea paleților de tipul „Drive-In”.



(a)



(b)

Figura 2.3. Sistem de rafturi tip „Drive-In” (**a, 2019).

Aceste tipuri de sisteme sunt construite astfel încât stivuiorul să aibă acces în interiorul raftului, pe rândurile create de cadrele prezentate mai sus, dar în acest caz, paleții nu se mai poziționează pe grinzi, ci pe șinele ce sunt conectate de cadre.

În figura 2.4 se prezintă un exemplu de sistem de rafturi pentru depozitarea paleților cu cărucior automat (naveta cu radio-comandă). În limba engleză acest sistem de depozitare se numește "pallet shuttle". Aceasta este o soluție de depozitare semi-automată pentru paleți. Manipularea paleților în interiorul raftului se face cu ajutorul cărucioarelor automate.



*Figura 2.4. Sistem de rafturi cu cărucior automat (**a, 2019).*

În figura 2.5 se prezintă un exemplu de sistem de rafturi cu role pentru paleți FIFO (First In First Out).



*Figura 2.5. Sistem de rafturi cu role pentru paleți (**a, 2019).*

În cadrul acestui sistem, paleții se deplasează pe role. Paleții din față sunt preluați din partea frontală a raftului, în timp ce la partea din spate, se face depozitarea altui palet. Mișcarea paleților în interiorul raftului, se realizează în datorită frânării automate. Folosirea acestui sistem eficientizează considerabil suprafața depozitului, în comparație cu rafturile convenționale.

În figura 2.6 se prezintă un exemplu de sistem de rafturi mobile pentru depozitarea paleților.



*Figura 2.6.. Sistem de rafturi mobile (**a, 2019).*

Sistemul de rafturi mobile este un sistem dinamic compus din două părți principale: baza mobilă a raftului și raftul propriu-zis, care în general este același tip de raft folosit la varianta convențională. Baza mobilă se deplasează pe niște șine încastate în pardoseală, iar comanda se face electronic. Acest sistem reprezintă una dintre cele mai eficiente soluții din punctul de vedere al economiei de spațiu. În figura 2.7 se prezintă rafturile pentru paleți în care manevrarea paleților se face cu macarale.



*Figura 2.7. Sistem de rafturi cu macarale (**a, 2019).*

Acest tip de rafturi fac parte din categoria sistemelor dinamice semi-automate sau complet automate. În general, sunt utilizate în sisteme de depozitare având înălțimea de până la 25 m. Macaralele sunt integrate în sistemul de gestionare al depozitului și pot muta până la 200 de paleți pe oră.

2.2 Elemente constructive ale structurilor metalice de tip rafturi

Structura de rezistență pentru aceste tipuri de structuri metalice este realizată în general, din tablă laminată la rece. Elementele principale ale acestor tipuri de structuri sunt:

- grinzile;
- stâlpii;
- contravântuirile.

Grinzile sunt compuse din doua profiluri de tipul „C” asamblate împreună (fig. 2.8a), care sunt prevăzute la capete cu conectori metalici, cu pini (fig. 2.8b și fig. 2.8c). Conectorii pot fi îmbinați cu grinzile fie prin sudură, fie prin alt mod, de exemplu, cu bolțuri sau cu alte dispozitive (cârlige sau pini), care fac posibilă conectarea cu stâlpii verticali prin intermediul perforațiilor de pe partea frontală a acestora.

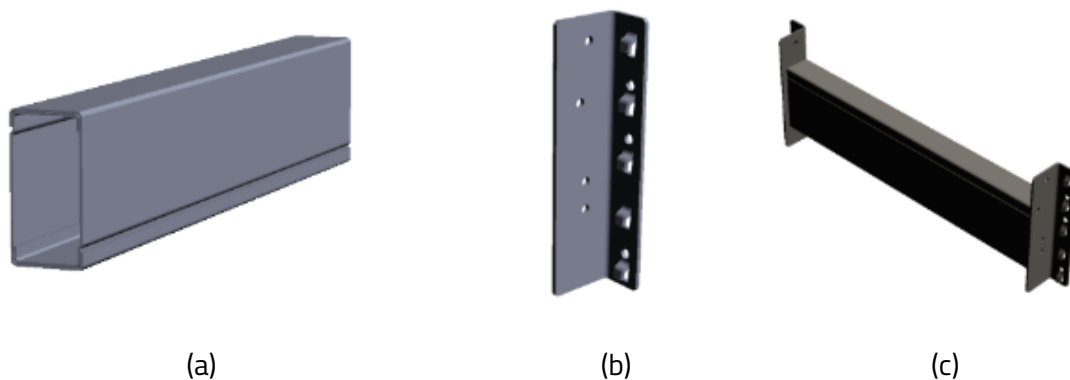


Figura 2.8. Compușurile grinzilor: (a) secțiunea transversală a grinzii formate prin îmbinarea a două profiluri C; (b) conector; (c) ansamblu format din grindă și doi conectori.

Stâlpii sunt elementele verticale ale structurii și au în general, secțiunea în forma literei Ω (omega). Aceștia sunt prevăzuți cu perforații pe partea frontală și cu găuri pe părțile laterale (flanșe). Perforațiile permit îmbinarea cu conectorii fixați la capetele grinzilor, iar găurile laterale facilitează prinderea contravântuirilor cu ajutorul șuruburilor.

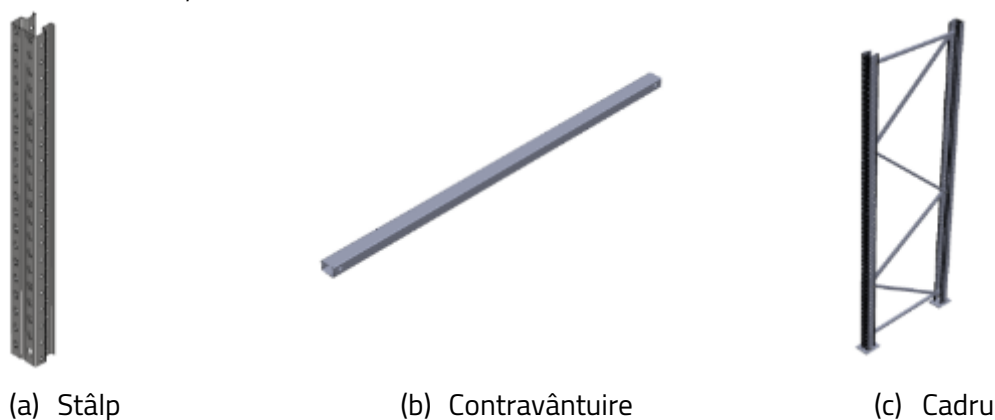


Figura 2.9. Compușurile cadrelor: (a) stâlp; (b) element de contravântuire; (c) cadru format din doi stâlpi și contravântuiri.

Pe lângă rolul de a prelua greutatea verticală, grinzile asigură stabilitatea în direcția culoarului (Dumbrava și Cerbu, 2020b) dintre sistemele de depozitare, denumit „Down Aisle – D.A.” în literatura de specialitate în limba engleză. În acest context, proiectarea conexiunii dintre grindă și stâlp (fig. 2.10a) este de o importanță majoră.

Stabilitatea în direcția culoarului mai este influențată și de conexiunile existente între placa de bază și stâlp (fig. 2.10b).

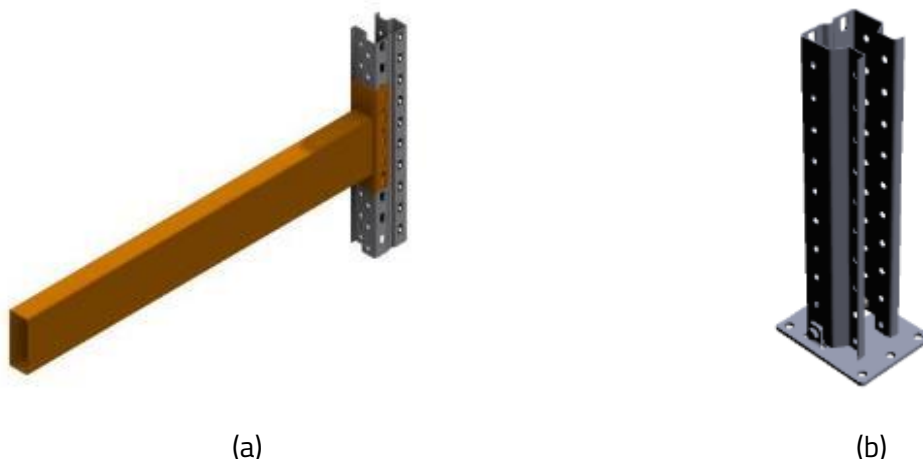


Figura 2.10. Conexiunile din sistemele de depozitare: (a) conexiunea dintre grindă și stâlp; (b) conexiunea dintre stâlp și placa de bază.

Stabilitatea structurii în direcția perpendiculară pe direcția culoarului, denumită în literatura de specialitate „Cross Aisle”, este dată de cadrul format din stâlpi și contravântuiri. Există mai multe tipuri de cadre, în funcție de dispunerea contravântuirilor, așa cum se prezintă în figura 2.11.

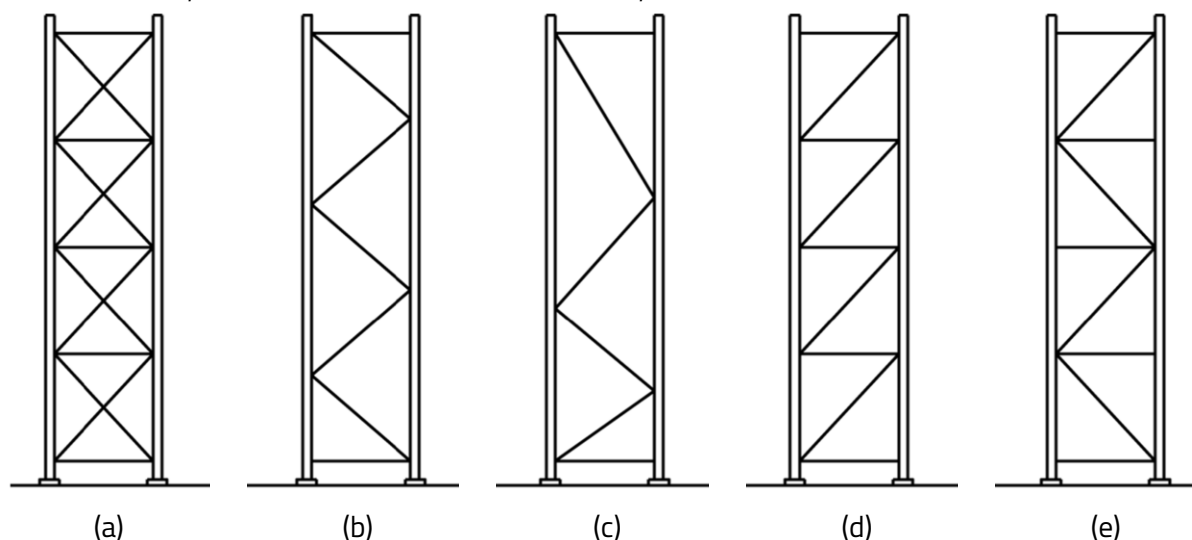


Figura 2.11. Tipuri de forme pentru cadre contravântuite: (a) cadru cu contravântuiri tensionate; (b) cadru cu contravântuiri în forma de „D” regulat; (c) cadru cu contravântuiri în forma de „D” iregulat; (d) cadru cu contravântuiri în forma de „Z”; (e) cadru cu contravântuiri în forma de „K”.

2.3 Tipuri de îmbinări folosite la structurile metalice de tip rafturi

În continuare, se va prezenta o clasificare a principalelor tipuri de îmbinări, precum și o clasificare a diferitelor forme de stâlpi folosiți la realizarea structurilor de depozitare cu rafturi pentru paleți.

- Îmbinări cu conectori metalici cu pini
- Îmbinări cu conectori metalici cu pini și șuruburi
- Îmbinări folosite la grinzile în consolă
- Îmbinări cu placă de capăt și șuruburi

2.4 Tipuri de stâlpi folosiți la structurile metalice de tip rafturi

Forma cea mai obișnuită de secțiune folosită pentru stâlpi în aceste tipuri de structuri, este cea în formă de literă omega (Ω). Există o varietate considerabilă de stâlpi având un astfel de tip de secțiune, fiecare având caracteristici distincte. Principalele diferențe între aceștia includ:

- configurația perforațiilor de pe partea frontală coloanelor, care facilitează îmbinarea grinzilor cu stâlpii prin conectori cu pini; de obicei, fiecare furnizor pentru astfel de soluții constructive, utilizează o formă specifică de perforații, care devine o marcă specifică pentru fiecare producător;
- forma secțiunii transversale a coloanelor;
- tipul de oțel utilizat.

Există diverse forme geometrice de perforații, care sunt de obicei situate pe partea frontală a stâlpilor. Forma geometrică și poziția perforațiilor sunt câteva dintre particularitățile definitorii ale coloanelor. O formă diferită a acestora va necesita de asemenea, pini metalici speciali pentru a asigura îmbinarea corectă cu grinzile. Geometria și dimensiunile perforațiilor influențează stabilitatea stâlpilor, în special aria eficace a acestora.

- Tipuri de forme geometrice pentru perforațiile stâlpilor

În figura 2.17 se prezintă câteva forme de perforații întâlnite la unii dintre principalii furnizori de astfel de sisteme din Europa și din alte regiuni.

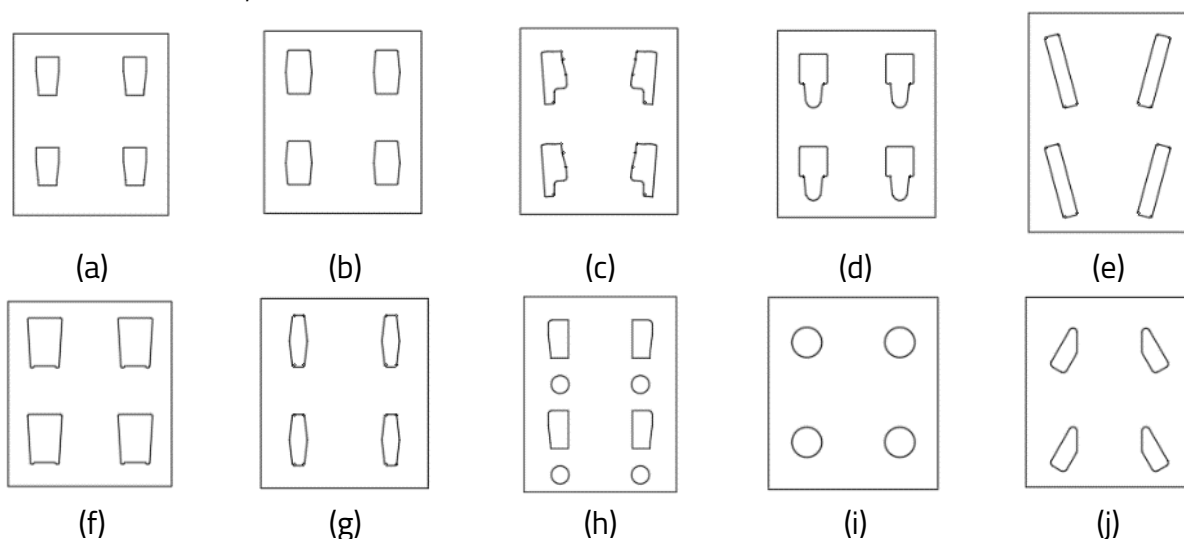


Figura 2.17. Forme de sloturi prezente pe partea frontală a stâlpilor

- Geometrii diferite ale profilurilor de stâlpi

Una dintre cele mai importante caracteristici pentru determinarea rezistenței acestor tipuri de coloane o reprezintă forma lor geometrică a secțiunii acestora (fig. 2.18).

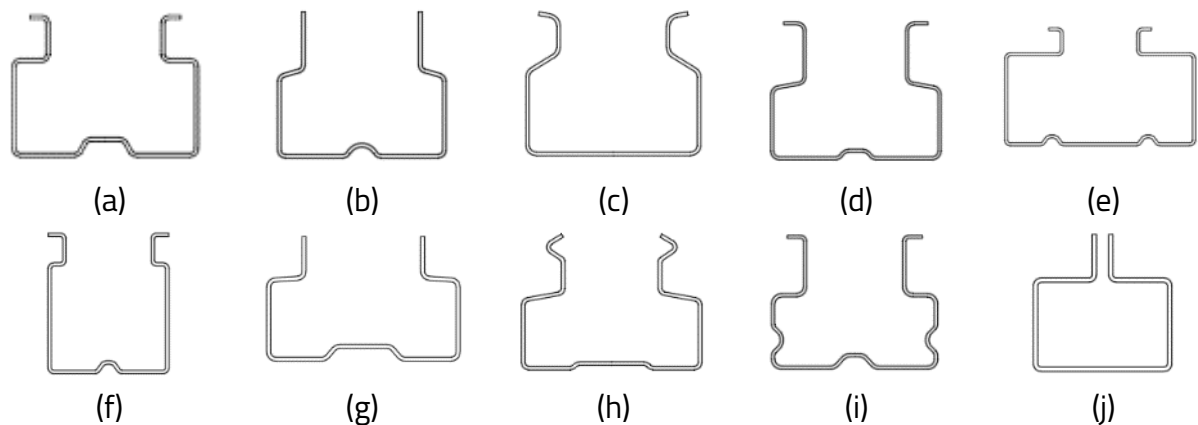


Figura 2.18. Tipuri de secțiuni transversale ale stâlpilor omega

2.5 Aspectele privind tehnologia de fabricație a elementelor din structurile de depozitare

Procesul de fabricație folosit pentru obținerea grinzilor utilizate în realizarea structurilor de depozitare este cunoscut sub denumirea de laminare la rece sau formare la rece. Tehnologia de fabricație pentru elementele formate la rece poate fi realizată prin unul dintre următoarele două procedee:

- laminare la rece;
- îndoire la rece.

2.6 Concluzii și problematică

Profilurile metalice formate la rece sunt utilizate pe scară largă în sistemele de depozitare, oferind o varietate de forme necesare în această industrie. În România, Dexion Storage Solutions este lider în producția acestor structuri, consumând aproximativ 18.000 de tone de oțel în anul 2023. Studiul se axează pe cercetările teoretice și experimentale privind coloanele și conexiunile dintre grinzi și coloane, ambele fiind obținute prin laminare la rece. Stâlpii au pereți de până la 5 mm grosime, iar grinzile de până la 3 mm.

Comparativ cu secțiunile obținute prin laminare la cald sau sudate, profilurile cu pereți subțiri și contur deschis, folosite pentru grinzi și stâlpi, prezintă probleme structurale complexe. Oțelurile utilizate au limite de curgere ridicate, variind de la 320 MPa la peste 500 MPa. Reducerea grosimii oțelului, combinată cu utilizarea oțelurilor de înaltă rezistență, poate duce la pierderea stabilității structurilor prin deplanarea pereților și flambajul global, afectând ductilitatea materialului.

Aceste concluzii subliniază importanța luării în considerare atât a proprietăților materialului, cât și a designului structural atunci când se utilizează profile formate la rece în sistemele de depozitare, pentru a asigura stabilitatea și performanța acestora.

3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND MODELAREA ȘI TESTAREA ELEMENTELOR COMPONENTE DIN STRUCTURILE METALICE PENTRU DEPOZITARE

3.1 Normative și coduri de proiectare folosite pentru calculul structurilor metalice de depozitare

Pentru a realiza o prezentare generală a celor mai importante ghiduri de proiectare structurală pentru structurile de depozitare, este esențial să înțelegem particularitățile acestor tipuri de structuri în funcție de câteva criterii care se prezintă în continuare.

Materiale și secțiuni: Structurile metalice folosite pentru depozitarea paleților sunt realizate în general din oțel laminat la rece, rezultând secțiuni cu perete subțire, cu contur deschis, care prezintă perforații pe toată lungimea lor, influențând caracteristicile geometrice ale secțiunilor.

Simetrie și flambaj: Forma profilurilor este simetrică doar în raport cu o axă, ceea ce le face predispuse la flambajul prin răsucire (răsucirea în jurul centrului de forfecare al secțiunii).

Stabilitate și limite de Rezistență: Pierderea stabilității se poate produce înainte ca elementul să ajungă la limita de rezistență.

Conexiuni: Se folosesc conexiuni speciale între elementele structurii, cu comportare semirigidă.

Excentricități: Apar diverse excentricități între elemente, care sunt în general neglijate de normele europene ce se referă la structurile tradiționale din oțel.

Metode de Calcul: Se folosesc metode de calcul bazate pe teste experimentale, datorită particularităților secțiunilor ce diferă substanțial de la un producător la altul.

Toate aceste aspecte au condus la elaborarea unor ghiduri de proiectare specifice pentru calculul structural al elementelor componente ale structurilor de depozitare.

În Europa, începând cu anul 2020, se utilizează standardul EN 15512 (2020). Acest standard prezintă principii pentru calculul structural al structurilor de depozitare. Necesitatea acestui standard a apărut din dorința de a unifica principiile de calcul utilizate de principalii producători de rafturi din Europa. La baza acestui standard se află codul de proiectare FEM 10.2.02, dezvoltat de FEM – European Materials Handling Federation, care a condus ulterior la standardul european (EN 15512, 2009), revizuit în 2020 (EN 15512, 2020).

S-a încercat, pe cât posibil, ca principiile prezentate în standardul menționat mai sus (EN 15512) să fie corelate și cu normele europene relevante pentru calculul structurilor din tablă cu pereți subțiri.

Prin urmare, aceste standarde oferă un cadru unificat și detaliat pentru proiectarea și calculul structurilor de depozitare, luând în considerare specificitățile și complexitățile acestor tipuri de structuri.

În domeniul structurilor de depozitare metalice, care se deosebesc semnificativ de construcțiile tradiționale din oțel, se aplică normative și coduri de proiectare specifice. Aceste standarde iau în considerare particularitățile structurale și de performanță ale acestor sisteme, asigurând siguranța și eficiența lor. Teza completă specifică standardele utilizate în proiectarea structurilor metalice de depozitare.

Aceste normative și coduri sunt esențiale pentru proiectarea și utilizarea corectă a structurilor metalice de depozitare, oferind ghiduri clare și standarde de siguranță pentru ingineri și proiectanți.

Aceste standarde și normative oferă un cadru detaliat și coerent pentru proiectarea și evaluarea structurilor de depozitare, asigurând conformitatea și siguranța în utilizarea acestora.

Standardul european EN 15512:2009 a fost revizuit și înlocuit cu EN 15512:2020, proces coordonat de grupul de lucru din cadrul comitetului tehnic 344 (CEN TC344). Asociația Română de Standardizare (ASRO) este și ea reprezentată în acest grup de lucru la nivel european. Noul standard EN 15512 își propune să alinieze cât mai bine principiile de calcul cu celelalte norme europene relevante, care sunt și ele în faza de revizuire.

În Marea Britanie, pe lângă EN 15512, se folosește și codul SEMA – Code of Practice for Design of Adjustable Pallet Racking. Ultima variantă a codului SEMA este disponibilă din 2014 și are la bază standardul britanic BX5950 – Structural Use of Steelwork in Building. Code of Practice for Design. Rolled and Welded Sections. Codul SEMA oferă o serie de simplificări comparativ cu principiile prezentate în standardul european EN 15512 (2020). A apărut prima dată în 2008, iar varianta actuală diferă în mică măsură de versiunea precedentă.

În Australia, se utilizează norma AS 4084 – Steel Storage Racking, care a apărut în 2012. Aceasta se bazează pe standardul european EN 15512, versiunea din 2009. Deși există numeroase similitudini între EN 15512 și AS 4084, au fost făcute și modificări importante pentru a se adapta cerințelor locale. În Statele Unite, se folosește standardul ANSI MH16.1, revizuit ultima dată în 2023. Aceasta este o variantă actualizată a primei versiuni apărute în 2012. Dezvoltarea s-a realizat pe baza procedurilor stabilite de Material Handling Industry's (MHI) și a fost realizată de Rack Manufacturers Institute (RMI).

3.2 Aspecte teoretice și experimentale referitoare la îmbinările grindă-stâlp folosite în industria structurilor metalice de tip rafturi

Toate codurile și standardele de proiectare care stabilesc principiile de calcul pentru aceste tipuri de structuri detaliază metodele de obținere a caracteristicilor mecanice ale elementelor prin intermediul experimentelor. În acest capitol din teza de doctorat, se prezintă metoda de calcul asistată de experimente pentru determinarea rigidității la rotire a îmbinării dintre grindă și coloană, precum și pentru determinarea momentului încovoietor de proiectare al îmbinării, utilizate în realizarea structurilor metalice destinate depozitării paletelor.

Metoda experimentală este descrisă în detaliu în standardul european EN15515 (2020), iar figura 3.1 ilustrează schema de încărcare specifică acestui tip de experiment.

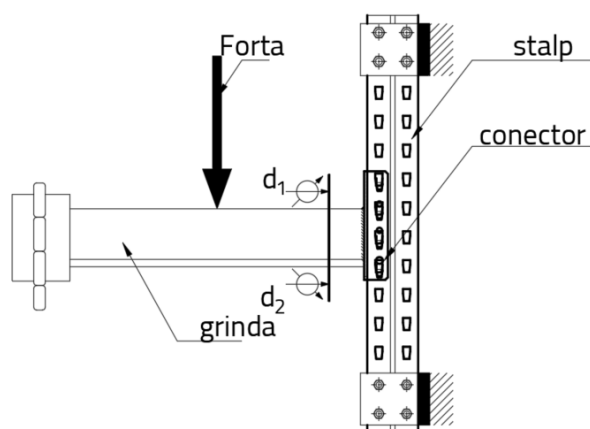


Figura 3.1. Schema de montaj pentru testul de îmbinare grindă-stâlp

De asemenea, standardul European EN15512(2020) precizează și modalitatea de evaluare a rigidității la rotire și a momentului încovoietor de proiectare.

Metoda experimentală implică determinarea curbei rotire-momente încovoietor, prezentată în figura 3.2.

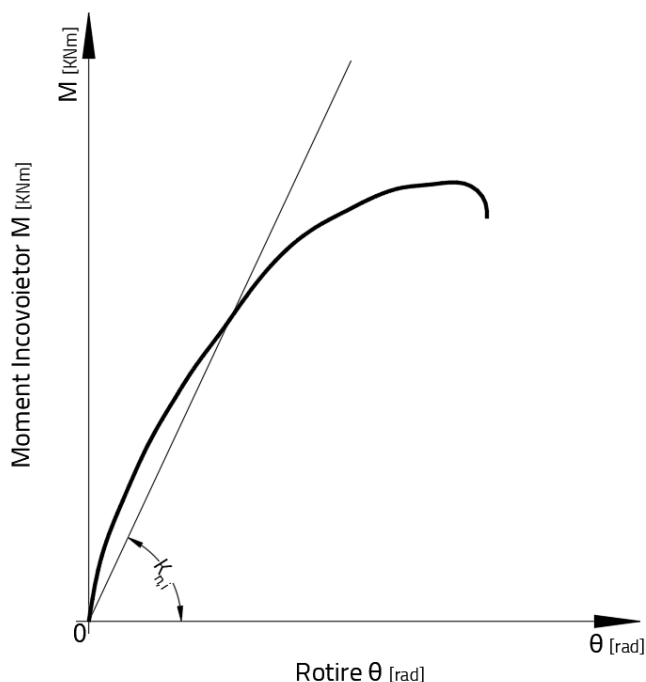


Figura 3.2. Obținerea rigidității la rotire conform cu EN15512

Rezultatele astfel obținute sunt ulterior integrate în analiza globală a structurilor metalice de depozitare tip rafturi.

Pentru calculul analitic, se utilizează relațiile următoare:

$$M_{con} = \frac{qL^3}{24EI_z \left(\frac{1}{k_m} + \frac{L}{2EI_z} \right)}; \quad (3.5)$$

$$M_{mij} = \frac{qL^2}{8} - M_{con}; \quad (3.6)$$

$$v_{max} = \frac{qL^4(10EI_z + Lk_m)}{384EI(2EI_z + Lk_m)}; \quad (3.7)$$

În care M_{con} și M_{mij} reprezintă momentul de încovoiere care se dezvoltă la nivelul ambelor conexiuni semirigide, aflate la capetele grinzii și respectiv, momentul de încovoiere care se dezvoltă în mijlocul grinzii; L este lungimea grinzii; E - modulul de elasticitate longitudinal; I_z este momentul de inerție al secțiunii transversale a grinzii, calculat față de axa neutră; k_m reprezintă rigiditatea la rotire a conexiunii de la capătul grinzii; v_{max} - săgeata maximă la mijlocului grinzii.

Demonstrația pentru ecuațiile (3.5), (3.6) și (3.7) se prezintă detaliat în Anexa 2 al tezei.

3.3. Cercetări actuale referitoare la îmbinările grindă-stâlp folosite în industria structurilor industria structurilor metalice de tip rafturi

În ultimii ani, a existat o creștere semnificativă a consumului, ceea ce a dus la o creștere a producției sistemelor de rafturi de depozitare. Produsele sunt adesea stocate în sisteme de rafturi pentru paleți în supermarketuri sau în depozitele de produse sau materii prime din cadrul fabricilor.

Sistemele de rafturi pentru paleți sunt structuri autoportante care trebuie să susțină greutăți verticale considerabile. Acestea sunt, în general, formate din două tipuri principale de componente: cadre și grinzi. Cadrele sunt realizate din profiluri verticale cu pereți subțiri, care au perforații pe toată lungimea lor, prin care se realizează îmbinările cu grinzile, de obicei folosind conectori metalici cu pini (Shariati et al, 2018); Zhao et al, 2014). Astfel de conectori sunt sudați la ambele capete ale grinzilor. Rigidizările orizontale și diagonale sudate între montanți (stâlpi) asigură stabilitatea cadrului în direcția transversală. Grinzile asigură stabilitatea în direcția longitudinală, iar rigiditatea conexiunilor este o caracteristică importantă a sistemelor de rafturi de depozitare din acest punct de vedere.

Pe lângă conectorii metalici cu pini, există și alte tipuri de conexiuni utilizate în construcții, care includ conectori metalici cu șuruburi sau bolțuri (Dai et al, 2018a), conexiuni lemn-oțel-lemn ale căror părți externe sunt din lemn, iar partea internă este din oțel (Elza și Pedro, 2020), și conectori cu pini combinați cu fixare suplimentară prin bolțuri (Gusella et al, 2018). Ultimul tip de conexiuni este cunoscut în mod obișnuit sub denumirea de conexiuni "speed lock" (Dai et al, 2018b).

În termeni simpli, conexiunile utilizate între grinzi și montanți (stâlpi) sunt fie articulate, fie rigide. În practică, pentru aproape toate conexiunile, chiar și pentru cele considerate rigide, pot exista anumite rotații care influențează eforturile interne, în special momentele de încovoiere. Nu toate conexiunile considerate rigide sunt complet rigide în realitate. Pe de altă parte, conexiunile considerate articulate nu sunt perfect articulate deoarece, în practică, se poate produce frecare care influențează rotația conexiunii. Prin urmare, estimarea rigidității conexiunilor devine o necesitate, în special pentru conexiunile utilizate în structurile pentru rafturi de depozitare.

O dată cu apariția EN 1993-1-3, Eurocod 3 (EC3-3,2006), s-a realizat o clasificare a conexiunilor utilizate între grinzi și montanți (stâlpi), bazată pe rigiditatea acestora. Conexiunile investigate în această cercetare se încadrează în categoria celor considerate semi-rigide. Rigiditatea acestor conexiuni este determinată experimental, conform standardului EN 15512 (EN15512,2009). Este esențial să se înțeleagă că este crucială determinarea rigidității rotaționale a conexiunilor și a momentului de încovoiere capabil, deoarece, în caz contrar, sistemele de rafturi de depozitare nu funcționează în siguranță.

Din punct de vedere teoretic, unii cercetători au propus în lucrări publicate recent (Zhao et al, 2017; Gusella et al, 2018; Gusella et al, 2019) un model mecanic care include cinci componente deformabile de bază (pini metalici în încovoiere, peretele profilului stâlpului supus la forță tăietoare și încovoiere, conectorul cu pini metalici în încovoiere și forfecare) ale conexiunilor grinzi-stâlpi pentru a evalua rigiditatea inițială la rotire a conexiunilor.

În ceea ce privește grinzile utilizate pentru sistemele de rafturi de depozitare, deoarece acestea sunt elemente structurale din oțel formate la rece cu pereți subțiri, pot apărea cedări prin flambaj distorsional în încovoiere, iar efectele forței de forfecare trebuie evaluate cu exactitate în încovoiere, în special în cazul elementelor cu pereți subțiri având secțiuni deschise (Degtyareva și Degtyarev, 2016; Degtyareva, 2017). Un studiu interesant (Degtyarev și Degtyareva, 2016) prezintă rezultatele

referitoare la sarcinile de flambaj elastic și rezistența finală prin utilizarea simulărilor numerice ale tensiunilor și deformațiilor în cazul modelelor cu elemente finite ale profilurilor C din oțel formate la rece, cu sloturi supuse forfecării.

3.4. Aspecte teoretice referitoare la compresiunea barelor

Se prezintă mai întâi stâlpii cu secțiunea în forma literei omega (Ω), deoarece aceștia reprezintă un obiectul de studiu în această lucrare.

Stâlpii cu secțiunea de forma literei omega (Ω) sunt realizați prin laminare din table cu grosimea destul de mică, de regulă până la patru sau chiar cinci milimetri, dar în general se folosesc grosimi mai mici decât, atât chiar și de un milimetru și jumătate.

Din cauza formei secțiunii transversale, centrul de forfecare este distanțat față de centrul de masă, ceea ce face ca profilul să fie sensibil la torsiune (fig. 3.15).

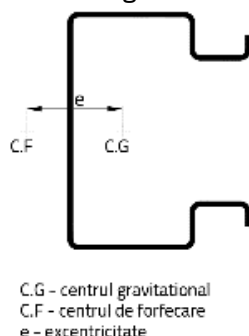


Figura 3.15. Distanța dintre centrul de greutate și centrul de forfecare al unei secțiuni de stâlp omega.

În funcție de zveltețea barei și de forța, respectiv momentul critic, se disting trei tipuri principale de flambaj:

- barele de lungime mică se caracterizează prin flambaj local și/sau distorsional;
- în cazul barelor de lungime medie, poate să apară moduri cuplate (combinate) de flambaj;
- barele lungi se caracterizează prin flambaj global.

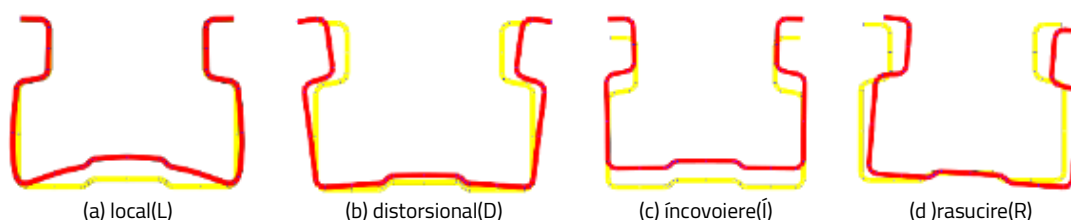


Figura 3.16. Moduri de flambaj pentru un profil de stâlp omega

Flambajul local se produce prin deformarea peretelui din față al profilului (numit inima profilului), iar deformarea se produce fără rotirea secțiunii (fig. 3.16a).

Flambajul distorsional se produce pe partea deschisă a profilului, prin deschiderea (sau închiderea) flanșelor profilului (fig. 3.16b)

În cazul stâlpilor de lungime mare, pierderea stabilității generale se produce prin încovoiere sau prin încovoiere-răsucire (fig. 3.16c și fig. 3.16d).

În cazul unei bare cu pereți subțiri, fenomenul de instabilitate prin voalare locală a pereților survine înainte de începutul plastificării secțiunii, în punctul L (fig. 3.17). Voalarea pereților cauzează o pierdere prematură de rigiditate a barei, fără a duce la cedarea acesteia. Plastificarea debutează în punctul B

(fig. 3.17), la colțurile secțiunii transversale, cu puțin înainte de cedarea elementului, moment în care flambajul secțional se transformă într-un mecanism plastic local, concomitent cu apariția flambajului general (Dubină et al., 2010). În acest scenariu, încărcarea limită a barei este inferioară celei a unei bare pentru care nu se produce voalarea. Practic, flambajul secțional precede flambajul general, iar în practica de proiectare se utilizează caracteristici geometrice reduse ale secțiunii transversale (Dubină, 2000).

3.5. Cercetările actuale referitoare la coloanele cu secțiuni de forma Omega, solicitate la compresiune

În prezent, în industrie sunt utilizate diverse profiluri cu secțiuni transversale, cum ar fi secțiuni cu perete subțire, cu contur închis (cutie, inel) sau deschis (Omega, Sigma, C), și secțiuni simetrice sau asimetrice. Utilizarea globală a sistemelor de depozitare din oțel cu rafturi pentru paleți necesită proiectarea acestora pentru a asigura siguranța structurală și eficiența, fiabilitatea pe termen lung sub diverse condiții de mediu și solicitări dinamice. Cercetările recente s-au concentrat pe stabilitatea locală, distorsională și globală a stâlpilor, evaluarea rigidității conexiunilor dintre grinzi și stâlpi, și stabilitatea laterală la încovoiere a grinzilor.

Stâlpii perforați cu secțiuni de tip Omega sunt utilizate pentru structurile de depozitare din oțel, fiind numite în practică coloane verticale sau stâlpi. Aceștia au perforații frontale pentru conectarea rapidă a grinzilor și găuri laterale pentru conectarea cu șuruburi. Capitolul 7 detaliază analiza pierderii stabilității locale a acestor stâlpi.

3.6 Concluzii

Literatura de specialitate conține puține publicații despre comportamentul conexiunii grindă-stâlp în testele de încovoiere utilizate în sistemele de depozitare cu rafturi pentru paleți, și despre efectele parametrilor geometrici asupra rigidității și momentului capabil. Studiile recente (Zhao et al., 2014; Mohan et al., 2015) arată că lățimea secțiunii grindei și tipul de conector influențează rigiditatea conexiunii și modurile de cedare, cele mai comune fiind ruperea și tasarea profilurilor stâlpilor și fisurarea sau forfecarea pinilor.

În capitolul 5 al acestei lucrări, se examinează efectele formei secțiunilor transversale ale stâlpilor asupra rigidității conexiunilor. În cercetările privind stabilitatea coloanelor scurte, subțiri, formate la rece, sub solicitări axiale, lipsesc studiile comparative asupra efectelor imperfecțiunilor impuse în analiza FEA asupra forței critice de flambaj, conform standardului european EN 1993-1-5. De asemenea, lipsesc rezultatele experimentale privind forța critică de flambaj și aria efectivă a secțiunii profilurilor subțiri, determinate în teste de compresiune, pentru stâlpii perforați, Omega, folosiți în sistemele de depozitare.

Metoda experimentală pentru determinarea ariei eficiente a stâlpilor perforați, conform standardului EN 15512 (2020), este costisitoare și inaccesibilă pentru companiile mici și mijlocii. Metoda de investigare a jocurilor, mai precis rotirea conectorului până la anularea jocurilor, și efectele acestora asupra deformațiilor grinzii și momentelor de încovoiere, sunt prezentate în standardul EN 15512 (2020). Cercetările experimentale asupra unghiului de rotație al conectorului până la anularea jocurilor ar putea îmbunătăți semnificativ literatura de specialitate privind testarea elementelor conexiunilor în construcțiile metalice (Schabowicz, 2021).

4. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat abordează o tematică legată de simularea și testarea elementelor componente din structurile metalice, cu pereți subțiri, de tipul sistemelor de depozitare, cu rafturi pentru paleți. Scopul și obiectivele tezei de doctorat s-au stabilit ținând cont de soluțiile actuale privind construcția structurilor metalice destinate depozitării, de necesitățile practice la care trebuie să răspundă astfel de structuri (prezentate în capitolul 1), precum și de problemele și lipsurile identificate în literatura de specialitate, în urma studiului realizat de autorul tezei de doctorat asupra stadiului actual privind calculul, modelarea și testarea mecanică a elementelor componente din astfel de structuri metalice (prezentate în capitolul 3).

Obiectivul principal al cercetărilor prezentate în teza de doctorat constă în testarea mecanică a elementelor componente (conexiunile dintre grindă și stâlp, stâlpii de susținere) ale structurilor metalice de depozitare, cu rafturi pentru paleți, precum și în realizarea simulării numerice a comportării mecanice a acestor componente, în scopul determinării caracteristicilor mecanice ale acestora, identificării principalilor factori constructivi care influențează rigiditatea și capacitatea portantă a acestora, precum și realizarea modelelor numerice cu elemente finite, care simulează pierderea stabilității locale a coloanelor (stâlpilor), validate de rezultatele experimentale.

În vederea atingerii obiectivului principal al tezei, menționat mai sus, s-au stabilit următoarele obiective specifice pentru teza de doctorat:

- testarea mecanică la încovoiere a îmbinărilor dintre grindă și stâlp, realizate cu conectori metalici, cu pini, pentru mai multe variante de combinații în ceea ce privește dimensiunea secțiunii grinzilor, grosimea peretelui stâlpilor și tipul conectorilor cu pini (număr diferit de pini);
- determinarea rigidităților la rotire și a momentelor de încovoiere limită pentru conexiunile dintre grindă și stâlp, conform standardelor în vigoare, pentru toate tipurile de ansamble de tipul grindă-conector-stâlp implicate în cercetare;
- studiul efectelor tipului de conector cu pini metalici și ale dimensiunilor elementelor asamblate (grinzi și stâlpi) asupra rigidității la rotire și asupra momentului de încovoiere înregistrat la cedarea acestor conexiuni;
- studiul în ceea ce privește modurile de cedare a conexiunilor dintre grindă și stâlp în funcție de tipul conectorului, de dimensiunile secțiunii grinzilor și de grosimea peretelui profilului utilizat pentru stâlpi;
- considerarea rezultatelor obținute experimental în studiul teoretic privind efectele rigidității la rotire a conexiunilor dintre grindă și stâlp, asupra comportării mecanice a grinzilor cu astfel de conexiuni la capete, în ceea ce privește momentul de încovoiere care se dezvoltă în capătul grinzii (în conexiune), precum și în ceea ce privește săgeata maximă a grinzii, pentru estimarea teoretică a coeficienților de siguranță atât din punctul de vedere al capacității portante a conexiunii, cât și din punctul de vedere al rigidității grinzii;
- studiul teoretic comparativ în ceea ce privește săgeata maximă și momentul maxim care se dezvoltă la mijlocul grinzii cu conexiuni semi-rigide la ambele capete (de tipul celor implicate în teza de doctorat), față de cazurile grinzii dublu-articulate sau dublu-încastrate la ambele capete;
- realizarea încercărilor mecanice pentru determinarea unghiului de rotire al conexiunii până la anularea jocurilor pentru diferite ansamble de tipul grindă-conector-stâlp, diferite în ceea ce

- privește grosimea profilului cu secțiune cu contur deschis, utilizat pentru stâlpi;
- identificarea influenței grosimii peretelui profilurilor utilizate pentru stâlpi, asupra rotirii conexiunii până la anularea jocurilor din îmbinarea dintre conectorul cu pini din capătul grinzii și stâlp;
 - considerarea rezultatelor experimentale, obținute pentru unghiurile de rotire a conexiunilor până la anularea jocurilor, în analiza comparativă din punct de vedere teoretic, a comportării mecanice a grinzilor cu conexiuni la ambele capete, de tipul celor considerate în studiu, prin estimarea efectelor jocurilor din conexiunile dintre grindă și stâlp, asupra momentului de încovoiere care se dezvoltă la mijlocul grinzii, precum și asupra săgeții maxime a grinzii;
 - realizarea încercărilor mecanice pentru analiza pierderii stabilității locale și distorsionale, a coloanelor realizate din diverse profiluri cu perforații, având secțiunea în forma literei Omega, cu contur deschis, cu pereți subțiri, utilizate la fabricarea stâlpilor pentru structurile metalice de depozitare, cu rafturi pentru paleți;
 - determinarea forței critice de flambaj și a ariei eficace corespunzătoare secțiunii profilurilor pentru stâlpii utilizați în structurile de depozitare, prin prelucrarea datelor experimentale obținute în încercările mecanice de pierdere a stabilității locale și distorsionale a acestora;
 - realizarea modelelor numerice cu elemente finite, pentru diverse profiluri perforate, cu pereți subțiri și cu secțiunea având forma literei Omega, utilizate în fabricarea stâlpilor pentru structurile de depozitare, pentru simularea pierderii stabilității locale și distorsionale a acestora, prin considerarea mai multor cazuri în ceea ce privește imperfecțiunile impuse;
 - studiul comparativ referitor la forța critică de flambaj, obținută prin simulare numerică pentru diversele cazuri considerate din punctul de vedere al mărimii imperfecțiunilor impuse în analiza cu elemente finite, a pierderii stabilității locale și distorsionale, a coloanelor implicate în cercetare;
 - validarea modelului numeric propus pentru analiza cu elemente finite a pierderii stabilității locale și distorsionale a profilurilor perforate, având secțiunea în forma literei Omega, prin comparația forțelor critice de flambaj obținute prin simularea numerică cu valorile obținute experimental pentru toate profilurile studiate;
 - identificarea celei mai potrivite metode în ceea ce privește mărimea imperfecțiunilor impuse în modelul numeric, care să conducă la diminuarea erorilor dintre rezultatele obținute prin simularea numerică și cele experimentale, în ceea ce privește forța critică de flambaj pentru pierderea stabilității locale și distorsionale ale profilurilor implicate în cercetare;
 - analiza comparativă a modurilor de pierdere a stabilității (locale sau distorsionale), obținute prin simularea numerică, cu modurile de pierdere a stabilității obținute în testarea experimentală, pentru profilurile perforate, cu pereți subțiri, implicate în studiu.

5. CERCETĂRI PRIVIND EFECTELE PARAMETRILOR CONSTRUCTIVI ASUPRA RIGIDITĂȚII CONEXIUNILOR DINTRE GRINZILE ȘI STÂLPII SISTEMELOR DE DEPOZITARE

5.1 Introducere

Scopul cercetărilor din acest capitol este de a analiza impactul tipului de conector metallic și dimensiunile elementelor (grinzi și stâlpi) asupra rigidității la rotire și momentului de încovoiere al conexiunilor în sistemele de depozitare cu rafturi pentru paleți. Obiectivele includ: (i) testarea ansamblelor grină-conector-stâlp cu conectori cu patru sau cinci pini; (ii) compararea rigidității conexiunilor în funcție de tipul conectorului; (iii) analiza efectelor grosimii peretelui stâlpului și dimensiunii secțiunii transversale a grinzii asupra rigidității și momentului capabil; (iv) compararea coeficienților de siguranță pentru diferite conexiuni pentru a identifica cea mai bună opțiune; (v) compararea săgeților maxime estimate pentru grinzi cu conexiuni semirigide la ambele capete. Rezultatele experimentale pentru rigiditatea la rotire și momentele de încovoiere sunt folosite pentru a evalua săgețile maxime ale grinzilor și a compara cu cele ale grinzilor cu articulații sau conectori rigizi. Au fost testate 18 grupuri diferite de ansamble grină-conector-stâlp, incluzând trei tipuri de grinzi, trei tipuri de profiluri de stâlp și două tipuri de conectori, cu 101 teste de încovoiere efectuate.

5.2 Îmbinările testate

Principalele elemente folosite la îmbinările dintre grindă și stâlp în industria structurilor de depozitare cu rafturi pentru paleți, se prezintă în figura 5.1.

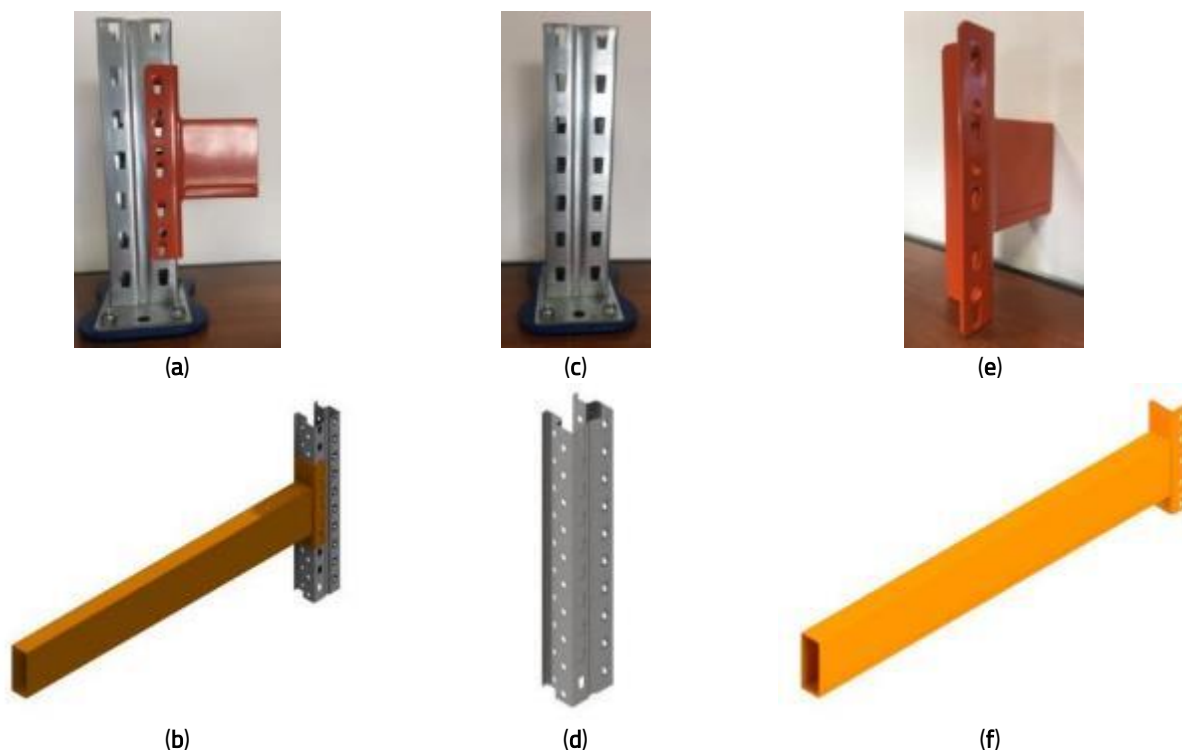


Figura 5.1. Principalele elemente folosite la testele experimentale: (a, b) ansamblu grindă-conector-stâlp; (c, d) stâlp; (e, f) grindă cu conector sudat (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Stâlpul prezentat în figura 5.1(c) și în figura 5.1(d) este un profil din tablă subțire obținut prin laminare la rece. Forma secțiunii transversale este similară cu forma literei omega (fig. 5.2). Stâlpul prezintă perforații pe toată lungimea, cu ajutorul cărora se realizează îmbinarea cu grinzile portante, prin intermediul pinilor metalici prezenți pe suprafața conectorului metalic. Principalele dimensiuni pentru secțiunile stâlpilor folosiți în această cercetare se prezintă în tabelul 5.1.

Grinzile au secțiunea de formă dreptunghiulară cu pereți subțiri (fig. 5.1e și fig. 5.1f) și sunt fabricate din două profiluri C asamblate împreună (fig. 5.3). Dimensiunile principale ale grinzilor utilizate în cadrul cercetărilor prezentate în acest capitol, sunt date în tabelul 5.2.

Tabel 5.1. Dimensiunile secțiunilor transversale ale stâlpilor utilizați (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Tipul de stâlp	Codul stâlpului	D* (mm)	W* (mm)	b* (mm)	t* (mm)
90x1.50	I				1,50
90x1.75	II	70	90	50	1,75
90x2.00	III				2,00

**Dimensiunile stâlpilor sunt exemplificate în Figura 5.2.*

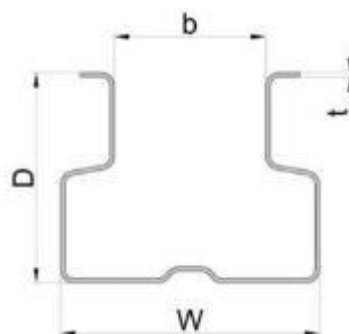


Figura 5.2. Forma și dimensiunile secțiunii transversale a stâlpilor (dimensiunile D, W, B, t sunt date în Tabelul 5.1) (Dumbrava și Cerbu, 2020).

Tabel 5.2. Dimensiunile secțiunilor transversale ale grinzilor utilizate (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Tipul grinzii	Codul grinzii	H* (mm)	W* (mm)	t* (mm)
BOX 90	A	90	40	1,50
BOX 100	B	100	40	1,50
BOX 110	C	110	40	1,50

**Dimensiunile grinzilor sunt exemplificate în figura 5.3.*

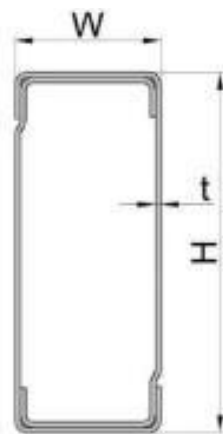


Figura 5.1. Forma și dimensiunile secțiunilor transversale ale grinzilor (dimensiunile D , W , b , t sunt date în Tabelul 5.2) (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

În tabelul 5.3 se prezintă dimensiunile generale (fig. 5.4) și codurile corespunzătoare fiecărui tip de conector folosit în acest studiu experimental.

Tabel 5.3. Dimensiunile conectorilor cu pini metalici (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Tipul conectorului	Codul conectorului	Nr. de pini	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	Grosimea (mm)
Conector cu 5 pini	5L	5	238	63	41	4,0
Conector cu 4 pini	4L	4	190	63	41	4,0

*Dimensiunile conectorului sunt exemplificate în figura 5.4.

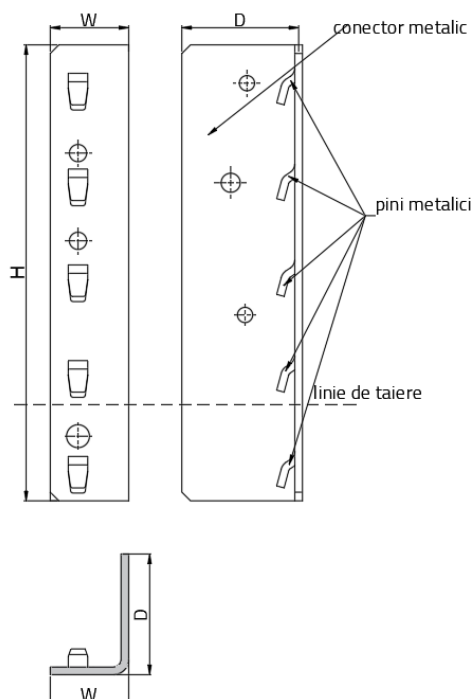


Figura 5.4. Forma și dimensiunile conectorilor cu pini metalici folosiți în acest studiu experimental (dimensiunile H , W , D sunt date în Tabelul 5.3) (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Tabel 5.4. Ansamblele stâlp-conector-grindă care au fost testate (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Codul de identificare pentru ansamblul testat	Tipul stâlpului	Tipul grinzii	Tipul conectorului	Nr. de teste pentru fiecare ansamblu
A-I-4L	90x1,50	A (secțiune BOX 90)	4L	5
A-I-5L			5L	6
A-II-4L	90x1,75		4L	6
A-II-5L			5L	6
A-III-4L	90x2,00		4L	6
A-III-5L			5L	6
B-I-4L	90x1,50	B (secțiune BOX 100)	4L	5
B-I-5L			5L	6
B-II-4L	90x1,75		4L	6
B-II-5L			5L	6
B-III-4L	90x2,00		4L	3
B-III-5L			5L	5
C-I-4L	90x1,50	C (secțiune BOX 110)	4L	6
C-I-5L			5L	6
C-II-4L	90x1,75		4L	6
C-II-5L			5L	6
C-III-4L	90x2,00		4L	5
C-III-5L			5L	6

Tabelul 5.4 prezintă combinațiile utilizate în studiul experimental pentru a determina rigiditatea la rotire și momentul de încovoiere capabil al ansamblelor testate, inclusiv codurile de identificare. Cele trei tipuri de stâlpi testați au aceeași formă secțională, diferențiindu-se doar prin grosimea profilului: 1,50 mm, 1,75 mm și 2,00 mm. Fiecare combinație de grindă și stâlp a fost testată cu două tipuri de conectori: cu patru sau cinci pini metalici. În total, s-au realizat 101 teste individuale pentru toate combinațiile stâlp-conector-grindă. Materialele testate au fost furnizate de SC Dexion Storage Solutions SRL(Râșnov, Romania)..

5.3. Metodele de testare utilizate pentru determinarea rigidității la rotire a conexiunii grindă-stâlp

5.3.1. Teste de tracțiune pentru oțel

Pentru fiecare element component al ansamblului testat (stâlp, conector, grindă), folosit la acest studiu experimental, s-au prelevat epruvete pentru determinarea caracteristicilor de material. Toate elementele sunt fabricate din oțel și ca urmare, s-au realizat teste de tracțiune conform prevederilor din standardul european EN15512 (2020). În urma testelor de tracțiune, s-au obținut caracteristicile reale ale oțelurilor din care sunt fabricate elementele componente: tensiunea de curgere σ_c , tensiunea limită σ_l , lungirea specifică până la forța maximă. Caracteristicile materialelor obținute prin încercările de tracțiune, sunt folosite apoi la analiza datelor obținute experimental.

Epruvetele pentru aceste teste au fost tăiate din reperele testate (stâlp, conector, grindă) ca în figura 5.5.

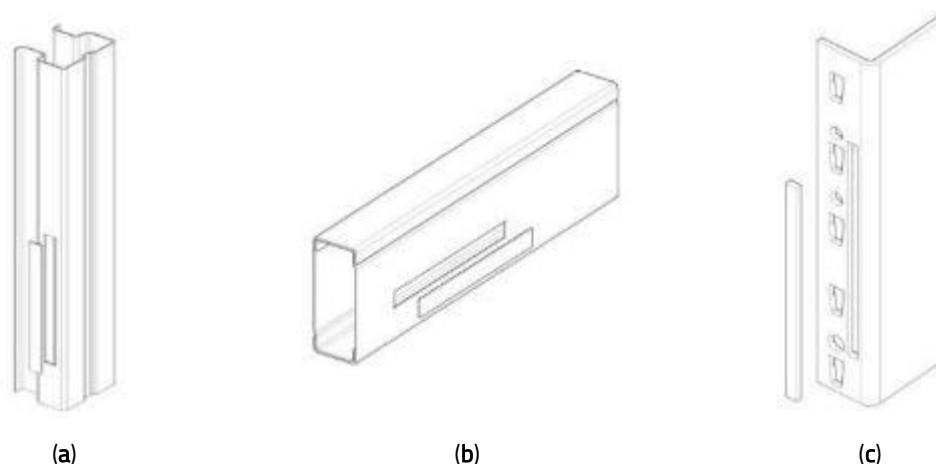
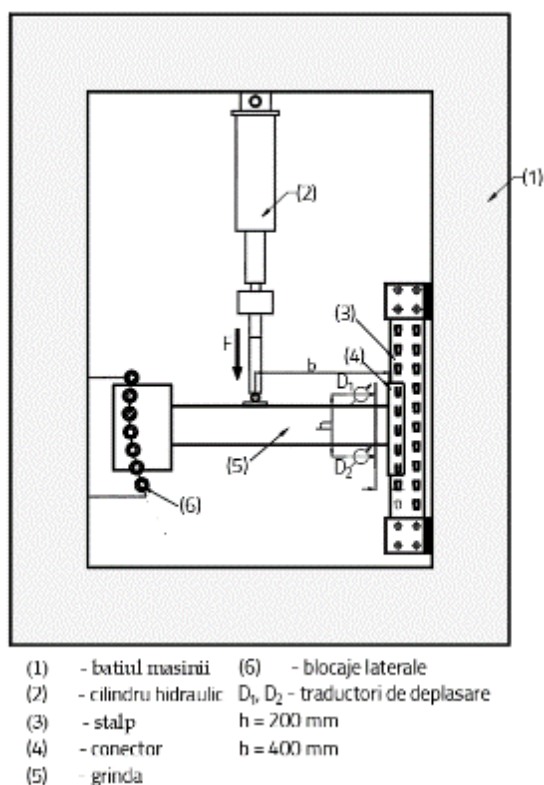


Figura 5.5. Zonele din care s-au prelevat epruvetele pentru testele de tracțiune: (a) din stâlp; (b) din grindă; (c) din conector (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

5.3.2. Teste de încovoiere pentru ansamblele stâlp-conector-grindă

Testele de încovoiere pentru ansamblele grindă-conector-stâlp s-au efectuat conform standardului EN 15512 (2020). Schema de încărcare folosită la încercarea de încovoiere a conexiunilor, precum și fotografia standului experimental, se prezintă în figura 5.6. Se menționează că acest stand specializat pentru încercarea la încovoiere (fig. 5.6b), pe care s-au realizat toate testele a căror rezultate sunt prezentate în acest capitol, se află în Laboratorul de încercări mecanice din cadrul companiei SC Dexion Storage Solutions SRL (Râșnov, Romania). Se menționează că autorul tezei de doctorat a avut o contribuție esențială la proiectarea și realizarea acestui stand experimental, fiind angajat al acestei companii. SC Dexion Storage Solutions SRL este direct interesată de rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol.

În conformitate cu figura 5.6(a) și cu standardul european EN 15512 (2020), un stâlp de lungime mică s-a conectat la un cadru de testare foarte rigid, în două puncte aflate la o distanță de 470 mm unul față de celălalt. O grindă având lungimea de 650 mm este conectată cu stâlpul cu ajutorul conectorului. Mișcarea laterală și răsucirea grinzii au fost împiedicate. Grinda este capabilă să se deplaseze liber în direcția verticală a sarcinii deoarece o placă de oțel sudată la capătul liber al grinzii, este ghidată între rulmenți. Forța verticală a fost aplicată la distanța b egală cu 400 mm față de stâlp (fig. 5.6a), prin utilizarea traductorului de forță de tipul SEG Instruments a cărei precizie este 0,001 kN, având forța maximă de 12,5 kN.



(a)

(b)

Figura 5.6. Test de încovoiere conform cu EN 15512 (2020): (a) schema de încărcare; (b) fotografie a standului experimental (Dumbrava și Cerbu, 2020a; Dumbrava și Cerbu, 2022a).

Rotirea conexiunii s-a măsurat prin utilizarea traductoarelor de deplasare ale căror tije sunt în contact permanent cu placa fixată pe grindă, aproape de conector, astfel încât distanța a este egală cu 50 mm (fig. 5.6a). Traductoarele de deplasare de tip WA-100 (fabricate de HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik) pot înregistra deplasări cu dimensiunea mai mică de 100 mm, având precizia de 0,001 mm.

Testele s-au repetat identic pentru fiecare ansamblu grindă-conector-stâlپ prezentate în tabelul 5.4. S-au efectuat minim trei teste pentru fiecare tip de ansamblu grindă-conector-stâlپ dintre cele prezentate în tabelul 5.4. În acest fel, se poate analiza și gradul de împrăștiere a rezultatelor.

5.4 Rezultatele experimentale și discuții

5.4.1. Rezultate obținute la testele de tracțiune pentru oțel

În tabelul 5.5, sunt prezentate proprietățile de tracțiune corespunzătoare materialelor epruvetelor de tracțiune, debitate din fiecare tip de componentă a ansamblului stâlپ-grindă-conector. Rezultatele încercărilor de tracțiune pentru oțelul corespunzător conectorului cu patru pini sunt identice cu cele corespunzătoare conectorului cu cinci pini, deoarece s-au folosit conectori cu cinci pini pentru toate grinzile și apoi, s-au obținut conectorii cu patru pini prin debitarea celor cu cinci pini. S-a luat această decizie în ceea ce privește tăierea conectorului cu cinci pini, tocmai pentru a avea același material pentru ambele tipuri de conectori.

Tabel 5.5. Proprietățile materialelor din care sunt fabricate componentele ansamblului grindă-conector-stâlp, care au fost testate (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Componenta corespunzătoare epruvetei de tracțiune	Grosimea măsurată	Tensiunea de curgere ($R_{p,02}$)	Tensiunea maximă	Deformația
	(mm)	σ_c^* (MPa)	σ_t^* (MPa)	(%)
Stâlpul I ($90 \times 1,50$)	1,48	447,9	528,9	19,2
Stâlpul II ($90 \times 1,75$)	1,80	496,2	536,2	15,3
Stâlpul III ($90 \times 2,00$)	2,09	535,1	590,2	18,5
Grinda A (secțiune box 90)	1,25	360,6	459,5	38,8
Grinda B (secțiune box 100)	1,23	379,8	429,5	29,7
Grinda C (secțiune box 110)	1,27	344,2	411,6	38,1
Conector cu 4 pini (conector pt Box 90)	4,04	409,9	469,8	25,6
Conector cu 5 pini (conector pt. Box 90)	4,04	409,0	469,8	25,6
Conector cu 4 pini (conector pt. Box 100)	4,07	395,3	464,0	32,6
Conector cu 5 pini (conector pt. Box 100)	4,07	395,3	464,0	32,6
Conector cu 4 pini (conector pt. Box 110)	4,05	444,7	503,5	24,5
Conector cu 5 pini (conector pt. Box 110)	4,05	444,7	503,5	24,5

* Aceste valori au fost obținute prin încercări de tracțiune, realizate pe mașina de testare INSTRON 3369.

5.4.2. Rezultate obținute la testele de încovoiere

Toate ansamblele grindă-conector-stâlp care au fost prezentate în tabelul 5.4 au fost testate în conformitate cu procedura de testare prezentată în standardul european EN 15512 (2020).

Pentru a analiza comparativ efectele tipului de conector asupra comportării mecanice la încovoiere a conexiunilor grindă-conector-stâlp, se analizează curbele medii moment-rotire ($M_n - \theta_n$), care sunt prezentate în figurile 5.8, 5.9 și 5.10 pentru fiecare set de ansamble care conțin grinzile de tipul A, B și respective, C. Se poate observa comportarea neliniară a conexiunilor, precum și faptul că ansamblele care conțin conectorii cu cinci pini conferă întotdeauna rigiditate la rotire mai mare decât conexiunile cu conectorii cu patru pini pentru toate ansamblele testate, ceea ce era de așteptat.

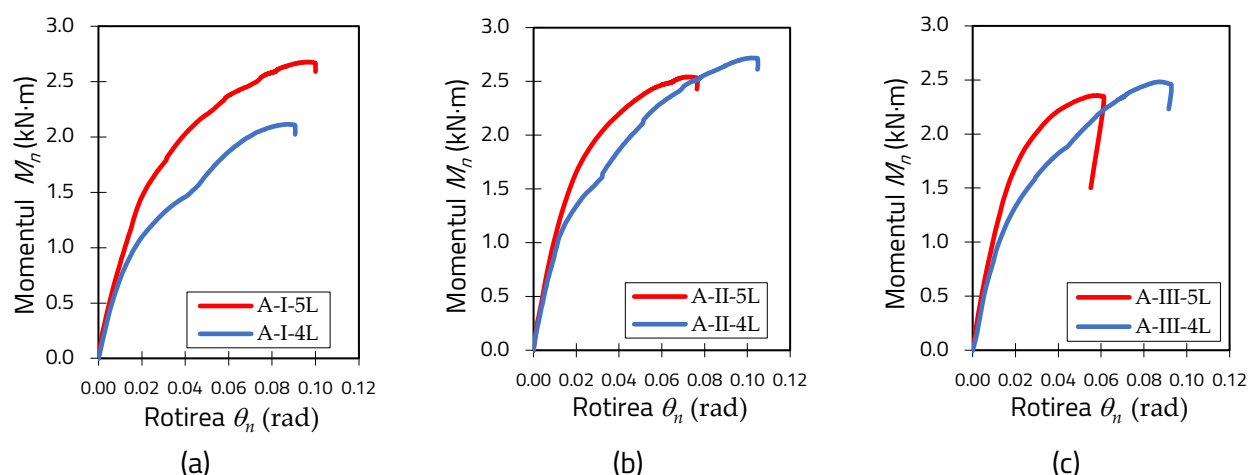


Figura 5.8. Comparație între curbele moment-rotire determinate pentru ansamblele: (a) A-I-4L vs. A-I-5L; (b) A-II-4L vs. A-II-5L; (c) A-III-4L vs. A-III-5L (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

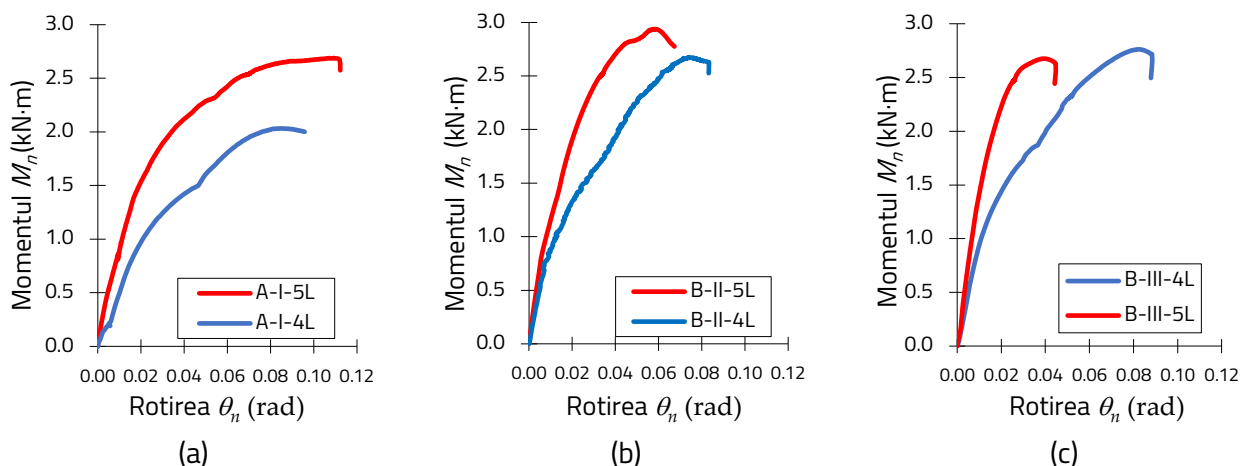


Figura 5.9. Comparație între curbele moment-rotire determinate pentru ansamblele: (a) B-I-4L vs. B-I-5L; (b) B-II-4L vs. B-II-5L; (c) B-III-4L vs. B-III-5L (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

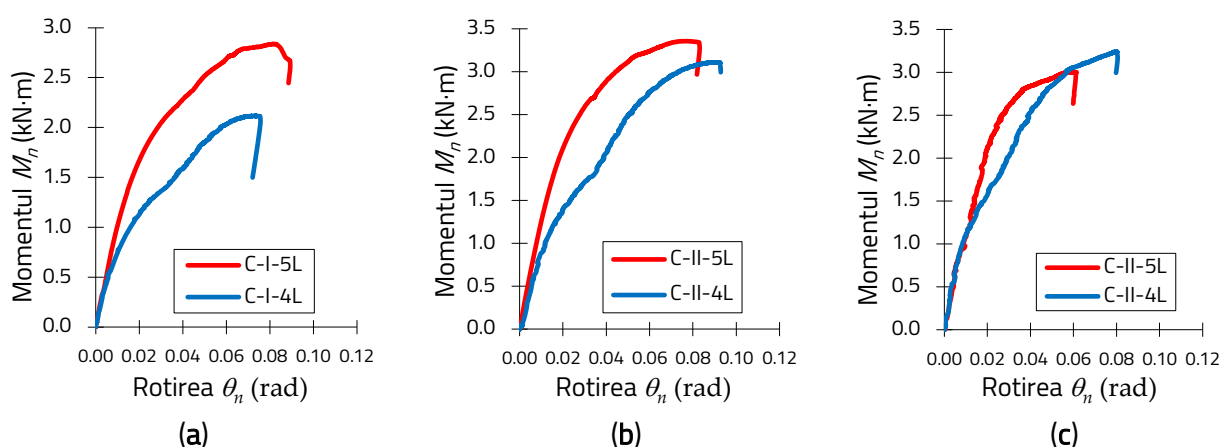


Figura 5.10. Comparație între curbele moment-rotire determinate pentru ansamblele: (a) C-I-4L vs. C-I-5L; (b) C-II-4L vs. C-II-5L; (c) C-III-4L vs. C-III-5L (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Pentru a face analiza comparativă a rezultatei testelor, rigiditatea la rotire k_{ni} a conexiunii pentru un tip de ansamblu a fost determinată pentru valoarea maximă a momentului de încovoiere M_{Rd} , când η este egal cu 1. Toate rezultatele obținute se prezintă în Tabelul 5.6.

Valorile medii și deviațiile standard se prezintă de asemenea în tabelul 5.6, atât pentru momentul de încovoiere capabil M_{Rd} , cât și pentru rigiditatea la rotire k_m corespunzătoare fiecărui grup de ansamblu grindă-conector-stâlp, supus solicitării de încovoiere. Valoarea raportului dintre deviația standard corespunzătoare momentului de încovoiere capabil M_{Rd} pentru fiecare grup de ansamble testate, și valoarea medie M_{Rd} , este în medie 0.0362 (sau 3.62 %), ceea ce înseamnă un nivel ridicat în ceea ce privește acuratețea testelor experimentale.

Se pot face observații similare cu privire la valorile raporturilor dintre deviația standard corespunzătoare rigidităților la rotire k_{ni} pentru un ansamblu testat și valoarea medie k_m acestora.

Tabel 5.6. Rezultatele testelor de încovoiere obținute pentru toate ansamblele studiate (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

Codul ansamblului	Momentul de cedare			Rigiditatea la rotire			Codul ansamblului	Momentul de cedare			Rigiditatea la rotire			Codul ansamblului	Momentul de cedare			Rigiditatea la rotire		
	M_{ni}	M_{Rd}	Stdev	k_{ni}	k_m	Stdev		M_{ni}	M_{Rd}	Stdev	k_{ni}	k_m	Stdev		M_{ni}	M_{Rd}	Stdev	k_{ni}	k_m	Stdev
	(kN·m)	(kN·m)	(kN·m)	(kN·m/(kN·m/rad))	(kN·m/rad)	(kN·m/rad)		(kN·m)	(kN·m)	(kN·m)	(kN·m/rad)	(kN·m/rad)	(kN·m/rad)		(kN·m)	(kN·m)	(kN·m)	(kN·m/rad)	(kN·m/rad)	(kN·m/rad)
A-I-4L	2,11			40			B-I-4L	2,03			34			C-I-4L	2,12			44		
	1,99			38				2,06			36				2,13			44		
	2,08	1,54	0,12	38	39,0	1,34		2,08	1,84	0,02	35	35,9	1,38		2,13	1,70	0,08	45	43,7	1,26
	1,90			37				2,07			38				1,95			41		
															2,14			44		
	1,81			40				2,07			37				1,96			40		
A-I-5L	2,68			47			B-I-5L	2,69			55			C-I-5L	2,84			72		
	2,65			45				2,75			59				3,05			73		
	2,77	2,3	0,07	48	48,0	6,18		2,62	2,24	0,12	46	57,8	7,29		3,01	2,15	0,20	73	77,4	5,71
	2,60			40				2,58			61				2,60			80		
	2,78			55				2,76			58				2,61			81		
	2,64			56				2,92			68				2,69			86		
A-II-4L	2,73			41			B-II-4L	3,04			56,1			C-II-4L	3,08			50,1		
	2,75			37				2,67			54,3				3,03			49,3		
	2,72	2,43	0,05	40	42,0	3,37		2,87	2,03	0,18	57,6	56,0	1,65		3,07	2,74	0,03	52,8	52,4	2,97
	2,84			45											3,11			53,1		
	2,77			45											3,08			56,8		
	2,81			45																

A-II-5L	2,54			63	76,0	13,5	B-II-5L	2,66			65	86,1	15,7	C-II-5L	3,29			79	83,7	7,25
	2,69			57				2,78			77				3,39			93		
	2,79	2,21	0,09	74				2,75	2,36	0,10	76				3,36	2,95	0,06	81		
	2,60			81				2,85			100				3,35			80		
	2,59			91				2,87			105				3,47			93		
	2,57			88				2,94			94				3,35			77		
	A-III-4L	2,57						41	45,0	3,57	B-III-4L				2,76			50		
2,48				43	2,74			50				3,27			67					
2,40		2,16	0,06	42	2,78	2,43	0,03	47				3,24	2,89	0,03	64					
2,49				44	2,75			53				3,20			64					
2,50				48	2,70			55				3,27			61					
2,52				50	2,71			52				3,24			58					
A-III-5L		2,36			73	77,0	8,90	B-III-5L				2,52			80	102	20,9	C-III-5L	2,92	
	2,34			65	2,49						86	3,01			101					
	2,34	2,09	0,02	72	2,55				2,18	0,07	98	2,99	2,61	0,06	116					
	2,34			81	2,55						114	2,94			121					
	2,31			84	2,68						131	3,00			119					
	2,37			89								3,08			128					

Analiza valorilor mici înregistrate pentru valoarea deviației standard (notată cu $stdev$) comparativ cu valorile medii ale rigidității la rotire k_m , arată că gradul de împrăștiere al rezultatelor este mic. Diferențele dintre rezultatele obținute pentru ansamblele din același set sunt justificate de imperfecțiunile geometrice ale secțiunilor transversale, care sunt caracteristice profilurilor de oțel formate la rece.

5.5 Modurile de cedare a conexiunilor grindă-stâlp în încercările de încovoiere

În încercările de încovoiere, modul de cedare s-a modificat de la un ansamblu la altul. Cedarea stâlpilor reprezintă principalul mod de cedare, mai ales pentru ansamblele pentru care profilului stâlpului a avut grosimea de 1,50 mm (fig. 5.14). Acest lucru se întâmplă din cauza faptului că atunci când grinda este încărcată și conectorul se rotește, primii doi pini sunt solicitați cel mai tare și deformează stâlpul în zona perforațiilor deoarece grinda este supusă la tensiuni normale de tracțiune în partea superioară (fig. 5.14c).

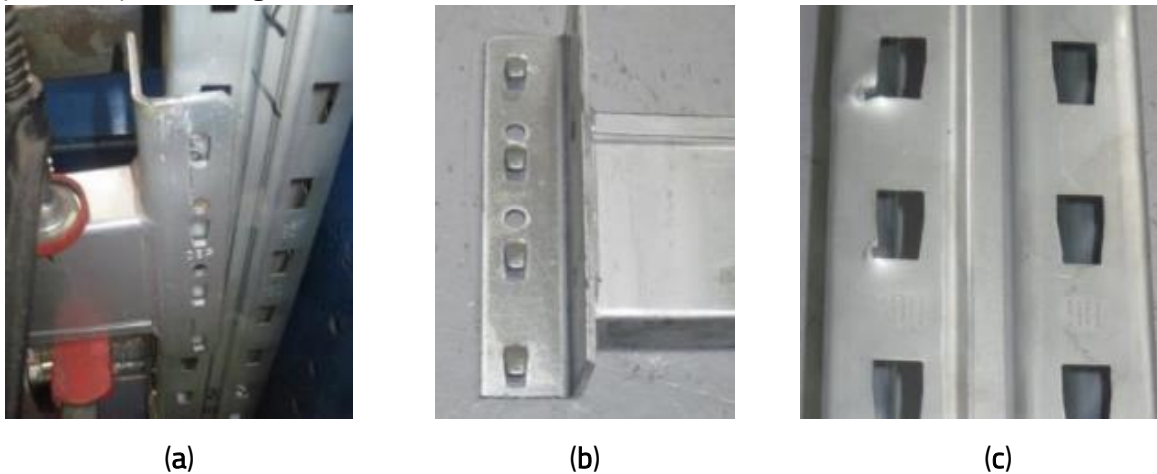


Figura 5.14. Modurile de cedare pentru stâlpii cu grosimea peretelui secțiunii egală cu 1,50 mm: (a, b) modurile de cedare pentru conector; (c) modul de cedare în zona perforațiilor de pe partea frontală a stâlpului (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

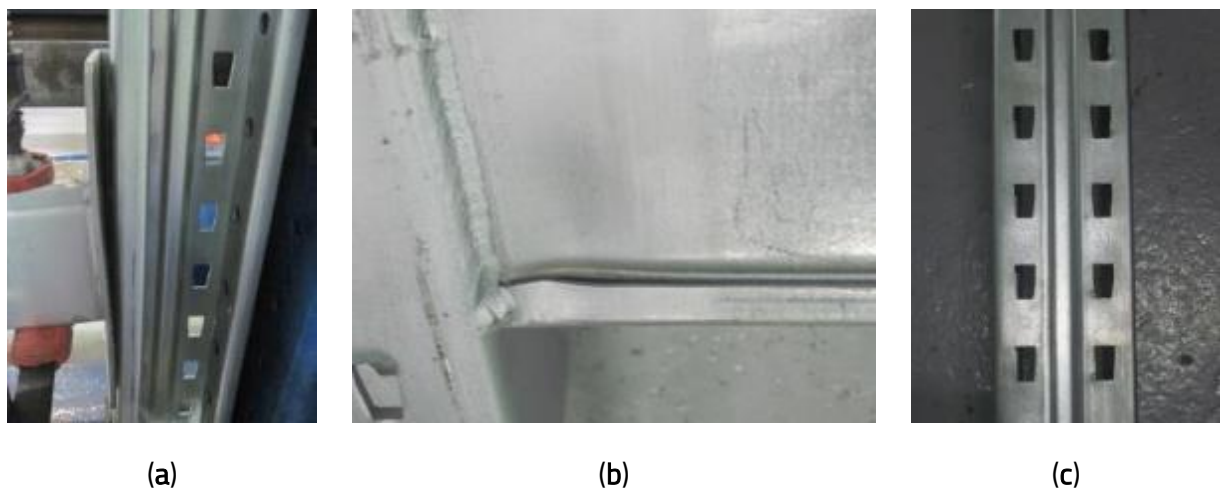


Figura 5.15. Modurile de cedare în cazul ansamblelor care conțin stâlpii care au grosimea peretelui de 1,75 mm: (a) modul de cedare al conectorului cu pini metalici, (b) modul de cedare al grinzii; (c) modul de cedare al stâlpului (Dumbrava și Cerbu, 2020a).

S-a observat că dacă grosimea stâlpului creşte, pentru stâlpii cu o grosimea de 1,75 mm, modul de cedare s-a schimbat. Toate elementele componente (stâlpul, conectorul şi grinda) încep să fie o parte a modului de cedare (fig. 5.15). În acest caz, rotirea scade (fig. 5.15a), mai ales dacă creşte înălţimea secţiunii grinzii. Partea inferioară a grinzii este supusă tensiunilor normale de compresiune şi începe să flambeze local (fig. 5.15b). Conectorul se deformează de asemenea în solicitarea de încovoiere (fig. 5.15a).

În cazul ansamblelor care conţin stâlpi cu grosimea profilului de 2,00 mm, efectele solicitării pinilor metalici ai conectorului asupra stâlpului sunt foarte mici, în special pentru conectorul cu cinci pini (fig. 5.16a, fig. 5.16c). Se constată că rotirea conectorului este mai mică (fig. 5.16a), ceea ce înseamnă că cea mai mare rigiditate la rotire corespunde acestor situaţii (vezi Tabelul 5.6). În acest caz, principalele moduri de cedare sunt încovoierea conectorului (fig. 5.16a) şi deformarea locală a grinzii lângă conector (fig. 5.16b). Pentru ansamblul cu conectorul cu patru pini (fig. 5.17), din cauza faptului că grinda se roteşte mai mult decât în cazul ansamblului cu un conector cu cinci pini, primul pin de la partea superioară deformează stâlpul în zona slotului în care se montează pinul metalic (fig. 5.17c).

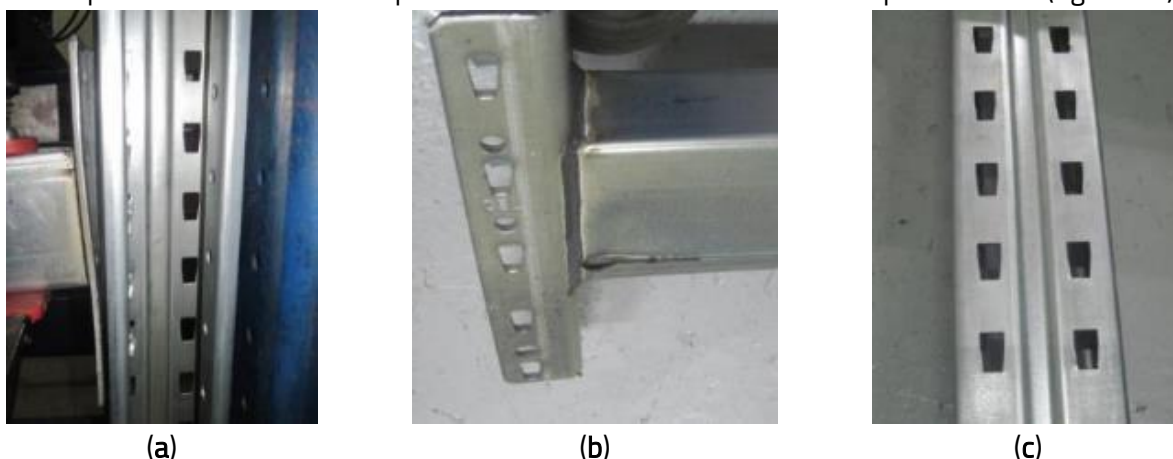


Figura 5.16. Modurile de cedare în cazul ansamblelor care conţin stâlpii ce au grosimea peretelui secţiunii de 2,00 mm şi conectorii cu cinci pini metalici: (a) modul de cedare al conectorului; (b) modul de cedare al grinzii; (c) modul de cedare al stâlpului (deformarea formei slotului) (Dumbrava şi Cerbu, 2020a).

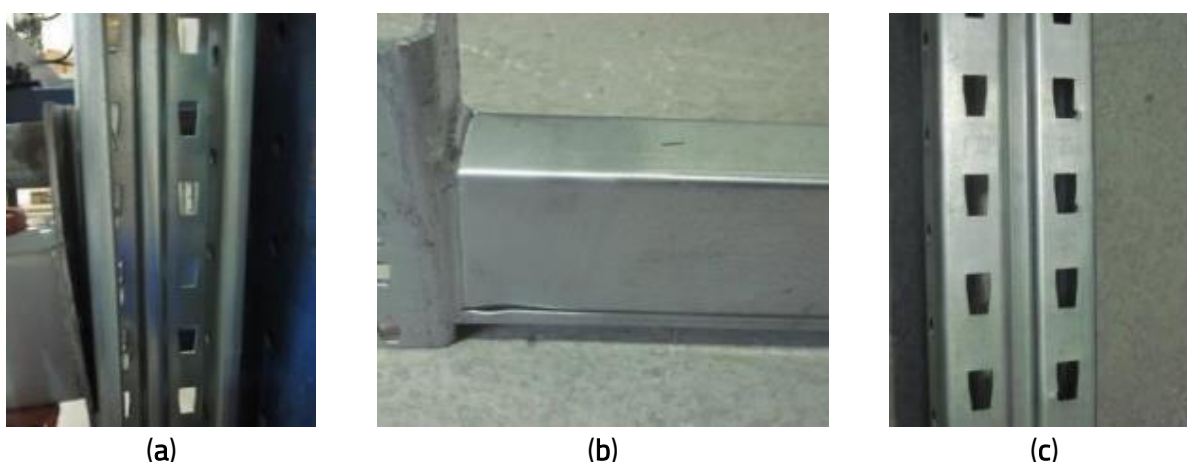


Figura 5.17. Modurile de cedare în cazul ansamblelor care conţin stâlpii ce au grosimea peretelui secţiunii de 2,00 mm şi conectori cu patru pini metalici: (a) modul de cedare al conectorului; (b) modul de cedare al grinzii; (c) modul de cedare al stâlpului, deformarea slotului (Dumbrava şi Cerbu, 2020a).

5.6 Efectele rigidităţii la rotire a conexiunilor de capăt dintre grindă şi stâlp, asupra comportării mecanice a grinzilor

Valorile experimentale obţinute pentru momentul de proiectare M_{Rd} şi rigiditatea la rotire a conexiunii sunt esenţiale pentru a verifica siguranţa ansamblului grindă-conector-stâlp, atât din perspectiva rezistenţei, cât şi a rigidităţii. Într-un exemplu tipic pentru sistemele de depozitare cu rafturi pentru paleţi, două grinzi de 2,7 m trebuie să susţină greutatea a trei paleţi din lemn, fiecare cântărind 500 kg. Greutatea totală a trei paleţi este de 15.000 N, distribuită uniform pe cele două grinzi, rezultând o forţă de 7500 N pe fiecare grindă, respectiv o forţă uniform distribuită de 2,78 N/mm. Se consideră că aceste grinzi sunt îmbinate cu stâlpii prin conexiuni semirigide, cu valorile M_{Rd} şi k_m specificate în tabelul 5.6.

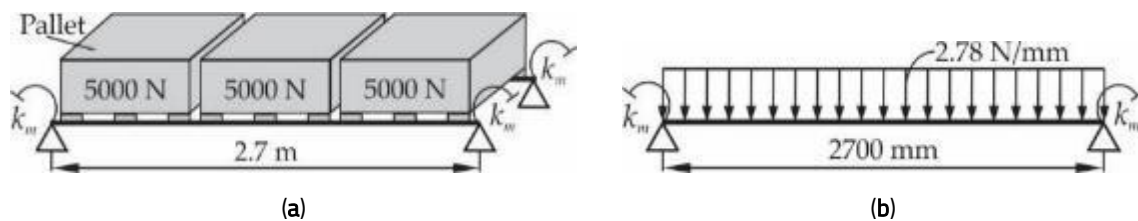


Figura 5.18. Schema de încărcare pentru raftul sistemului de depozitare cu paleţi: (a) încărcarea pe două grinzi pentru susţinerea a trei paleţi, (b) schema echivalentă de încărcare pentru o grindă, în care s-a considerat rigiditatea la rotire k_m pentru conexiunea grindă-stâlp (Dumbrava şi Cerbu, 2020a).

Pentru a înţelege mai bine importanţa determinării experimentale a rigidităţii la rotire a conexiunii grindă-stâlp, se prezintă în continuare un studiu comparativ pentru acelaşi caz de studiu practică prezentat anterior, corespunzător grinzii de tipul B pentru următoarele situaţii diferite din punctul de vedere al rigidităţii la rotire a conexiunilor de la capătul grinzii:

- grinda de tipul B, prezentată în figura 5.19(a), pentru care rigiditatea la rotire a conexiunilor este egală cu 0, ceea ce corespunde capetelor articulate ale grinzii;
- grinda de tipul B, prezentată în figura 5.19(b), pentru care rigiditatea la rotire k_m pentru ambele conexiuni de capăt este egală cu 35,9 kN·m/rad, corespunzătoare conexiunii semirigide;
- grinda de tipul B, prezentată în figura 5.19(c), pentru care rigiditatea la rotire k_m pentru ambele conexiuni de capăt este egală cu 102 kN·m/rad, corespunzătoare conexiunii semirigide;
- grinda de tipul B, prezentată în figura 5.19(d), pentru care rigiditatea la rotire k_m pentru conexiuni este infinită şi corespunde conexiunilor rigide (grindă dublu încastrată).

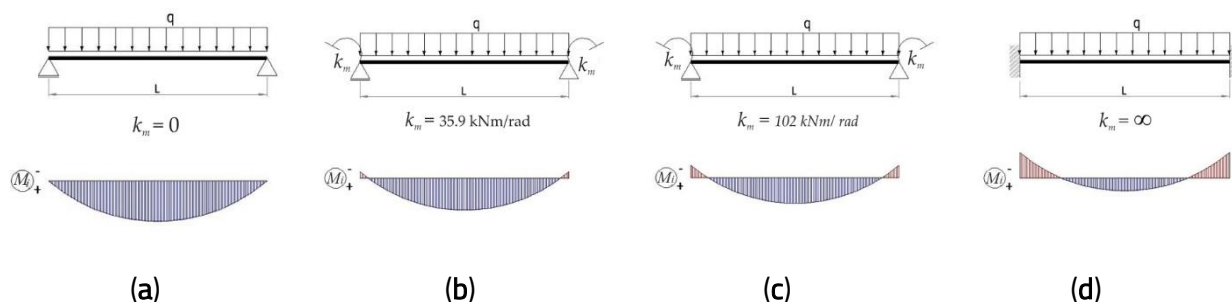


Figura 5.19. Diagramele pentru moment încovoietor pentru toate cazurile de condiţii de rezemare

pentru grinda tip B (a) grindă articulată la ambele capete (b) conexiune semirigidă, conector cu patru pini metalici, (c) conexiune semirigidă, conector cu cinci pini metalici, (d) conexiune rigidă (Dumbrava şi Cerbu, 2020a).

Se menţionează că toate rezultatele se prezintă pentru cazurile ansamblelor care conţin grinda de tipul B. În cazul modelelor numerice pentru grinzile cu conexiuni semirigide la ambele capete (fig. 5.19b, fig. 5.19c), se iau în considerare doar cazurile corespunzătoare valorilor extreme ale rigidităţii la rotire k_m (valoarea cea mai mică şi valoarea cea mai mare).

Pentru comparaţii vizuale, în figura 5.20 şi în figura 5.21, se prezintă diagramele momentelor de încovoiere şi respectiv diagramele săgeţilor (a deplasării verticale), pentru toate cazurile prezentate în figura 5.19.

Comparaţia rezultatelor prezentate în figurile 5.20, 5.21, arată că este important să se determine rigiditatea la rotire pentru astfel de conexiuni semirigide, deoarece săgeata, momentul de încovoiere şi tensiunile sunt influenţate de condiţiile de rezemare.

În teza completă se pot găsi detalii ample despre analiza acestor îmbinări semirigide.

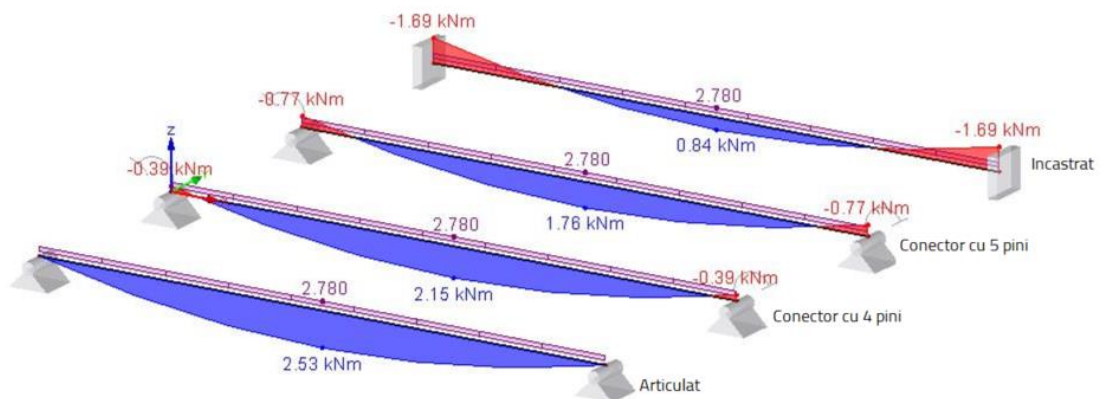


Figura 5.20. Comparaţie între diagramele momentelor de încovoiere pentru toate cazurile de rezemare considerate pentru grinda de tipul B (Dumbrava şi Cerbu, 2020a).

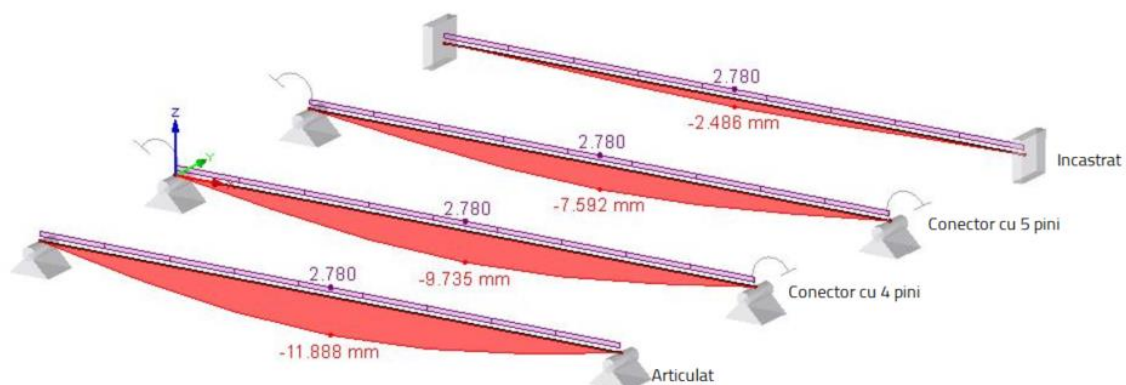


Figura 5.21. Comparaţia săgeţilor maxime v_{max} (deplasările verticale maxime) pentru toate cazurile de condiţii de rezemare considerate pentru grinda de tipul B (Dumbrava şi Cerbu, 2020a).

5.7 Concluzii

Conexiunile semirigide sunt frecvent utilizate în industria sistemelor metalice de depozitare cu rafturi pentru paleți. Acest studiu experimental examinează comportamentul mecanic al conectorilor de la capetele grinzelor, utilizați pentru asamblarea acestora cu stâlpii. Obiectivul principal al cercetării prezentate în acest capitol a fost să investigheze influența tipului de conector (conector cu patru pini și conector cu cinci pini) și efectele grosimii profilului stâlpului asupra capacității portante a conexiunilor în condițiile solicitărilor mecanice. Pentru toate ansamblurile de tip grindă-conector-stâlp testate, au fost trase curbele moment-rotire. De asemenea, valorile experimentale obținute pentru momentul capabil de proiectare M_{Rd} și pentru rigiditatea la rotire k_m a conexiunilor au fost comparate. Detalii complete despre această analiză sunt prezentate în teza de doctorat completă.

6. CERCETĂRI PRIVIND EFECTELE JOCURILOR DIN CONEXIUNILE DINTRE GRINDĂ ŞI STÂLP, ASUPRA EFORTURILOR SECŢIONALE ŞI ASUPRA DEPLASĂRILOR GRINZII

6.1. Aspecte privind jocurile din conexiunile dintre grindă şi stâlp utilizate în structurile metalice de depozitare cu rafturi pentru paleţi

În proiectarea sistemelor de depozitare cu rafturi pentru paleţi, comportamentul mecanic al îmbinărilor semi-rigide este evaluat prin teste conform standardului european EN 15512. Versiunea din 2020 a acestui standard include proceduri pentru corectarea momentelor de încovoiere şi a săgeţii maxime a grinzii, necesare din cauza jocurilor între grinzi şi stâlpi. Îmbinările pot fi cu şuruburi sau cu pini metalici, fiecare având avantaje şi dezavantaje: îmbinările cu şuruburi sunt mai puţin economice, în timp ce cele cu pini sunt mai rapide de instalat şi oferă mai multă flexibilitate. Totuşi, conectorii cu pini necesită considerarea jocurilor iniţiale în calculele de proiectare. Ultima versiune a standardului EN 15512 detaliază metoda de testare a rotirii conectorului şi efectele jocurilor asupra deformaţiilor şi momentelor de încovoiere, contribuind semnificativ la literatura de specialitate.

În cazul jocurilor din îmbinările cu şuruburi (fig. 6.1), se poate observa şi efectul de alunecare (fig. 6.2). Diferenţa principală faţă de îmbinările cu pini metalici este că, în cazul îmbinărilor cu şuruburi, efectul de alunecare nu apare la începutul curbei moment-rotire (fig. 6.2).

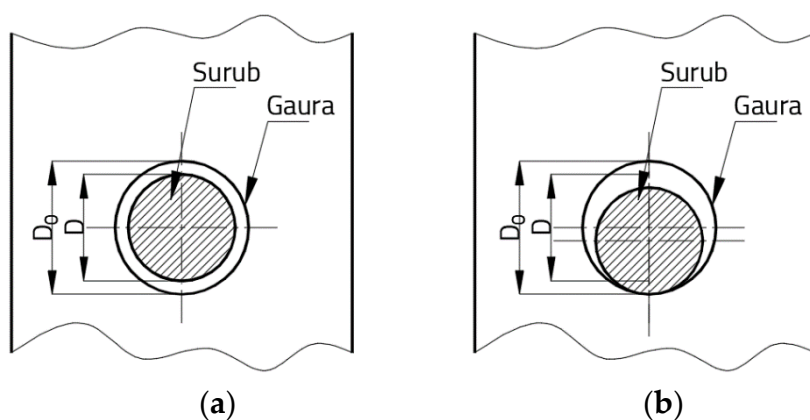


Figura 6.1. Jocul din conexiunile cu şuruburi: (a) jocul între şurub şi gaură; (b) jocul real când şurubul este în contact cu gaura (Dumbrava şi Cerbu, 2022a).

Spre deosebire de conexiunile cu şuruburi, standardul european EN 15512 arată necesitatea considerării jocurilor existente în îmbinarea cu conector cu pini, utilizat între stâlp şi grindă, în analiza structurală a sistemelor de depozitare cu rafturi pentru paleţi. Efectele jocurilor din îmbinări apare la o încărcare mai mică. În cazul conexiunilor cu pini metalici, în comparaţie cu cele cu şuruburi. Această comportare se explică prin faptul că şuruburile sunt în general pre-tensionate în timp ce conectorii cu pini metalici nu au o regulă generală care să țină cont de efectele jocurilor, din cauza formelor şi dimensiunilor diferite atât în ceea ce priveşte perforaţiile stâlpilor, cât şi în ceea ce priveşte conectorii cu pini, fixaţi la capetele grinzilor.

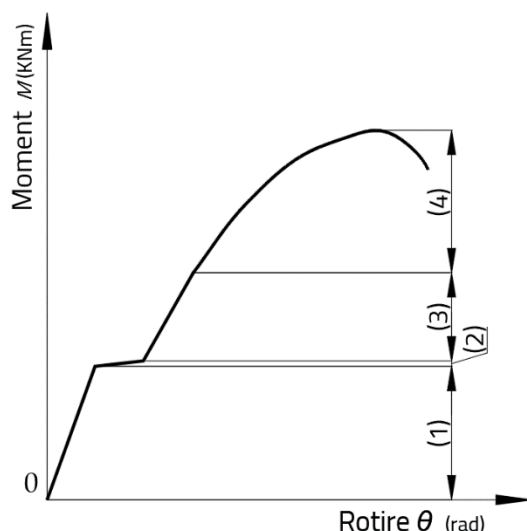


Figura 6.2. Comportarea tipică a conexiunilor cu şuruburi în structurile de oţel, formate la rece: (1) - comportarea liniară, înainte de alunecare (anularea jocului); (2) - efectele alunecării cauzate de jocul dintre şurub şi gaură; (3) - comportarea liniară după eliminarea jocului; (4) comportamentul neliniar (Dumbrava şi Cerbu, 2022a).

6.2. Materialele testate şi metoda de lucru

6.2.1. Tipuri de ansamble testate

Scopul programului experimental este de a determina efectele jocurilor din îmbinarea cu conector cu pini dintre grindă şi stâlp, pentru trei tipuri de conexiuni diferite, care sunt prezentate în tabelul 6.1.

Codurile de identificare corespunzătoare ansamblelor de tipul stâlp-conector-grindă care au fost testate, sunt prezentate în tabelul 6.1 şi sunt utilizate pentru prezentarea rezultatelor obţinute.

Tabel 6.1. Ansamblele de tipul stâlp-conector-grindă care au fost testate (Dumbrava şi Cerbu, 2022a).

Codul ansamblului	Tipul stâlpului $W^* \times t^*$	Tipul grinzii $H^{**} \times W_1^{**} \times t_1^{**}$	Tipul conectorului	Numărul de teste efectuate pentru studiul efectelor jocurilor	Numărul de teste de încovoiere
0-I-5T	90 x 1,50	Secţiune de tipul	5T	4	6
0-II-5T	90 x 1,75	BOX	(conectorul	4	6
0-III-5T	90 x 2,00	150 x 50 x 1,75	cu 5 pini)	4	6

* Dimensiunile stâlpilor sunt prezentate în figura 6.3(a).

** Dimensiunile grinzilor sunt prezentate în figura 6.3(b).

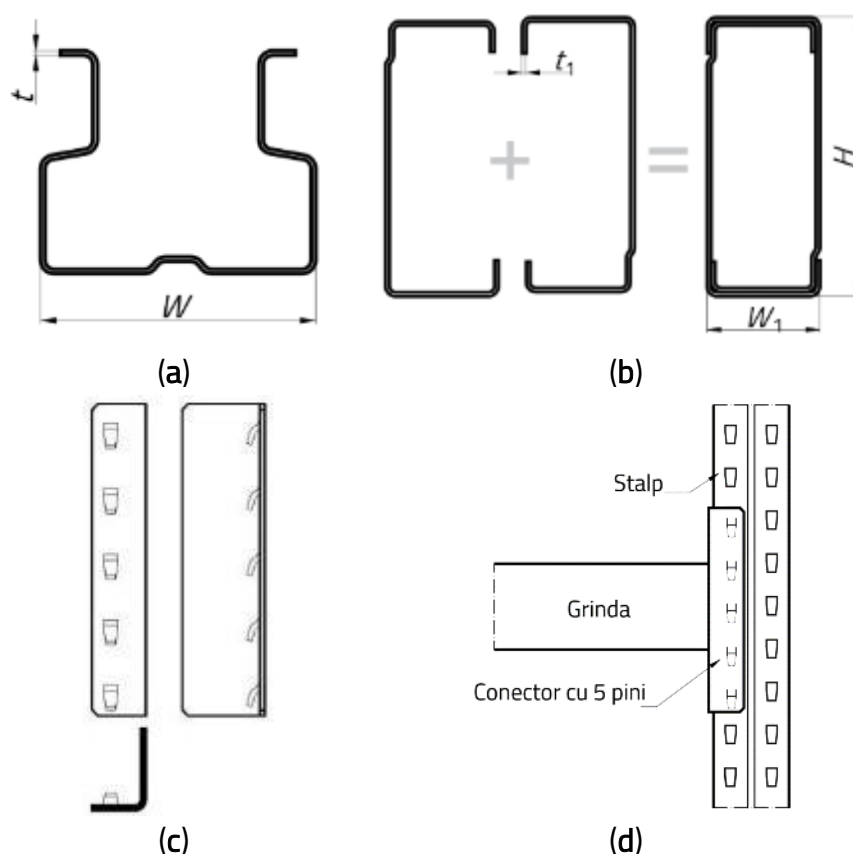


Figura 6.3. Elementele componente ale ansamblurilor de tipul stâlp-conector-grindă: (a) secțiunea stâlpului; (b) secțiunea grinzii; (c) conectorul cu 5 pini; (d) schița ansamblului testat (Dumbrava și Cerbu, 2022a).

Elementele componente ale ansamblurilor de tipul grindă- conector-stâlp, care au testate, se prezintă în figura 6.3. Se utilizează trei coloane cu secțiuni diferite (fig. 6.3a), care au aceeași formă pentru secțiunea transversală, dar grosimi diferite pentru peretele secțiunii (1,50 mm, 1,75 mm și 2,00 mm), așa cum se prezintă în tabelul 6.1. Aceeași grindă compusă, obținută prin îmbinarea a două profiluri C (fig. 6.3b), se conectează cu coloana printr-un conector cu cinci pini metalici (fig. 6.3c), care este sudat la capătul grinzii. Pentru fiecare ansamblu testat (fig. 6.3d și Tabelul 6.1), s-a folosit același tip de conector cu cinci pini, având codul 5T în tabelul 6.1. S-a folosit o grindă a cărei secțiune are o valoare mare a momentului de inerție față de axa principală (cu rigiditate mai mare), pentru a reduce cât mai mult efectul deformațiilor grinzii în testele mecanice, efectuate pentru determinarea rotirii conectorului până la anularea jocurilor existente în îmbinarea cu conectori cu pini dintre grindă și stâlpi. Un exemplu de ansamblu testat se prezintă în figura 6.3(d). S-au pregătit seturi de câte patru ansamble individuale pentru fiecare configurație de testare, în vederea determinării efectelor jocurilor existente în conexiune (vezi penultima coloană din Tabelul 6.1), rezultând în total 12 ansamble pentru testare. S-a pregătit de asemenea câte un set de șase ansamble din fiecare tip de ansamblu grindă-conector-coloană (vezi ultima coloană din Tabelul 6.1), pentru testul de încovoiere, pentru a determina rigiditatea la rotire a conexiunii respective.

6.2.2. Metoda de lucru pentru testele de încovoiere realizate pentru determinarea efectelor jocurilor existente în conexiunea dintre grindă şi stâlp

Seturile de ansamble diferite, de tipul grindă-conector-coloană, au fost supuse încercărilor de încovoiere şi testelor pentru determinarea rotirii conectorului până la anularea jocurilor din conexiunea dintre grindă şi stâlp, realizată cu conectori cu pini, conform standardului european EN 15512 (2020). Configuraţia încercării experimentale se prezintă în figura 6.4 şi este aceeaşi atât pentru testul de încovoiere, cât şi pentru cel utilizat pentru determinarea efectelor jocurilor existente în îmbinarea dintre grindă şi coloană, conform standardului european EN 15512 (2020). Schema de încărcare pentru acest stand experimental este aceeaşi cu cea prezentată în figura 5.6(a) din capitolul 5. În figura 6.4 se prezintă o fotografie a standului, realizată în timpul încercării unui ansamblu grindă-conector-stâlp. Se menţionează din nou că acest stand specializat pentru încercarea la încovoiere, pe care s-au realizat toate testele a căror rezultate sunt prezentate în acest capitol, se află în Laboratorul de încercări mecanice din cadrul companiei SC Dexion Storage Solutions SRL (Râşnov, Romania). Autorul tezei de doctorat a proiectat şi realizat acest stand experimental în cadrul companiei.

În primul rând, testul de încovoiere pentru fiecare tip de ansamblu grindă-conector-coloană s-a realizat pentru a determina momentul de proiectare denumit M_{Rd} şi rigiditatea la rotire k_m . Testul de încovoiere pentru ansamblul de tipul grindă-conector-coloană şi metoda de obţinere atât a momentului de proiectare M_{Rd} , cât şi a rigidităţii la rotire k_m , sunt descrise în capitolul anterior al acestei lucrări, conform standardului european EN 15512 (2020). Se menţionează că pentru determinarea rotirii conectorului, măsurată până la anularea jocurilor existente în conexiunea dintre grindă şi stâlp, sistemul de încărcare trebuie să permită aplicarea forţei de încărcare în ambele sensuri, adică atât de sus în jos, cât şi de jos în sus (fig. 6.4a), astfel încât să se poată aplica momentul de încovoiere în ambele sensuri.



Figura 6.4. Fotografia standului pentru testul de încovoiere şi pentru testul pentru determinarea rotirii conectorului până la anularea jocurilor, conform standardului european EN 15512 (2020): (a) schemă a standului de testare; (b) fotografie a standului de testare (Dumbrava şi Cerbu, 2022a).

Atât pentru testele de încovoiere realizate pentru determinarea rigidităţii la rotire a conexiunii dintre grindă şi stâlp, cât şi pentru realizarea testelor în vederea determinării rotirii conectorului până la anularea jocurilor, este necesară trasarea curbei moment-rotire ($M - \theta$). Având în vedere notaţiile prezentate în figura 5.6(a), momentul de încovoiere M_i care se dezvoltă la nivelul conectorului de la

capătul grinzii, precum şi rotirea θ a conectorului, exprimată în radiani, se calculează folosind relaţia (6.1) şi respectiv, relaţia (6.2).

$$M_i = bF, \quad (6.1)$$

$$\theta = (d_1 - d_2)/h. \quad (6.2)$$

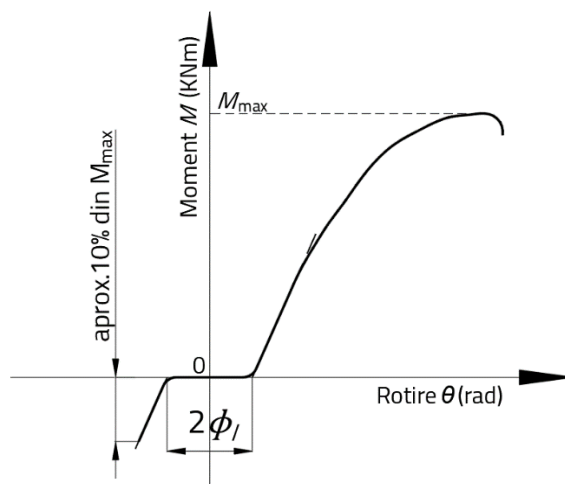


Figura 6.5. Curba moment-rotire tipică, obținută în testul de încovoiere pentru determinarea efectelor jocurilor din conexiunea dintre grindă şi stâlp (Dumbrava şi Cerbu, 2022a).

În încercările realizate pentru studiul efectelor jocurilor din conexiune, forţa F (fig. 6.4a) s-a aplicat treptat până când momentul care se dezvoltă la nivelul conectorului, a ajuns la o valoare care este egală cu aproximativ 10 % din momentul de proiectare, notat cu M_{Rd} şi calculat cu relaţia (5.12) din capitolul 5. Mai departe, s-a redus forţa de încărcare şi apoi, s-a inversat sensul acesteia, până când valoarea momentului a ajuns să fie egală cu aproximativ 10 % din momentul de proiectare M_{Rd} .

Dublul unghiului de rotire al conectorului, până la anularea jocurilor dintre pinii conectorului şi perforaţiile stâlpului, notat cu $2\phi_l$, se măsoară pentru fiecare test prin extrapolarea părţilor liniare ale curbei moment-rotire către origine pentru a găsi punctele lor de intersecţie cu abscisa (axa rotirii), aşa cum se prezintă în figura 6.5. Diferenţa dintre abscisele corespunzătoare celor două puncte de intersecţie, obţinute în acest mod, este egală cu dublul rotirii ϕ_l a conectorului din îmbinarea dintre grindă şi stâlp, rotire care corespunde momentului în care jocurile s-au anulat.

Toate curbele moment-rotire ($M - \theta$) care s-au obţinut pentru ansamblele de tipul grindă-conector-stâlp, implicate în această cercetare, sunt raportate ca rezultate. Studiul prezintă de asemenea următoarele date obţinute prin prelucrarea datelor experimentale: rotirea ϕ_l a conectorului, măsurată în momentul anulării jocurilor din conexiunea dintre grindă şi stâlp, momentul de proiectare M_{Rd} şi rigiditatea la rotire k_m .

6.3. Rezultatele experimentale

În figura 6.8 se prezintă curbele moment-rotire ($M_n - \theta_n$) înregistrate în testele realizate pentru studiul efectelor jocurilor din conexiuni dintre grindă şi stâlpi, cu conectori cu pini, pentru următoarele ansamble de tipul grindă-conector-stâlp: O-I-5L; O-II-5L; O-III-5L. Aceste curbe s-au corectat utilizând relaţiile (5.5) şi (5.8) din capitolul 5.

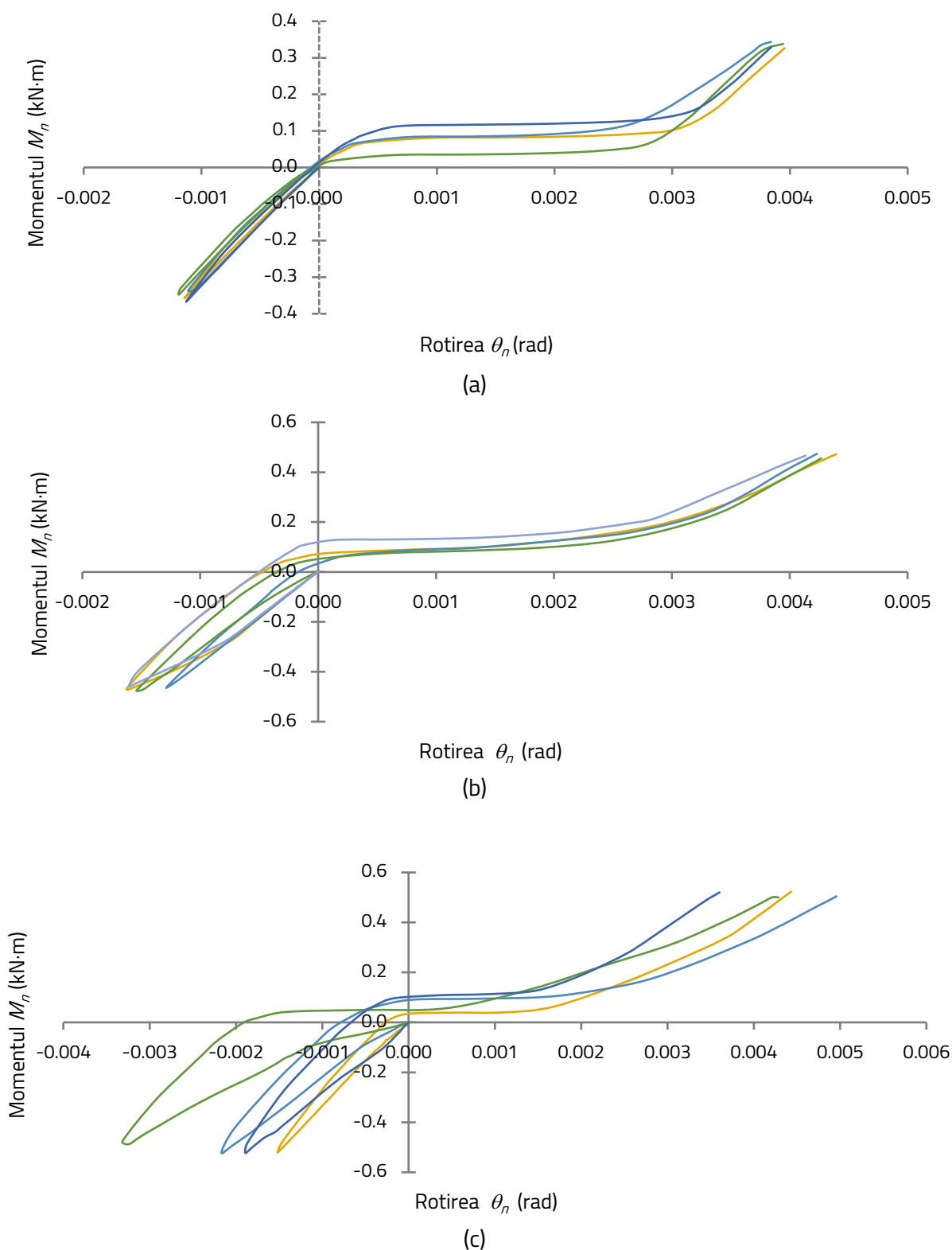


Figura 6.8. Curbele moment-rotire ($M_n - \theta_n$) înregistrate în testele efectuate pentru studiul efectelor jocurilor din conexiuni, pentru următoarele ansamble de tipul grindă-conector-stâlp: (a) 0-I-5L; (b) 0-II-5L; (c) 0-III-5L (Dumbrava și Cerbu, 2022a).

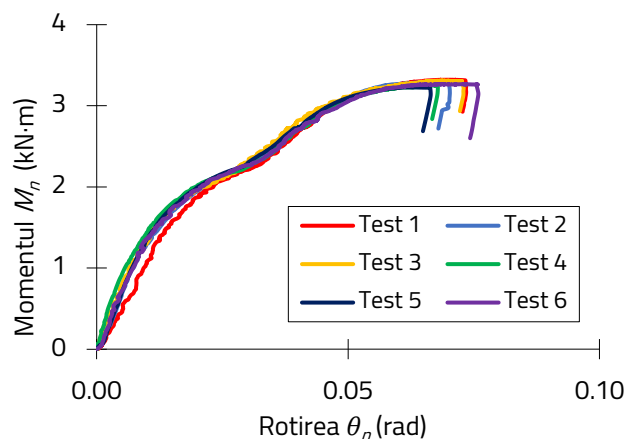


Figura 6.9. Curbele moment-rotire ($M_n - \theta_n$) înregistrate în testele de încovoiere pentru ansamblul grindă-conector-stâlp de tipul O-I-5T (Dumbrava și Cerbu, 2022a).

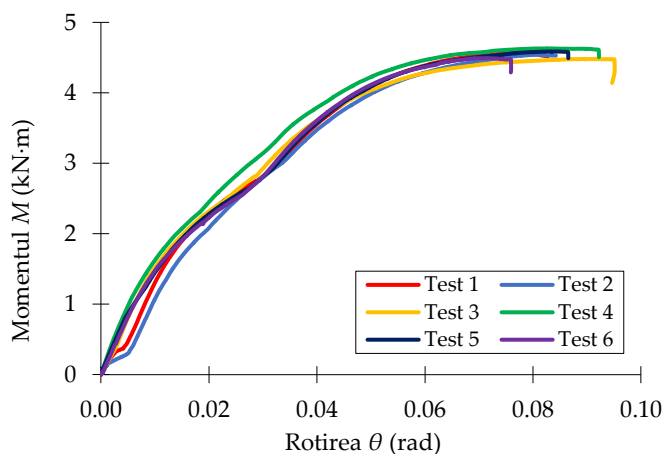


Figura 6.10. Curbele moment-rotire ($M_n - \theta_n$) înregistrate în testele de încovoiere pentru ansamblul grindă-conector-stâlp de tipul O-II-5T (Dumbrava și Cerbu, 2022a).

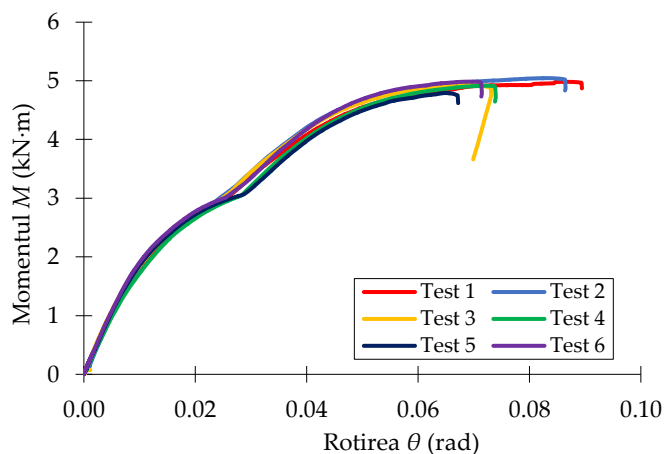


Figura 6.11. Curbele moment-rotire ($M_n - \theta_n$) înregistrate în testele de încovoiere pentru ansamblul grindă-conector-stâlp de tipul O-III-5T (Dumbrava și Cerbu, 2022a).

Curbele moment-rotire ($M - \theta$) înregistrate în testele de încovoiere ale celor trei ansamble grindă-conector-stâlp care au fost investigate (O-I-5L, O-II-5L, O-III-5L), se prezintă în figura 6.9, în figura 6.10 și respectiv, în figura 6.11.

Rezultatele experimentale referitoare la rotirea Φ_l a conectorului până la anularea jocurilor, momentul de proiectare M_{Rd} şi rigiditatea la rotire k_m , corespunzătoare ansamblelor de tipul grindă-conector-stâlp implicate în această cercetare, se sintetizează în tabelul 6.3.

Tabel 6.3. Rezultatele obținute în testele pentru studiul efectelor jocurilor din conexiunile dintre grindă şi stâlp, precum şi în testele de încovoiere pentru toate ansamblele implicate în cercetare (Dumbrava şi Cerbu, 2022a).

Codul ansamblări lor	Rotirea până la anularea jocului			Momentul de proiectare		Rigiditatea la rotire	
	Φ_{li} (rad)	Φ_l (rad)	Stdev (rad)	M_{Rd} (kN·m)	Stdev (kN·m)	k_m (kN·m/ rad)	Stdev (kN·m/ rad)
O-I-5T	0,00139	0,00133	0,000124	2,91	0,035	72	10,029
	0,00140						
	0,00114						
	0,00137						
O-II-5T	0,00115	0,00116	0,000171	4,02	0,058	96	4,118
	0,00126						
	0,00130						
	0,00092						
O-III-5T	0,00075	0,00080	0,000104	4,32	0,086	114	4,425
	0,00093						
	0,00083						
	0,00069						

6.4. Efectele jocurilor din conexiunea grindă-stâlp

Pentru a evalua impactul jocurilor din conexiunile cu conectori cu pini între grinzi şi stâlpi, sunt calculate săgeata maximă v_{max} şi momentul de încovoiere M_{mij} care apare la mijlocul grinzii, în contextul sistemelor de depozitare cu rafturi pentru paleţi. Studiul se bazează pe cazul de testare prezentat în figura 5.18, în care raftul este format din două grinzi de 2,7 m care suportă o încărcare maximă de 15.000 N (corespunzătoare la trei paleţi). Presupunând că fiecare grindă poartă o forţă uniform distribuită de 7.500 N pe o lungime de 2,7 m, forţa este distribuită uniform la 2,78 N/mm.

Studiul analizează efectele jocurilor în toate tipurile de conexiuni, cu rigiditatea la rotire k_m prezentată în tabelele 6.2 şi 6.3. Valorile momentelor de inerţie pentru grinzi sunt preluate din documentaţia tehnică a producătorului. Rotirea Φ_l a conectorului, în momentul anulării jocurilor, este considerată constantă pentru ansamblele care combină acelaşi tip de stâlp şi acelaşi tip de conector (4 pini sau 5 pini). În cercetare s-a investigat în special cazul critic al conexiunilor cu conectori cu 5 pini.

Rezultatele privind rotirea Φ_l au fost extinse şi aplicate pentru toate ansamblele de tip grindă-conector-stâlp prezentate în tabelul 6.2, cu valori specificate în tabelul 6.4. Calculul momentului de încovoiere M_{mij} şi al săgeţii maxime v_{max} s-a realizat folosind relaţiile corespunzătoare, luând în considerare efectele jocurilor din conexiuni. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.4, comparativ cu cele calculate fără efectele jocurilor.

Tabel 6.4. Efectele jocurilor asupra momentului de încovoiere și asupra săgeții maxime la mijlocul grinzii, pentru ansamblurile stâlp-conector-grindă implicate (Dumbrava și Cerbu, 2022a).

Codul de identificare al ansamblelor	Rotirea Φ_l (rad)	Considerând efectele jocurilor din conexiuni		Fără considerarea efectelor jocurilor		$COR_{M_{mij}}$ (%)	$COR_{v_{max}}$ (%)
		Momentul la mij. grinzii $M_{mij,t}$ (kN·m)	Săgeata max. la mij. grinzii $v_{max,t}$ (mm)	Momentul la mij. grinzii M_{mij} (kN·m)	Săgeata max. la mij. grinzii v_{max} (mm)		
O-I-5T	0,00133	3,245	2,83	3,163	2,709	2,59	4,47
O-II-5T	0,00116	3,168	2,753	3,076	2,618	2,99	5,16
O-III-5T	0,00080	3,089	2,662	3,016	2,555	2,42	4,19
A-I-4T	0,00133	2,794	12,383	2,758	12,104	1,31	2,31
A-I-5T		2,692	11,831	2,651	11,511	1,55	2,78
A-II-4T	0,00116	2,753	12,153	2,72	11,897	1,21	2,15
A-II-5T		2,441	10,45	2,394	10,085	1,96	3,62
A-III-4T	0,00080	2,709	11,884	2,685	11,7	0,89	1,57
A-III-5T		2,419	10,297	2,387	10,043	1,34	2,53
B-I-4T	0,00133	2,947	10,325	2,911	10,106	1,24	2,17
B-I-5T		2,735	9,429	2,684	9,122	1,90	3,37
B-II-4T	0,00116	2,744	9,455	2,7	9,193	1,63	2,85
B-II-5T		2,522	8,515	2,465	8,174	2,31	4,17
B-III-4T	0,00080	2,774	9,561	2,746	9,39	1,02	1,82
B-III-5T		2,41	8,01	2,368	7,752	1,77	3,33
C-I-4T	0,00133	2,968	8,321	2,923	8,106	1,54	2,65
C-I-5T		2,715	7,478	2,649	7,158	2,49	4,47
C-II-4T	0,00116	2,887	8,043	2,843	7,83	1,55	2,72
C-II-5T		2,668	7,306	2,607	7,012	2,34	4,19
C-III-4T	0,00080	2,79	7,693	2,755	7,524	1,27	2,25
C-III-5T		2,479	6,64	2,426	6,396	2,18	3,81

6.5. Concluzii

Acest studiu analizează rezultatele experimentale privind rotirea Φ_l a conectorului până la anularea jocurilor, conform standardului european EN 15512 (2020), pentru diferite ansamble grindă-conector-stâlp. De asemenea, evaluarea efectelor jocurilor în conexiuni se axează pe impactul acestora asupra săgeții maxime a grinzilor și asupra momentului de încovoiere la mijlocul grinzilor utilizate în sistemele de rafturi pentru paleți. Detalii complete despre aceste aspecte sunt prezentate în teza de doctorat completă.

Rezultatele experimentale arată că, pentru cazul studiat, corecțiile maxime pentru calculul momentului de încovoiere M_{mij} și săgeții maxime v_{max} sunt de 2,99% și respectiv 5,16%, comparativ cu situația în care efectele jocurilor sunt neglijate. Interpretarea grafică evidențiază că aceste corecții sunt mai

semnificative atunci când peretele stâlpului este mai subţire. În plus, raportul între săgeata maximă v_{max} calculată luând în considerare efectele jocurilor şi săgeata maximă fără aceste efecte este mai mare pentru conectorul cu cinci pini (între 1,025 şi 1,052) comparativ cu conectorul cu patru pini (între 1,016 şi 1,029).

7. CERCETĂRI PRIVIND COMPRESIUNEA STÂLPILOR DIN STRUCTURILE METALICE PENTRU DEPOZITARE

7.1. Cercetări experimentale privind flambajul local al stâlpilor din structurile pentru depozitare

Acest capitol abordează cercetarea privind pierderea stabilităţii la coloanele scurte, perforate, din oţel, cu secţiuni în formă de Omega, utilizate în sistemele de depozitare pentru paleţi. Principalul obiectiv este determinarea forţei critice de flambaj şi a ariei efective pentru aceste coloane supuse forţelor de compresiune, precum şi analiza efectelor imperfecţiunilor în modelele numerice cu elemente finite asupra acurateţii rezultatelor comparativ cu cele experimentale.

Cercetarea implică parcauregerea următoarelor etape:

- Determinarea forţelor critice de flambaj pentru cele 15 tipuri de coloane scurte perforate.
- Analiza neliniară prin analiza cu elemente finite a pierderii stabilităţii pentru aceleaşi coloane, cu imperfecţiuni iniţiale de firetite magnitudine.
- Compararea rezultatelor obţinute prin simulări numerice cu cele experimentale pentru validarea modelului numeric.

7.1.1. Geometria stâlpilor testaţi

În această capitol s-au studiat 15 profiluri diferite, fabricate din oţel, cu secţiuni transversale în formă de litera Omega, utilizate pentru fabricarea stâlpilor din sistemele de depozitare, cu rafturi pentru paleţi. Aceste profiluri care se utilizează pentru stâlpi, au fost supuse încercărilor de compresiune. Secţiunea transversală, precum şi vederea frontală, pentru fiecare formă de profil testat se prezintă în figura 7.1. Fiecare tip de profil este codificat cu o literă majusculă.

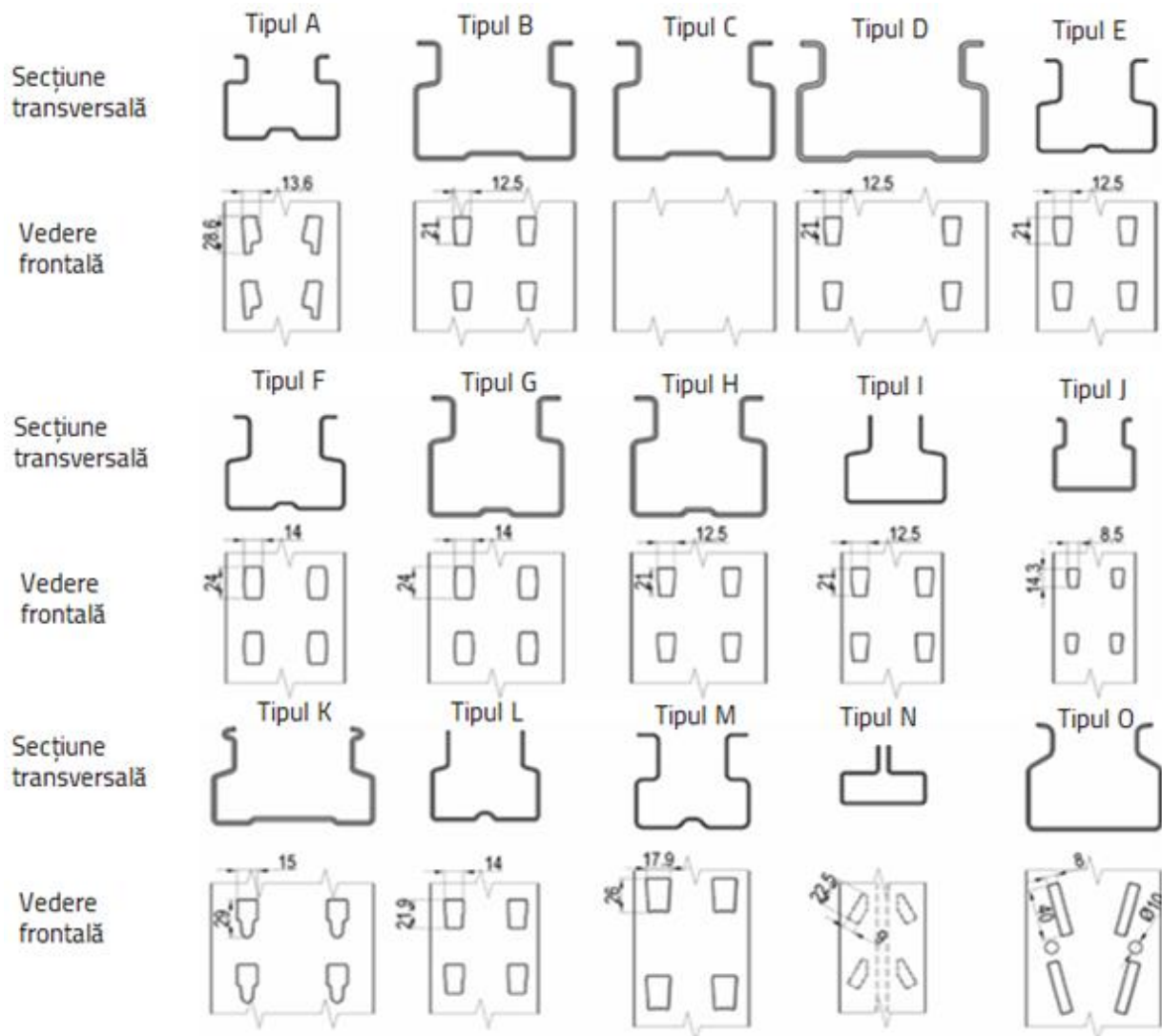


Figura 7.1. Tipurile de stâlpi considerați în studiu, având forme diferite ale secțiunilor transversale și ale perforațiilor situate pe partea frontală (Dumbrava și Cerbu, 2024).

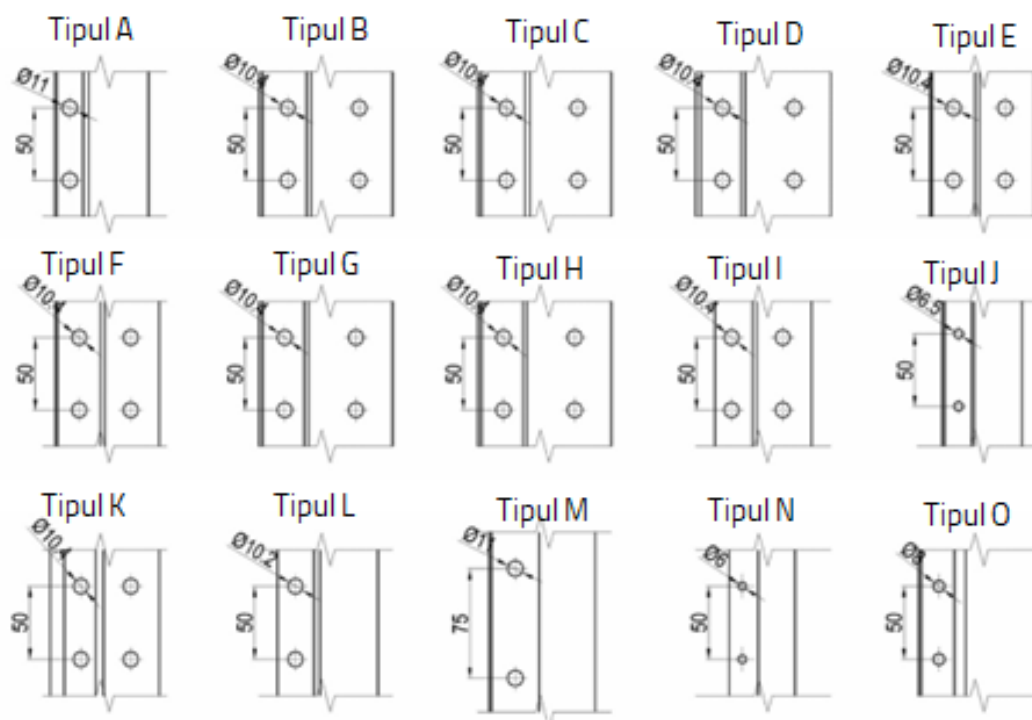


Figura 7.2. Vederea laterală a flanşelor stâlpilor testaţi şi perforaţiile acestora (Dumbrava şi Cerbu, 2024).

Notaţiile utilizate pentru dimensiunile principale ale secţiunii transversale, sunt indicate în figura 5.2, iar valorile de proiectare ale acestor dimensiuni se prezintă în tabelul 7.1 pentru toate tipurile de stâlpi testaţi în cadrul acestor cercetări. Grosimea peretelui secţiunii transversale s-a măsurat pentru fiecare stâlp testat deoarece diferă puţin de cea nominală, din cauza tehnologiei de fabricaţie, iar valoarea medie corespunzătoare este dată în tabelul 7.1. Vederea laterală pentru fiecare tip de stâlp testat este prezentată în figura 7.2 pentru a arăta dimensiunile perforaţiilor situate pe flanşe.

Epruvetele pentru testul de tracţiune au fost decupate din aceeaşi rolă de tablă din oţel din care s-a realizat fiecare profil în formă de Omega prin tehnologii de formare prin deformare plastică la rece. Grosimea măsurată a stâlpului şi tensiunea de curgere obţinută experimental se utilizează în prelucrarea datelor experimentale înregistrate în testul de compresiune a profilurilor, pentru corectarea valorii forţei înregistrate la pierderea stabilităţii stâlpului, conform standardului european EN 15512 (2020).

Numărul de epruvete testate la compresiune pentru fiecare tip de stâlp, se prezintă în penultima coloană din tabelul 7.1, iar acest număr respectă standardul european EN 15512: 2020 (2020), conform căruia numărul minim de probe trebuie să fie egal cu trei. Dimensiunile secţiunilor profilurilor au fost măsurate sau s-au utilizat fişele tehnice (**b, 2019).

Tabel 7.1. Valorile dimensiunilor principale ale secţiunilor transversale, de forma literei Omega, ale stâlpilor testaţi şi tensiunea de curgere corespunzătoare materialului acestora (Dumbrava şi Cerbu, 2024).

Nr. crt.	Tipul de coloană	Dimensiunile nominale ale secţiunii transversale			Grosimea măsurată t_m (mm)	Tensiunea de curgere		Numărul de epruvete testate	Coeficientul k_s ***
		Laţime W^* (mm)	Adâncime D^* (mm)	Grosime t^* (mm)		Nominală σ_{cn} (MPa)	Măsurată σ_c^{**} (MPa)		
1	Tipul A	85,0	64,8	1,8	1,78	355	384,4	9	1,95
2	Tipul B	119,0	91,6	2,5	2,51	420	441,3	26	1,74
3	Tipul C	119,0	91,6	2,5	2,53	420	441,0	5	2,33
4	Tipul D	88,0	71,4	1,5	3,47	420	425,9	30	1,73
5	Tipul E	140,5	92,6	3,5	1,53	420	520,0	20	1,76
6	Tipul F	88,0	71,4	1,5	1,51	420	407,5	10	1,92
7	Tipul G	99,5	91,6	2,5	2,53	420	534,1	11	1,89
8	Tipul H	99,5	91,6	2,5	2,53	420	471,7	35	1,72
9	Tipul I	74,5	66,3	1,5	1,51	420	516,8	3	3,37
10	Tipul J	60,5	55,0	2,0	2,03	350	353,0	7	2,08
11	Tipul K	120,0	75,0	2,5	2,60	355	430,8	5	2,33
12	Tipul L	80,0	68,8	1,8	1,80	280	288,7	8	2,00
13	Tipul M	84,8	72,8	1,5	1,49	420	427,2	10	1,92
14	Tipul N	63,0	45,0	1,5	1,50	355	380,0	7	2,08
15	Tipul O	100,0	82,5	2,0	2,00	355	348,2	8	2,00

*Semnificaţia dimensiunilor secţiunilor transversale ale stâlpilor se prezintă în figura 5.2 din capitolul 5;

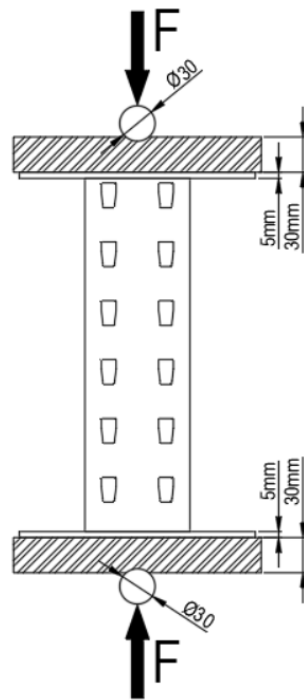
** Valorile au fost obţinute prin încercările de tracţiune realizate cu maşina INSTRON 3369.

*** k_s este un coeficient dat în standardul european EN 15512 (2020), ales în funcţie de numărul de epruvete testate în setul respectiv.

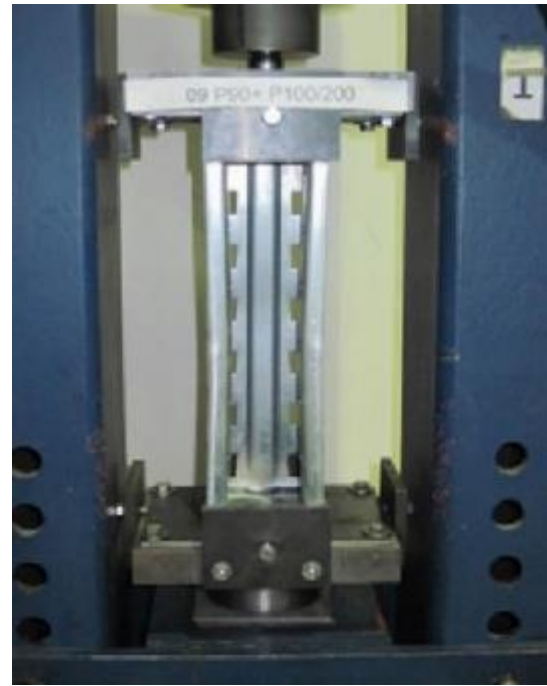
7.1.2. Metoda de încercare pentru determinarea forţei critice de pierdere a stabilităţii stâlpilor

Pentru determinarea ariei efective a profilurilor în formă de Omega, s-au efectuat teste de compresiune pe coloane scurte conform standardului EN 15512 (2020). S-a măsurat forţa de pierdere a stabilităţii pentru fiecare profil, iar valoarea medie a fost utilizată pentru calculul ariei efective. Modurile de cedare şi efectele diferitelor dimensiuni şi forme ale perforaţiilor asupra forţei de flambaj au fost, de asemenea, analizate. Epruvetele pentru teste au fost pregătite conform standardului, având o lungime minimă de trei ori lăţimea profilului şi incluzând cel puţin cinci seturi de perforaţii. Lungimea fiecărui profil a fost verificată pentru a avea un coeficient de zvelteţe relativ mai mic de 0,2, conform EN 15512 (2020).

Schema de încărcare pentru testul de compresiune se prezintă în figura 7.3(a), conform standardului european EN 15512 (2020), în timp ce în figura 7.3(b) se prezintă o fotografie a unei coloane fixate pe dispozitiv în timpul testului de compresiune.



(a)



(b)

Figura 7.3. Configurația testului de compresiune, utilizat pentru a determina forța de pierdere a stabilității pentru coloanele scurte, cu secțiune transversală în formă de Omega: (a) schema de încărcare; (b) fotografia unei coloane fixate la ambele capete pe bancul de testare (Dumbrava și Cerbu, 2024).

7.1.3. Rezultatele încercării la compresiune a stâlpilor

În prima fază a cercetării, s-au realizat teste preliminare pentru a identifica poziția optimă de aplicare a forței axiale pe stâlpi pentru maximizarea forței de cedare la pierderea stabilității. Inițial, forța axială a fost aplicată la centrul de greutate teoretic al profilului fără perforații, dar ulterior s-au ajustat aplicația forței cu 1-2 mm pe axa de simetrie pentru a reflecta perforațiile. După aceste teste preliminare, s-au efectuat teste suplimentare pe numărul de coloane specificat în tabelul 7.1, determinându-se forța de cedare pentru fiecare tip de profil. Valorile medii ale forțelor critice de flambaj, împreună cu deviația standard, sunt prezentate în tabelul 7.2. Aceste valori au fost corectate conform standardului EN 15512 (2020) pentru a obține forța critică de flambaj corectată. În final, aria efectivă a fost calculată pentru fiecare tip de profil și rezultatele sunt prezentate în tabelul 7.2.

Tabel 7.2. Resultatele obținute experimental în testele de compresiune (Dumbrava și Cerbu, 2024).

Nr. crt.	Tipul de coloană	Forța medie experimentală de cedare $F_{exp\ med}$ (kN)	Stdev s (kN)	Coeficientul de corecție k_s^*	Forța experimentală de cedare F_{exp}^{**} (kN)	Aria efectivă $A_{ef\ exp}$ (mm ²)
1	Tipul A	124,3	1,53	1,95	121,3	341,7
2	Tipul B	291,3	3,41	1,74	285,4	679,5
3	Tipul C	334,7	2,04	2,33	329,9	785,5
4	Tipul D	447,6	4,39	1,73	440,0	1047,6
5	Tipul E	121,4	1,94	1,76	117,9	280,7
6	Tipul F	117,9	1,97	1,92	114,1	271,7
7	Tipul G	253,9	3,23	1,89	247,8	590,0
8	Tipul H	259,5	2,47	1,72	255,3	607,9
9	Tipul I	89,1	1,20	3,37	85,0	202,4
10	Tipul J	98,4	1,90	2,08	94,4	269,7
11	Tipul K	204,9	2,91	2,33	198,2	558,3
12	Tipul L	97,4	0,93	2,00	95,5	341,1
13	Tipul M	139,1	1,61	1,92	136,0	323,8
14	Tipul N	82,7	1,15	2,08	80,3	226,2
15	Tipul O	156,1	1,38	2,00	153,3	431,8

* Coeficientul de corecție a fost stabilit conform standardului european EN 15512 (2020).

** Această valoare a fost corectată conform standardului european EN 15512 (2020).

7.2. Simularea numerică a stărilor de tensiune și deformații din stâlpii sistemelor de depozitare, solicițări la compresiune

Simularea pierderii stabilității profilurilor a fost realizată cu software-ul RFEM 5.28 folosind modelarea cu elemente finite. Stâlpii au fost modelați cu elemente shell, iar plăcile de capăt au fost reprezentate cu elemente solide (fig. 7.7). Conexiunile sudate au fost simulate prin contact strâns între secțiunea superioară a stâlpului și plăcile de capăt. Articulațiile sferice au fost utilizate pentru a restricționa deplasările, exceptând deplasarea axială. Modelul a inclus comportamentul neliniar al oțelului, folosind o schemă biliniară pentru curba de tensiune-deformație, cu o zonă elastică limitată la tensiunea de curgere și un modul de plasticitate de 2,1 GPa. Analiza a considerat și neliniaritățile geometrice.

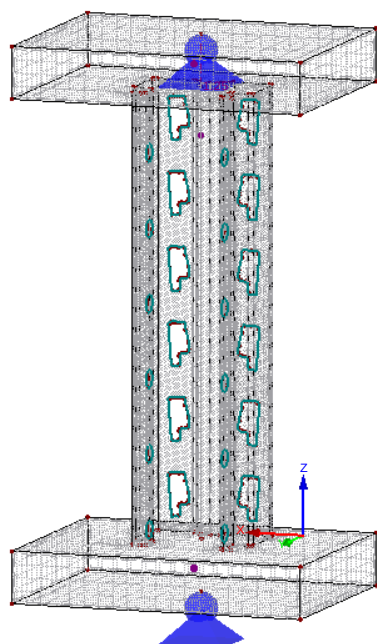


Figura 7.7. Modelul cu elemente finite utilizat pentru simularea numerică a pierderii stabilității stâlpilor (Dumbrava și Cerbu, 2024).

În modelul numeric, imperfecțiunile geometrice au fost introduse conform recomandărilor standardului EN 1993-1-5 (2007): (i) pentru flambaj local, dimensiunea imperfecțiunii a fost lățimea părții frontale a stâlpului împărțită la 200; (ii) pentru flambaj distorsional, dimensiunea a fost dimensiunea secțiunii transversale împărțită la 50. Alte două imperfecțiuni, de 15% și 5% din grosimea nominală a secțiunii, au fost de asemenea considerate. Cele patru tipuri de imperfecțiuni folosite în analiză sunt: $\text{Imp_}W/200$, $\text{Imp_}D/50$, $\text{Imp_}0.15t$, și $\text{Imp_}0.05t$, iar valorile acestora sunt prezentate în tabelul 7.3.

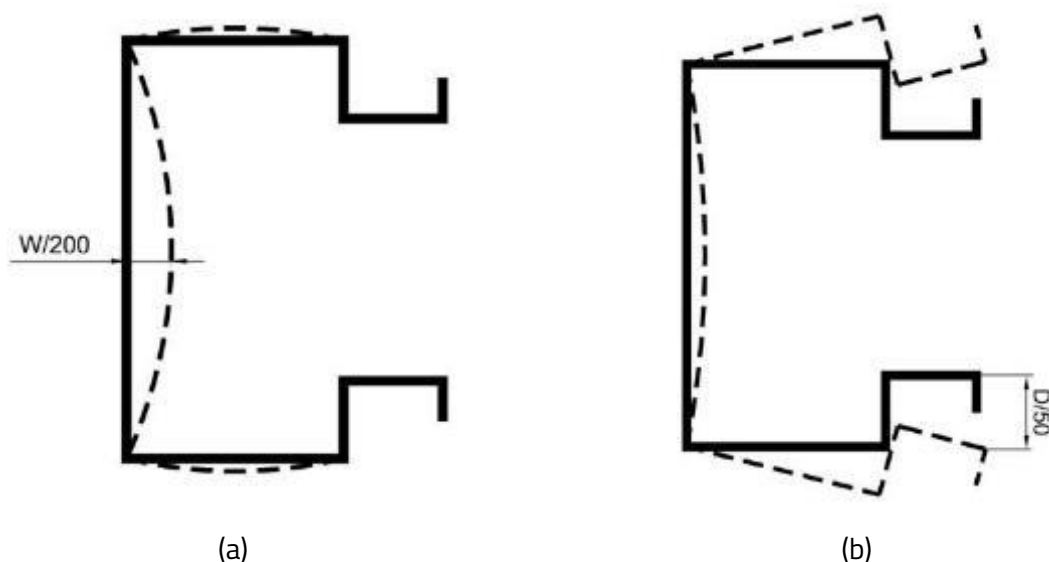


Figura 7.8. Imperfecțiunile geometrice introduse în modelul numeric pentru modul de flambaj corespunzător: (a) flambajului local; (b) flambajului distorsional (Dumbrava și Cerbu, 2024).

Tabel 7.3. Dimensiunile imperfecţiunilor geometrice considerate pentru modelele numerice utilizate în analiza pierderii stabilităţii stâlpului (Dumbrava şi Cerbu, 2024).

Nr. crt.	Tipul de coloană	Dimensiunea imperfecţiunilor geometrice (mm)			
		Imp_W/200*	Imp_D/50**	Imp_0.15t***	Imp_0.05t***
1	Tipul A	0,4250	1,2960	0,2625	0,0875
2	Tipul B	0,5950	1,8320	0,3750	0,1250
3	Tipul C	0,5950	1,8320	0,3750	0,1250
4	Tipul D	0,7025	1,8520	0,5250	0,1750
5	Tipul E	0,4400	1,4280	0,2250	0,0750
6	Tipul F	0,4400	1,4280	0,2250	0,0750
7	Tipul G	0,4975	1,8320	0,3750	0,1250
8	Tipul H	0,4975	1,8320	0,3750	0,1250
9	Tipul I	0,3725	1,3260	0,2250	0,0750
10	Tipul J	0,3025	1,1000	0,3000	0,1000
11	Tipul K	0,6000	1,5000	0,3750	0,1250
12	Tipul L	0,4000	1,3760	0,2625	0,0875
13	Tipul M	0,4240	1,4560	0,2250	0,0750
14	Tipul N	0,3150	0,9000	0,2250	0,0750
15	Tipul O	0,5000	1,6500	0,3000	0,1000

* Imperfecţiunea este introdusă pentru modulul de flambaj corespunzător flambajului local.

** Imperfecţiunea este introdusă pentru modulul de flambaj corespunzător flambajului distorsional.

*** Imperfecţiunea este introdusă pentru primul mod de flambaj.

7.3. Validarea modelului numeric

În a doua etapă a analizei de flambaj, s-au luat în considerare imperfecţiunile geometrice prezentate în tabelul 7.3. Conform standardului EN 1993-1-5, imperfecţiunile codificate ca Imp_W/200 au fost aplicate pentru flambajul local, iar cele codificate ca Imp_D/50 pentru flambajul distorsional. Imperfecţiunile Imp_0.15t şi Imp_0.05t au fost utilizate pentru primul mod de flambaj al tuturor profilurilor analizate. Valorile forţelor de flambaj obţinute prin analiza cu elemente finite (FEA) sunt prezentate în tabelul 7.5. Eroarea calculată faţă de valorile medii experimentale pentru fiecare profil şi tip de imperfecţiune geometrică este, de asemenea, prezentată în tabelul 7.5.

Tabel 7.5. Rezultatele obținute cu analiza cu elemente finite (FEA) pentru modelele numerice ale stâlpilor, considerând imperfecțiunile (Dumbrava și Cerbu, 2024).

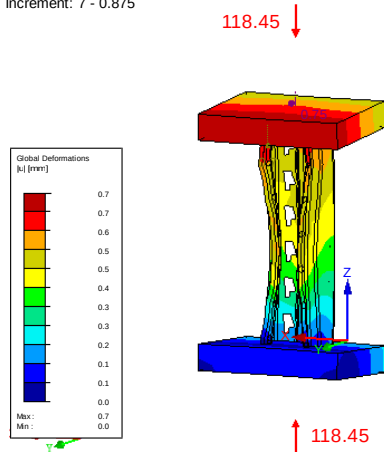
Nr.	Tipul de coloană	Forța de critică de flambaj din modelare F_{FEA}				Forța de fambj din experiment $F_{exp\ ave}$ (kN)	Eroarea (%)			
		(kN)								
		Imp_W/200	Imp_D/50	Imp_0.15t	Imp_0.05t		Imp_W/200	Imp_D/50	Imp_0.15t	Imp_0.05t
1	Tipul A	115,92	106,68	116,76	118,45	124,3	7,23	16,52	6,46	4,94
2	Tipul B	273,40	261,45	281,32	286,53	291,3	6,55	11,42	3,55	1,66
3	Tipul C	306,69	281,91	304,43	309,87	334,7	9,13	18,73	9,94	8,01
4	Tipul D	407,54	379,54	413,08	417,10	447,6	9,83	17,93	8,36	7,31
5	Tipul E	112,03	108,13	115,96	116,56	117,7	5,06	8,85	1,50	0,98
6	Tipul F	115,01	107,34	115,30	115,27	117,9	2,51	9,84	2,25	2,28
7	Tipul G	262,55	232,16	263,65	264,49	259,8	1,05	11,91	1,46	1,77
8	Tipul H	262,28	239,22	263,47	265,19	259,5	1,06	8,48	1,51	2,15
9	Tipul I	89,65	87,08	90,15	90,53	89,1	0,61	2,32	1,16	1,58
10	Tipul J	96,13	92,05	96,44	100,96	98,4	2,36	6,90	2,03	2,54
11	Tipul K	190,38	185,58	200,55	203,79	204,9	7,63	10,41	2,17	0,54
12	Tipul L	88,77	82,69	89,15	89,22	97,4	9,72	17,79	9,25	9,17
13	Tipul M	132,27	133,47	132,32	134,58	139,1	5,16	4,22	5,12	3,36
14	Tipul N	77,16	75,68	77,34	77,80	82,7	7,18	9,28	6,93	6,30
15	Tipul O	147,34	152,60	149,81	154,55	156,1	5,95	2,29	4,20	1,00
Valoarea medie pentru erori							5,40	10,46	4,39	3,57

Analizând valorile medii ale erorilor (Tabelul 7.5) pentru toate cazurile considerate în ceea ce privește imperfecțiunile geometrice impuse în modelul numeric utilizat pentru simularea pierderii stabilității fiecărui profil implicat în studiu, concluzia este că cea mai mică valoare medie a erorilor corespunde cazului de imperfecțiune codificat cu Imp_0.05t.

Pentru imperfecțiunea codificată ca Imp_0.05t, figura 7.14 ilustrează stările de deformare globală și stările de tensiune conform criteriului Von Mises pentru toate cele patru tipuri de profiluri analizate. Se menționează că figura 7.14 este redată doar parțial în acest Rezumat al tezei de doctorat, rezultatele fiind prezentate doar pentru 4 profiluri din cele 15 profiluri testate (teza prezintă rezultatele pentru toate profilurile). Aceste stări de tensiune și deformare sunt prezentate pentru valoarea maximă a forței de reacțiune înregistrată la pierderea stabilității, corespunzătoare valorilor din tabelul 7.5 pentru imperfecțiunea Imp_0.05t.

În teza sunt prezentate, de asemenea, și analiza statistica detaliată pentru toate cele patru tipuri de imperfecțiuni analizate, indicând care dintre acestea prezintă cele mai mici diferențe față de valorile obținute experimental.

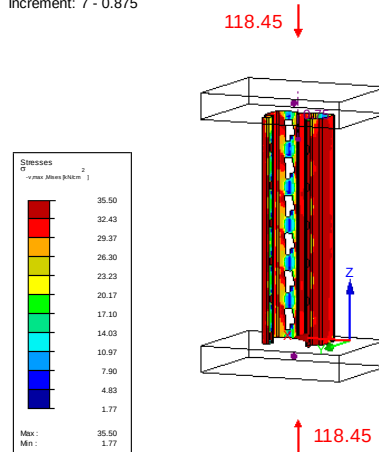
LC2 : Imposed Load__0.75
Loads [mm]
Global Deformations u [mm]
Support Reactions[kN]
Increment: 7 - 0.875



Factor of deformations: 40.00
Max P-Z: 118.45, Min P-Z: -118.45 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: 0.00 kN
Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max u: 0.7, Min u: 0.0 mm

(a1)

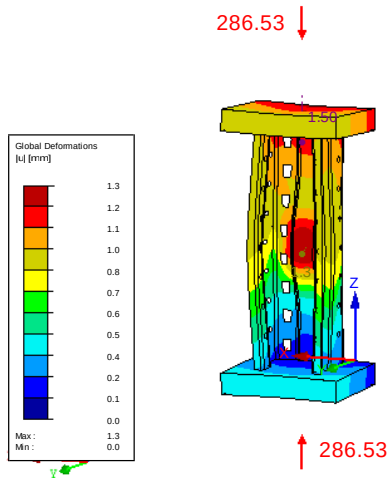
LC2 : Imposed Load__0.75
Loads [mm]
Stresses Sigma-eqv,Mises,max [kN/cm²]
Support Reactions[kN]
Increment: 7 - 0.875



Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: 0.00 kN
Max P-Z: 118.45, Min P-Z: -118.45 kN
Max Sigma-eqv,Mises,max: 35.50, Min Sigma-eqv,Mises,max: 1.77 kN/cm²

(a2)

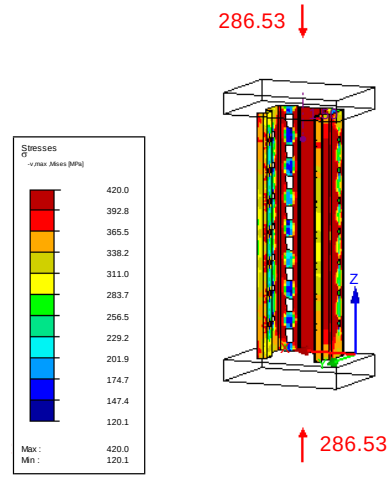
LC2 : Imposed load__1.50mm
Loads [mm]
Global Deformations u [mm]
Support Reactions[kN]
Increment: 7 - 0.875



Factor of deformations: 26.00
Max P-Z: 286.53, Min P-Z: -286.53 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: 0.00 kN
Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max u: 1.3, Min u: 0.0 mm

(b1)

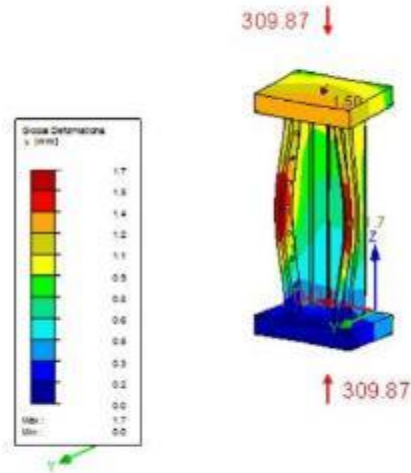
LC2 : Imposed load__1.50mm
Loads [mm]
Stresses Sigma-eqv,Mises,max [MPa]
Support Reactions[kN]
Increment: 7 - 0.875



Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: 0.00 kN
Max P-Z: 286.53, Min P-Z: -286.53 kN
Max Sigma-eqv,Mises,max: 420.0, Min Sigma-eqv,Mises,max: 120.1 MPa

(b2)

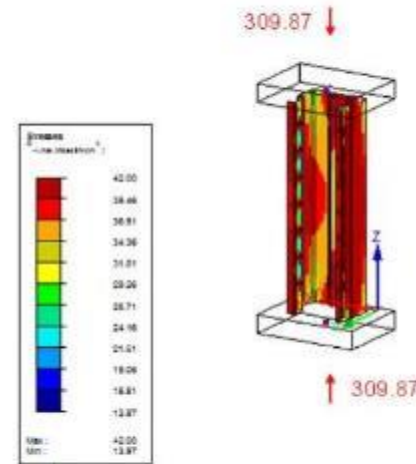
LC2 : Imposed load__1.50mm
Loads [mm]
Global Deformations u [mm]
Support Reactions[kN]
Increment: 14 - 0.875



Factor of deformations: 16.00
Max P-Z: 309.87, Min P-Z: -310.04 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: -0.01 kN
Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max u: 1.7, Min u: 0.0 mm

(c1)

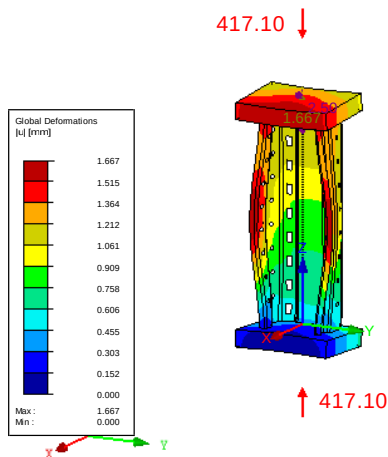
LC2 : Imposed load__1.50mm
Loads [mm]
Stresses Sigma-eqv,Mises,max [kN/cm²]
Support Reactions[kN]
Increment: 14 - 0.875



Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: -0.01 kN
Max P-Z: 309.87, Min P-Z: -310.04 kN
Max Sigma-eqv,Mises,max: 42.00, Min Sigma-eqv,Mises,max: 13.97 kN/cm²

(c2)

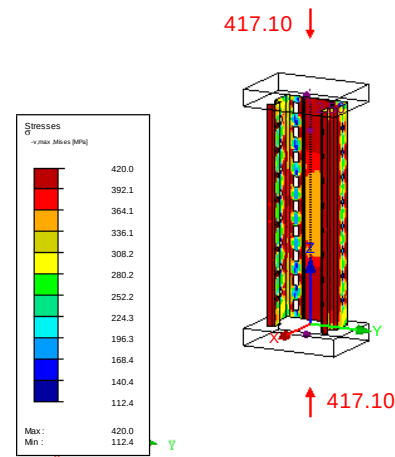
LC3 : Imposed load_2.50mm+Imp 0.05*T
Loads [mm]
Global Deformations u [mm]
Support Reactions[kN]
Increment: 8 - 0.667



Factor of deformations: 18.00
Max P-Z: 417.10, Min P-Z: -417.10 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: 0.00 kN
Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max u: 1.667, Min u: 0.000 mm

(d1)

LC3 : Imposed load_2.50mm+Imp 0.05*T
Loads [mm]
Surfaces Stresses Sigma-eqv,Mises,max [MPa]
Support Reactions[kN]
Increment: 8 - 0.667



Max P-X: 0.00, Min P-X: 0.00 kN
Max P-Y: 0.00, Min P-Y: 0.00 kN
Max P-Z: 417.10, Min P-Z: -417.10 kN
Max Sigma-eqv,Mises,max: 420.0, Min Sigma-eqv,Mises,max: 112.4 MPa

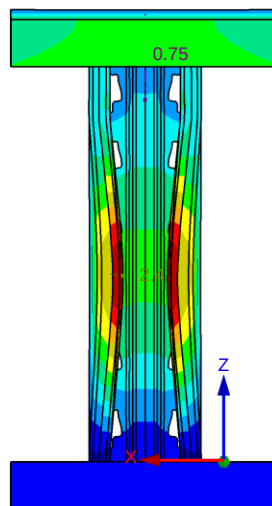
(d2)

Figura 7.14. Distribuțiile deformațiilor globale și a tensiunilor echivalente von Mises pentru forța de pierdere a stabilității, obținute cu FEA, considerând imperfecțiunile geometrice Imp_0.05t pentru profilurile: (a1), (a2) tipul A; (b1), (b2) tipul B; (c1), (c2) tipul C; (d1), (d2) tipul D; (Dumbrava și Cerbu, 2024).

Figura 7.15 compară modurile de cedare observate în testele de compresiune cu cele obținute prin FEA pentru două tipuri de profiluri (A, I). Mai multe cazuri pot fi găsite în teza de doctorat extinsă. Rezultatele arată o mare asemănare între modurile de cedare observate experimental și cele simulate numeric.



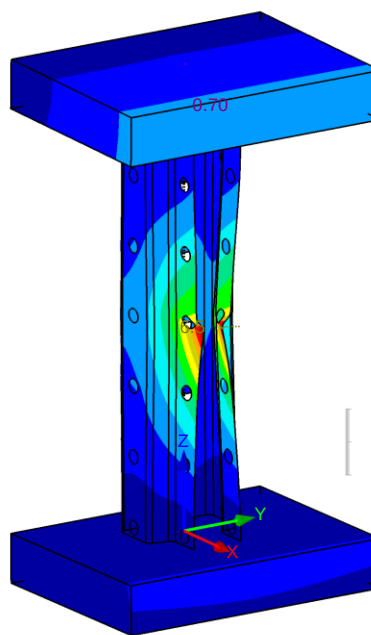
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.15. Comparații dintre modurile de pierdere a stabilității în experiment și cele obținute prin simularea numerică pentru următoarele profiluri de stâlpi: (a, b) stâlpul de tipul A; (c, d) stâlpul de tipul I; (Dumbrava și Cerbu, 2024).

7.4. Concluzii

Valorile forţelor critice de flambaj pentru profilurile testate au fost obţinute prin încercări de compresiune efectuate pe 15 tipuri de profiluri utilizate la fabricarea stâlpilor din sistemele de depozitare din oţel. Aceste încercări au avut scopul de a valida modelul numeric utilizat pentru simularea acestor teste. Fiecare stâlp a fost analizat folosind patru modele numerice cu elemente finite, fiecare având imperfecţiuni geometrice diferite: imperfecţiunea codificată $Imp_W/200$ şi $Imp_D/50$, conform standardului european EN 1993-1-5 (2007), precum şi imperfecţiunile codificate $Imp_0.15t$ şi $Imp_0.05t$, corespunzătoare la 15% şi respectiv 5% din grosimea t a peretelui profilului stâlpului. Detalii complete şi principalele concluzii ale acestor cercetări sunt prezentate în teza de doctorat completă.

În baza concluziilor obţinute din cercetările prezentate în acest capitol, se recomandă utilizarea imperfecţiunilor geometrice de 5% din grosimea profilului în modelele numerice care simulează comportamentul stâlpilor la compresiune. Această abordare va permite obţinerea unor valori precise pentru forţa critică de flambaj, prin analiza cu elemente finite a pierderii de stabilitate a stâlpilor perforaţi cu secţiune de tip Omega, care sunt frecvent utilizaţi în sistemele de depozitare cu rafturi pentru paleţi.

8. CONCLUZIILE GENERALE. CONTRIBUȚIILE PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.

8.1. Concluziile generale

Cercetările prezentate în această teză de doctorat s-au concentrat pe două direcții principale de studiu: (i) încercarea experimentală a conexiunilor cu conectori cu pini, dintre grinzi și stâlpi, utilizate în industria structurilor de depozitare, cu rafturi pentru paleți; (ii) studiul teoretic și experimental privind pierderea stabilității locale sau distorsionale în cazul coloanelor cu secțiunea transversală de tip Omega. În ceea ce privește studiul asupra comportării mecanice a conexiunilor, cercetările s-au extins și asupra influenței jocurilor existente între pinii metalici ai conectorului și perforațiile din stâlpi, asupra unghiului de rotire a conectorului până la anularea jocurilor și apoi, implicit, asupra săgeții maxime a grinzii încărcate, precum și asupra momentului de încovoiere de la capătul grinzii, pentru cazul practic de studiu considerat.

Conexiunile studiate sunt conexiuni semirigide care se utilizează frecvent în sistemele de depozitare, cu rafturi pentru paleți. Pentru cele 15 tipuri de conexiuni dintre grinzi și stâlpi, s-a studiat comportarea mecanică a conectorilor cu pini, fixați la capetele grinzilor asamblate cu stâlpii, analizând influența tipului de conector (cu patru și cinci pini) și a grosimii peretelui profilurilor utilizate pentru stâlpi, asupra rigidității la rotire a conexiunii. În final, s-a analizat și efectul acestor factori asupra capacității portante și asupra săgeții maxime a grinzii, sub acțiunea încărcării mecanice.

Diversitatea celor 15 tipuri de profiluri implicate în cercetările referitoare la pierderea stabilității stâlpilor fabricați din profiluri cu pereți subțiri, cu secțiunea în forma literei Omega, precum și validarea modelelor numerice utilizate, prin comparația rezultatelor obținute prin analiza cu elemente finite cu cele obținute experimental, au condus la concluzii interesante și contribuții personale din punctul de vedere al mărimii imperfecțiunilor geometrice care trebuie considerate în simularea numerică cu elemente finite, a pierderii stabilității stâlpilor fabricați din profilurile având secțiunea în forma literei Omega.

Considerând obiectivele cercetărilor realizate în teza de doctorat, în continuare se evidențiază principalele concluzii ale acestei lucrări.

- Rezultatele din capitolul 5 arată că, în cazul ansamblelor care conțin stâlpii de tipul I, având grosimea profilului de 1,50 mm, utilizarea conectorului cu cinci pini conduce la valori mai mari pentru momentul de proiectare capabil M_{Rd} și pentru rigiditatea la rotire k_m , decât în cazul utilizării conectorilor cu patru pini. În schimb, pentru stâlpii de tip III cu grosime de 2,00 mm, conectorii cu cinci pini au prezentat momente de proiectare ușor mai mici decât cei cu patru pini.
- Pentru ansamblele care conțin conectorii cu cinci pini, rigiditatea la rotire k_m este mai mare cu aproximativ 23,1 %, cu 61 % și cu 77,1 % decât pentru ansamblele care conțin conectori cu patru pini în cazul grinzilor de tipul A, de tipul B și respectiv, de tipul C. În mod similar, pentru ansamblele care conțin conectori cu cinci pini, creșterea momentului de proiectare M_{Rd} este aproximativ egală cu 49,3 %, 21,7 % și 26,5 %, față de valorile obținute pentru ansamblele care conțin conectori cu patru pini în cazul grinzilor de tipul A, de tipul B și respectiv, de tipul C (vezi capitolul 5).

- Se constată că pentru cazul practic de studiu considerat, referitor la grinzile care susţin paletii de pe raft al unei structuri de depozitare, care au lungimea de 2,7 m, pentru care se foloseşte acelaşi tip de conexiune semirigidă la ambele capete, se respectă condiţia de rigiditate conform standardului european EN 15512 (2020), pentru toate tipurile de îmbinări grindă-conector-stâlp implicate în această cercetare (vezi capitolul 5.6).
- Pentru cazul practic de studiu considerat în capitolul 5.6, în cazul utilizării grinzilor de tipul A şi a celor de tipul C, se constată că cele mai bune ansamble sunt A-II-4L şi C-II-4L din punctul de vedere al coeficientului de siguranţă c al conexiunii, calculat ca raportul dintre momentul de proiectare capabil M_{Rd} al conexiunii şi momentul de la capătul grinzii (din conector) calculat luând în considerare rigiditatea la rotire k_m a conexiunilor de la capătul grinzii. Mai mult, aceste tipuri de conexiune conduc la reducerea masei sistemului de depozitare, cu rafturi, atât datorită grosimii mai reduse a profilului stâlpului, cât şi datorită utilizării conectorului cu patru pini. În consecinţă, acest lucru conduce şi la reducerea costurilor de material.
- Pentru acelaşi caz de studiu considerat în capitolul 5.6, s-a remarcat faptul că raportul dintre cel mai mare coeficient de siguranţă şi cel mai mic coeficient de siguranţă este egal cu: 1,68 (adică raportul 4,41/ 2,63) pentru ansamblele care conţin grinda de tipul A; 1,69 (adică raportul 4,57/ 2,70) pentru ansamblele care conţin grinda de tipul B; 1,73 (adică raportul 5,94/ 3,42) pentru ansamblele care conţin grinda de tip C. Concluzia este că, pentru oricare tip de grindă implicat în această cercetare, există o rezervă de aproximativ 70 % în ceea ce priveşte coeficientul de siguranţă c , care depinde de tipul conectorului, de tipul stâlpului folosit şi de tipul grinzii utilizate.
- În capitolul 5.5, s-a arătat că în cazul ansamblelor de tipul grindă-conector-stâlp care conţin stâlpii fabricaţi din profilul cel mai subţire, cu grosimea de 1,50 mm, modul de cedare constă în deformaţiile perforaţiilor de pe partea frontală a stâlpului. Alte moduri de cedare include: deformarea conectorului în solicitarea de încovoiere; flambarea locală a grinzii în zona apropiată de conector.
- Cercetările privind efectele jocurilor dintre pinii conectorilor metalici şi perforaţiile din stâlpi, în conexiunile dintre grindă şi stâlp, au condus la obţinerea unor rezultate cantitative pentru rotirea Φ_l a conectorului (determinată în momentul anulării jocurilor din conexiune) care arată că această mărime (exprimată în radiani în tabelul 6.3) este mai mare de 1,66 ori în cazul în care ansamblul de tipul grindă-conector stâlp conţine stâlpul fabricat din profilul cu grosimea peretelui de 1,50 mm, decât în cazul utilizării stâlpului fabricat din profilul cu grosimea de 2 mm.
- Pentru cazul de studiu considerat în capitolul 6.4, considerând rezultatele obţinute experimental pentru rotirea Φ_l a conectorului (determinată în momentul anulării jocurilor din conexiune), s-au obţinut corecţii maxime de calcul de 2,99 % şi de 5,16 % (Tabelul 6.4) pentru momentul de încovoiere M_{mij} care se dezvoltă la mijlocul grinzii şi respectiv, pentru săgeata maximă v_{max} , faţă de cazul în care se neglijează efectele jocurilor din conexiuni.
- S-a concluzionat de asemenea la finalul capitolului 6 că valorile corecţiilor, atât pentru momentul de încovoiere M_{mij} care se dezvoltă la mijlocul grinzii, cât şi pentru săgeata maximă v_{max} , sunt cu atât mai semnificative cu cât peretele stâlpului cu care este conectată grinda, este mai subţire. De asemenea, se remarcă faptul că raportul între săgeata maximă v_{max} a grinzii, calculată considerând efectele jocurilor dintre pinii conectorului şi perforaţiile stâlpilor,

şi săgeata maximă corespunzătoare cazului în care se neglijează efectele jocurilor, este mai mare pentru conectorul cu cinci pini (raportul este între 1,025 şi 1,052) decât pentru conectorul cu patru pini (raportul este între 1,016 şi 1,029).

- Rezultatele prezentate în capitolul 6 dovedesc faptul că inginerii proiectanţi ar trebui să țină cont de efectele jocurilor din conexiunile dintre grindă şi stâlp, realizate cu conectori cu pini, atât în calculul săgeţii maxime a grinzilor folosite la structurile de depozitare, cu rafturi pentru paletă, cât şi în calculul momentului de încovoiere care se dezvoltă la mijlocul grinzii, în special pentru valori ale rigidităţii la rotire k_m a conexiunii, care sunt mai mari decât 80 kN·m/rad.
- Cercetările teoretice şi experimentale prezentate în capitolul 7, referitoare la pierderea stabilităţii profilurilor metalice, utilizate pentru fabricarea stâlpilor în sistemele de depozitare, realizate pentru 15 tipuri diferite de profiluri, au permis realizarea unei baze de date destul de bogată în ceea ce priveşte forţa critică de flambaj şi aria efectivă, determinate prin încercările de compresiune ale acestora.
- Forţele critice de flambaj, obţinute experimental, se potrivesc foarte bine cu valorile obţinute prin analiză cu elemente finite (FEA) în cazul introducerii imperfecţiunilor geometrice de tipul celor codificate cu Imp_0.15t şi cu Imp_0.05t în modelul numeric, în primul mod de flambaj, valorile medii ale erorilor fiind egale cu 4,39 % şi respectiv, cu 3,57 %, pentru toate profilurile testate (capitolul 7.3). Cu toate acestea, s-a constatat că în cazul modelului numeric cu imperfecţiunea geometrică codificată cu Imp_0.05t, erorile sunt mai mari decât 5 % (în intervalul 6,3 % şi 9,2 %), pentru doar patru tipuri de profiluri testate: tipul C, tipul D, tipul L, tipul N (Tabelul 7.5). Se poate remarca de asemenea că în cazul modelului numeric cu imperfecţiunea codificată cu Imp_0.15t, erorile sunt mai mari decât 5 % (în intervalul 6,4 % şi 10 %), pentru următoarele tipuri de profiluri testate: tipul A, tipul C, tipul D, tipul L, tipul N.
- Considerând ambele cazuri de imperfecţiuni geometrice impuse în conformitate cu standardul european (EN 1993-1-5 - Eurocode 3 - Part 5, 2007), codificate cu Imp_W/200 şi cu Imp_D/50), recomandate pentru coloanele fără imperfecţiuni, se poate observa că modurile de impunere a acestor imperfecţiuni sunt potrivite doar pentru anumite tipuri de profiluri testate. În cazul imperfecţiunii codificate cu Imp_W/200, cea mai bună potrivire între valoarea forţei critice de flambaj obţinută în teste şi cea obţinută prin FEA (adică eroarea este mai mică decât 5 %), s-a obţinut doar pentru jumătate din numărul total de tipuri de stâlpi testaţi: tipul E, tipul F, tipul G, tipul H, tipul I, tipul J, tipul M (capitolul 7.3). În cazul considerării imperfecţiunii codificate cu Imp_D/50, eroarea este mai mică decât 5 % doar în cazul următoarelor trei tipuri de profiluri pentru stâlpi: tipul I, tipul M, tipul O (capitolul 7.3).
- S-a observat o potrivire bună între modurile de cedare la pierderea stabilităţii (flambaj local, flambaj distorsional cu deschidere sau închidere a flanşelor stâlpului), obţinute în încercările de compresiune şi în analiza de pierdere a stabilităţii prin modelare numerică cu elemente finite (capitolul 7.3).
- Având în vedere rezultatele cercetărilor prezentate în capitolul 7, se recomandă să se impună imperfecţiuni geometrice egale cu 5 % din grosimea profilului, în modelul numeric care simulează comportarea stâlpului solicitat la compresiune, pentru a obţine valori cât mai precise pentru forţa critică de flambaj, prin analiza cu elemente finite a pierderii stabilităţii stâlpilor perforaţi, cu secţiunea de forma literei Omega.

8.2. Contribuţii personale

Tematica abordată în această teză de doctorat este de actualitate ținând cont de necesitatea impusă de piață în continuă creștere a sistemelor de depozitare cu rafturi pentru paleți, în ceea ce privește îmbunătățirea continuă a acestora în ceea ce privește siguranța în exploatare. S-a studiat atât din punct de vedere teoretic prin simulare numerică, cât și din punct de vedere experimental, comportarea sub acțiunea solicitărilor mecanice a unor elemente constructive (conexiunile dintre grinzi și stâlpi, profilurile pentru stâlpi) ale acestor structuri metalice pentru depozitare. Modele numerice cu elemente finite pentru analiza pierderii stabilității locale și distorsionale diverselor profilurile perforate, cu secțiunea în forma literei Omega, au fost validate de rezultatele obținute în încercările mecanice.

În continuare, se vor menționa contribuțiile personale și originale ale autorului tezei de doctorat în domeniul simulării și testării elementelor componente din structurile metalice cu pereți subțiri:

- S-a determinat experimental rigiditatea la rotire și momentul de încovoiere capabil pentru 18 tipuri de conexiuni diferite dintre grinzi și stâlpi, cu conectori metalici, cu patru și cinci pini, obținându-se o bază de date de referință pentru inginerii și specialiști implicați în proiectarea structurilor pentru depozitare, cu rafturi pentru paleți;
- S-au studiat efectele mărimii grinzilor, a grosimii pereților profilurilor utilizate pentru stâlpi și a tipului de conector (cu patru sau cu cinci pini) asupra rigidității la rotire a conexiunii dintre grindă și stâlp, considerând rezultatele obținute experimental;
- Considerând rezultatele obținute experimental, s-au analizat prin comparații teoretice, coeficienții de siguranță atât din punctul de vedere al capacității portante a conexiunii, cât și din punctul de vedere al rigidității grinzii solicitate mecanic, având la ambele capete conexiuni de tipul celor implicate în cercetările din teza de doctorat; pe baza analizei comparative s-au făcut recomandări privind variantele constructive care corespund cel mai bine din punctul de vedere al siguranței în exploatare pentru astfel de grinzi;
- Considerând rezultatele obținute experimental pentru rigiditățile la rotire ale conexiunilor, s-a studiat comparativ săgeata maximă și momentul maxim care se dezvoltă la mijlocul grinzii cu conexiuni semi-rigide la ambele capete (de tipul celor implicate în teza de doctorat), față de cazurile grinzii dublu-articulate sau dublu-încastate la ambele capete;
- S-a evidențiat în mod justificat, importanța considerării comportării conexiunilor semirigide de către inginerii proiectanți, întrucât cazurile ideale de îmbinare articulată și îmbinare rigidă sunt doar teoretice
- S-a determinat experimental unghiul de rotire al conexiunii până la anularea jocurilor pentru trei tipuri de ansamble de tipul grindă-conector-stâlp, diferite în ceea ce privește grosimea profilului având secțiunea cu contur deschis, utilizat pentru stâlpii structurilor metalice pentru depozitare;
- S-a arătat influența grosimii peretelui profilurilor utilizate pentru stâlpi, asupra rotirii conexiunii până la anularea jocurilor din îmbinarea dintre conectorul cu pini din capătul grinzii și stâlp;
- S-au utilizat rezultatele obținute experimental pentru unghiurile de rotire a conexiunilor până la anularea jocurilor și s-a analizat comparativ din punct de vedere teoretic, comportarea mecanică a grinzilor cu conexiuni la ambele capete, de tipul celor considerate în studiu, prin estimarea efectelor jocurilor din conexiunile dintre grindă și stâlp, asupra momentului de încovoiere care se dezvoltă la mijlocul grinzii, precum și asupra săgeții maxime a grinzii;

- S-au determinat forţa critică de flambaj şi aria eficace pentru 15 tipuri de profiluri diferite, utilizate pentru fabricarea stâlpilor în structurile de depozitare pentru paleţi, prin încercările mecanice de pierdere a stabilităţii locale şi distorsionale a acestora;
- S-au realizat modelele numerice cu elemente finite, pentru 15 tipuri diferite de profiluri perforate, cu pereţi subţiri şi cu secţiunea având forma literei Omega, utilizate în fabricarea stâlpilor pentru structurile de depozitare, pentru simularea pierderii stabilităţii locale şi distorsionale a acestora, prin considerarea mai multor cazuri în ceea ce priveşte imperfecţiunile impuse;
- S-au analizat comparativ valorile forţelor critice de flambaj pentru 15 profiluri perforate diferite, obţinute prin simulare numerică pentru diversele cazuri considerate din punctul de vedere al mărimii imperfecţiunilor impuse în analiza cu elemente finite, a pierderii stabilităţii locale şi distorsionale;
- S-a validat modelului numeric propus pentru analiza cu elemente finite, a pierderii stabilităţii locale şi distorsionale, pentru cele 15 profiluri diferite implicate în cercetare, având secţiunea în forma literei Omega, prin comparaţia forţelor critice de flambaj obţinute prin simularea numerică cu valorile obţinute experimental;
- S-a propus o metodă considerată cea mai potrivită dintre cele studiate şi validată pentru cele 15 tipuri de profiluri considerate în cercetare, în ceea ce priveşte mărimea imperfecţiunilor impuse în modelul numeric, care să conducă la diminuarea erorilor dintre rezultatele obţinute prin simularea numerică şi rezultatele obţinute experimental, în ceea ce priveşte forţa critică de flambaj pentru pierderea stabilităţii locale şi distorsionale ale profilurilor implicate în cercetările din această teză de doctorat; metoda recomandată se poate utiliza pe viitor şi pentru alte tipuri de profiluri perforate, cu pereţi subţiri, cu contur deschis, în vederea estimării forţei critice pentru pierderea stabilităţii locale sau distorsionale;
- S-au analizat comparativ modurile de pierdere a stabilităţii (locale sau distorsionale), obţinute prin simularea numerică, cu cele obţinute în testarea experimentală, pentru profilurile perforate, cu pereţi subţiri, implicate în studiu, ceea ce a condus la validarea modelului numeric şi pe această cale.

8.3. Direcţii viitoare de cercetare

Limitările studiului referitor la compararea conexiunilor cu patru şi cinci pini metalici includ utilizarea exclusivă a unui singur tip de secţiune transversală pentru stâlpi şi aplicabilitatea rezultatelor doar la temperatura ambientală. Studiile viitoare ar trebui să includă diversificarea formelor de secţiuni transversale ale stâlpilor şi dezvoltarea de modele adaptate pentru condiţiile de incendiu.

O direcţie de cercetare promiţătoare este reprezentată de investigarea utilizării metodei FEA pentru evaluarea rigidităţii la rotire a conexiunilor semirigide cu pini metalici. De asemenea, se intenţionează analizarea conectorilor cu mai mulţi pini şi evaluarea stabilităţii structurilor de depozitare în contextul utilizării acestora.

Extinderea studiului în ceea ce priveşte efectele jocurilor din conexiunile semirigide, cu pini, ar permite investigarea acestor efecte considerând diferite tipuri de secţiuni transversale pentru grinzile realizate din profiluri cu pereţi subţiri.

De asemenea, se propune extinderea utilizării analizei cu elemente finite pentru studiul flambajului neliniar al profilurilor omega şi pentru coloanele cu lungimi mai mari. În acelaşi timp, este importantă

măsurarea precisă a coloanelor utilizate în aceste studii pentru a evalua corect deviațiile profilurilor față de dimensiunile nominale.

Investigarea unei grosimi echivalente pentru secțiunile transversale cu perforații ar facilita analiza structurilor. Se propune analizarea posibilității de a stabili o grosime echivalentă pentru determinarea forței de cedare a coloanelor de tip omega.

BIBLIOGRAFIE

- ANSI MH16.1: 2008. Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks. In Pallet Beam-to-Column Connection Tests, Rack Manufactures Institute, United States of America: Charlotte, United States of America, 2008; p. 4.
- Asl, M.H.; Farivar, B.; Momenzadeh, S. (2019). Investigation of the rigidity of welded shear tab connections. *Engineering Structures*, 179, pp. 353–366, doi:10.1016/j.engstruct.2018.10.077.
- Babeu, T.; Marsavina, L.(1995). *Culegere de probleme de rezisten a materialelor*. Universitatea Politehnica Timișoara.
- Bârsănescu, Paul-Doru (2022). *Rezistența materialelor, vol. II, Elemente de stabilitate, elasticitate și solicitări compuse*, Editura Tehnopress, Iași, 2022.
- Bia, C.; Ilie, V.; Soare, M. (1987). *Rezistența materialelor și teoria elasticității*. Editura Tehnică, București.
- Bonada, J.; Pastor, M.M.; Roure, F.; Casafont, M. (2016). Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending. *Structures* 8, pp. 275–285.
- Borkowski, L.; Grudziecki, J.; Kotelko, M.; Ungureanu, V.; Dubina, D. (2022). Ultimate and post-ultimate behaviour of thin-walled cold-formed steel open-section members under eccentric compression. Part II: Experimental study. *Thin-Walled Structures*, 171, doi: 10.1016/j.tws.2021.108802.
- BS EN 10346: 2009. Continuously hot-dip coated steel flat products - Technical delivery conditions. European Committee for Standardization: Brussels, 2009.
- BS EN 15512: 2009. Steel static storage systems - Adjustable pallet racking systems - Principles for structural design. European Committee for Standardization: Brussels, 2009.
- BS EN ISO 6892-1: 2009. Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of Test at room temperature. European Committee for Standardization: Brussels, 2009.
- Buzdugan, Gh. (1986). *Rezistența materialelor*. Editura Academiei Romane, București.
- Cerbu, C. (2014). *Strength of materials. Theory and applications*; Editura Universității Transilvania din Braşov, 398 pagini.
- Chou, S.M.; Chai, G.B.; Ling, L. (2000). Finite element technique for design of stub columns. *Thin-Walled Structures*, 37, pp. 97–112.
- Chiriacescu, T. Sergiu; Balcu, Ion (2008). *Introducere în teoria elasticității și rezistența materialelor*, Editura Universității Transilvania din Braşov, ISBN 978-973-598-244-7, 2008.
- Ciofoaia, V. (1987). *Rezistența materialelor și elemente de construcții industriale*. Reprografia Universității Braşov.
- Ciofoaia, Vasile; Curtu, Ioan (2000). *Teoria elasticității corpurilor izotrope și anizotrope*, Braşov, 2000.
- Coelho, A.M.G.; Bijlaard, F.S.K.; da Silva, L.S (2004). Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections. *Engineering Structures*, 26, pp. 1185–1206, doi:10.1016/j.engstruct.2000.09.001.

- Craveiro, H.; Rodrigues, J.P.C.; Laim, L. (2018). Cold-formed steel columns at both ambient and fire conditions. *Journal of Structural Fire Engineering*, 9, pp. 189-202, doi:10.1108/jsfe-01-2017-0018.
- Crisan, A.; Ungureanu, V.; Dubina, D. (2012a). Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 1-Experimental investigations. *Thin-Walled Structures*, 61, pp. 86-96.
- Crisan, A.; Ungureanu, V.; Dubina, D. (2012b). Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression: Part 2-numerical investigations and design considerations. *Thin-Walled Structures*, 61, pp. 97-105.
- Curtu, I., ş.a. (2000). *Rezistenţa materialelor şi teoria elasticităţii, partea a III-a*, 2000. Reprografia Universităţii Transilvania din Braşov.
- Dai, L.S.; Zhao, X.Z.; Rasmussen, K.J.R. (2018a). Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. *Thin-Walled Structures*, 124, pp. 202-217, doi:10.1016/j.tws.2017.12.010.
- daSilva, L.S., Simoes, R., Gervasio, H. (2010). **Design of Steel Structures, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.** Published by ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, Eurocode Design Manuals, ISBN (ECCS) 978-92-9147-098-3, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, GmbH & Co. KG, Berlin. SN003a-EN-EU NCCI: **Elastic Critical Moment for Lateral Torsional Buckling.** Access Steel, 2006.
- Dai, L.S.; Zhao, X.Z.; Rasmussen, K.J.R. (2018b). Cyclic performance of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, pp. 28-48, doi:10.1016/j.jcsr.2018.04.012.
- Degtyarev, V.V.; Degtyareva, N.V. (2016). Finite element modeling of cold-formed steel channels with solid and slotted webs in shear. *Thin-Walled Structures*, 103, pp. 183-198, doi:10.1016/j.tws.2016.02.016.
- Degtyareva, N.V. (2017). Review of Experimental Studies of Cold-Formed Steel Channels with Slotted Webs under Bending. *International Conference on Industrial Engineering*, 206, pp. 875-880, doi:10.1016/j.proeng.2017.10.566.
- Degtyareva, N.V.; Degtyarev, V.V. (2016). Experimental investigation of cold-formed steel channels with slotted webs in shear. *Thin-Walled Structures*, 102, pp. 30-42, doi:10.1016/j.tws.2016.01.012.
- Deutsch, I. (1979). *Rezistenţa materialelor*. Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti.
- Dubina, D. (2010). Contract nr. 424/08.12.2009. Verificarea la stabilitate a elementelor din otel în conformitate cu SR EN 1993-1-1.1. *Recomandări de calcul, comentarii si exemple de aplicare*. Timisoara 2010.
- Dubina, D.; Ungureanu, V. (2023). Local/distortional and overall interactive buckling of thin-walled cold-formed steel columns with open cross-section. *Thin-Walled Structures*, 182, doi: 10.1016/j.tws.2022.110172.

- Dumbrava, F.; Cerbu, C. (2020a).** Experimental Study on the Stiffness of Steel Beam-to-Upright Connections for Storage Racking Systems. *Materials*, 13 (13), Article Number: 2949, doi: 10.3390/ma13132949.
- Dumbravă, F.; Cerbu, C. (2020b).** Analysis of pallet storage structures in down-aisle direction. *Proceeding of The 8th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering COMAT 2020 & The 3rd International Conference on Experimental Mechanics in Engineering, Braşov, ROMANIA, 29-31 October 2020, ISSN 2457-8541, pp. 49-54.* Link conferinta: <https://sites.google.com/view/comatcomec/home>
- Dumbrava, F.; Cerbu, C. (2022a).** Effect of the Looseness of the Beam End Connection Used for the Pallet Racking Storage Systems, on the Mechanical Behavior of the Bearing Beams. *Materials* 15(14), Article Number: 4728, doi: 10.3390/ma15144728.
- Dumbrava, F.; Cerbu, C.; Ursache, S. (2022b).** Research concerning to the rigidity of the screw joint between beam and column in metal structures, *Proceedings of The 9th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering (COMAT), Brasov, 17 – 18 October, 2022, ISSN 2457 – 8541, ISSN – L2457 – 8541, pp. 66 – 71.*
- Dumbrava, Florin; Cerbu, Camelia (2024).** Local and distortional buckling behaviour of omega-shaped short columns used in pallet racking storage systems: experimental study and numerical modelling, *revista Structures (Q1/ 2023, FI: 3.9/ JCR 2023, ISSN: 2352-0124).* Manuscript ID: STRUCTURES-D-24-03235, înregistrat în data de 9 mai 2024, este în curs de recenzie.
- Elza, M.M.; Fonseca, L.S.; Pedro A.S. (2020). Numerical model to predict the effect of wood density in wood–steel–wood connections with and without passive protection under fire. *Journal of Fire Sciences*, 38, pp. 122-135, doi:10.1177/0734904119884706.
- EN 15512: 2020. Steel static storage systems - Adjustable pallet racking systems - Principles for structural design. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1993-1-3: 2006. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1993-1-5: 2007. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 5: Piling. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN ISO 6892-1: 2009. Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of Test at room temperature. European Committee for Standardization, Brussels.
- Escanio, L.A.; Elias, G.C.; Neiva, L.H.D.; Alves, V.N.; Sarmanho, A.M.C. (2020). Analysis of beam-to-upright end connections steel storage systems. *Advanced Steel Construction*, 16, pp. 279-286, doi:10.18057/ijasc.2020.16.3.9.
- Galeotti, C.; Gusella, F.; Orlando, M.; Spinelli, P. (2021). On the seismic response of steel storage pallet racks with selective addition of bolted joints. *Structures*, 34, pp. 3806-3817, doi:10.1016/j.istruc.2021.10.001.

- Gharebaghi, R.; Hosseini, A. (2017). Local behavior of column-tree connections with considering bolt-hole clearance and bolt pretension effects. *International Journal of Steel Structures*, 17, pp. 379-388, doi:10.1007/s13296-017-6002-z.
- Gilbert, B.P.; Rasmussen, K.J.R. (2010). Bolted moment connections in drive-in and drive-through steel storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, pp. 755-766, doi:10.1016/j.jcsr.2010.01.013.
- Godley, M.H.R.; Beale, R.G. (2001). Analysis of large proprietary access scaffold structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 146, pp. 31-39.
- Goia, Ioan (2002). *Mechanics of Materials*, 1st vol., Derc Publishing House, Tewsbury, Massachusetts, USA, ISBN-13 978-0-9817300-0-4, ISBN-10 0-9817300-0-0
- Grondin, G.Y.; Jin, M.; Josi, G. (2007). Slip Critical Bolted Connections — A Reliability Analysis for Design at the Ultimate Limit State, University of Alberta: Edmonton, Alberta, Canada, Volume: Structural engineering report SER 270 | SER-ID SER270, doi:10.7939/R3QR4NQ55
- Gusella, F.; Arwade, S.R.; Orlando, M.; Peterman, K.D. (2019). Influence of mechanical and geometric uncertainty on rack connection structural response. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, pp. 343-355, doi:10.1016/j.jcsr.2018.10.021.
- Gusella, F.; Lavacchini, G.; Orlando, M. (2018). Monotonic and cyclic tests on beam-column joints of industrial pallet racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 140, pp. 92-107, doi:10.1016/j.jcsr.2017.10.021.
- Gusella, F.; Orlando, M.; Thiele, K. (2018). Evaluation of rack connection mechanical properties by means of the Component Method. *Journal of Constructional Steel Research*, 149, pp. 207-224, doi:10.1016/j.jcsr.2018.07.021.
- He, Z.Q.; Cao, H.Y.; Zhou, X.H.; Li, Q.X.; Schafer, B.W. (2022). Performance of cold-formed C-sections reinforced by sleeves under concentric and eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 198, doi:10.1016/j.jcsr.2022.107554.
- Huang, S.Q.; Chen, J.; Jin, W.L. (2011). Numerical investigation and design of thin-walled complex section steel columns. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 12, pp. 131-138.
- Iliescu, N.; Jiga, G.; Hadăr, A. (1999). *Teste – grilă de rezistența materialelor*. Editura Printech. București, 1999.
- Jovanovic, D.; Zarkovic, D.; Vukobratovic, V.; Brujic, Z. (2019). Hysteresis model for beam-to-column connections of steel storage racks. *Thin-Walled Structures*, 142, pp. 189-204, doi:10.1016/j.tws.2019.04.056.
- Kotelko, M.; Grudziecki, J.; Ungureanu, V.; Dubina, D. (2021). Ultimate and post-ultimate behaviour of thin-walled cold-formed steel open-section members under eccentric compression. Part I: Collapse mechanisms database (theoretical study). *Thin-Walled Structures*, 169, doi:10.1016/j.tws.2021.108366.
- Kulak, G.L.; Fisher, J.W.; Struik, J.H.A. (1987). *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, 2nd Edition ed.; Editura John Wiley & Sons: New York.

- Laim, L.; Rodrigues, J.P.C. (2018). Fire design methodologies for cold-formed steel beams made with open and closed cross-sections. *Engineering Structures*, 171, pp. 759-778, doi:10.1016/j.engstruct.2018.06.030.
- MECALUX - Warehouse Storage Solutions. Fire protection measures for metal racks and warehouses. Available online: <https://www.mecalux.com/logistics-items/fire-protection-measures-for-metal-racks-and-warehouses> (accessed on 23.06.2020).
- Marşavina, L. (2006). Metode experimentale de determinare a tenacită ii la rupere, Ed. Politehnica, Timişoara, 205 pag.
- Mohan, V.; Prabha, P.; Rajasankar, J.; Iyer, N.R.; Raviswaran, N.; Nagendiran, V.; Kamalakannan, S.S. (2015). Cold-formed steel pallet rack connection: an experimental study. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7, pp. 55–68, doi:10.1007/s40091-015-0082-9.
- Mourya, U.; Jayachandran, S.A. (2022). Finite element model-based dynamic characteristic predictions for cold-formed steel storage racks. In *Proceedings of the Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, Denver, Colorado, March 22-25, 2022*; pp. 1-9.
- Năstăsescu, V.; Bîrsan, Gh. (1997). *Rezistenţa materialelor – Probleme*, vol.I şi II. Editura Academiei Tehnice Militare, Bucureşti.
- Năstăsescu, V.; Bârsan, G. (2021). *Elasticitate şi plasticitate. Capitole speciale*. Editura Academiei Forţelor Terestre „Nicolae Bălcescu”, Sibiu, ISBN: 978-973-153-429-9.
- Oeztuerk, F.; Mojtabaei, S.M.; Sentuerk, M.; Pul, S.; Hajirasouliha, I. (2022). Buckling behaviour of cold-formed steel sigma and lipped channel beam-column members. *Thin-Walled Structures*, 173, doi:10.1016/j.tws.2022.108963.
- Peiris, M.; Mahendran, M. (2021). Behaviour of cold-formed steel lipped channel sections subject to eccentric axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, doi:10.1016/j.jcsr.2021.106808.
- Prabha, P.; Marimuthu, V.; Saravanan, M.; Jayachandran, S.A. (2010). Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, pp. 863-872, doi:10.1016/j.jcsr.2010.01.019.
- Prabhakaran, U.; Beale, R.G.; Godley, M.H.R. (2011). Analysis of scaffolds with connections containing looseness. *Computers & Structures*, 89, pp. 1944-1955, doi:10.1016/j.compstruc.2011.03.016.
- Roşca, Ioan Călin (2020). *Rezistenţa materialelor, partea I*, Editura Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN 978-606-19-1335-0-4.
- Roure, F.; Pastor, M.M.; Casafont, M.; Somalo, M.R. (2011). Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. *Thin-Walled Structures* 49(1), pp. 167-184, doi:10.1016/j.tws.2010.09.002.
- Sanborn, M.; Stewart, L.K. (2020). Behavior of slip-critical bolted connections subjected to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*, 143, Article Number: 103501, doi:10.1016/j.ijimpeng.2020.103501.

- Schabowicz, K. (2021). Testing of Materials and Elements in Civil Engineering. *Materials*, 14(12), Article Number: 3412, doi:10.3390/ma14123412.
- Shah, S.N.R.; Sulong, N.H.R.; Shariati, M.; Khan, R.; Jumaat, M.Z. (2016). Behavior of steel pallet rack beam-to-column connections at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, 106, pp. 471-483, doi:10.1016/j.tws.2016.05.021.
- Shariati, M.; Tahir, M.M.; Wee, T.C.; Shah, S.N.R.; Jalali, A.; Abdullahi, M.M.; Khorami, M. (2018). Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections. *Engineering Failure Analysis*, 85, pp. 149-166, doi:10.1016/j.engfailanal.2017.08.014.
- Singh, T.G.; Chan, T.M. (2021). Effect of access openings on the buckling performance of square hollow section module stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 177, doi:10.1016/j.jcsr.2020.106438.
- Ślęczka, L.; Kozłowski, A. (2008). Design of beam-to-column joints in steel storage pallet racks by testing and by component method, *Archives of Civil Engineering*, LIV(1), pp. 263-291.
- Soare, M., ş.a. (1996). *Rezistenţa materialelor în aplicaţii*. Editura Tehnică. Bucureşti, 1996.
- Talebian, N.; Gilbert, B.P.; Miller, D.; Karampour, H. (2022). Biaxial bending design of solid steel storage rack uprights in global buckling. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, doi:10.1016/j.jcsr.2022.107395.
- Timoshenko, S.P.; Gere, J.M. (2009). *Theory of elastic stability*, Second edition. Dover ed. ISBN-13: 978-0-486-47207-2, ISBN-10: 0-486-47207-8.
- Ungureanu, V.; Both, I.; Kotelko, M.; Czechowski, L.; Bodea, F.; Dubina, D. (2022). Buckling strength and post-ultimate behaviour of lipped channel section short columns under eccentric compression. *Thin-Walled Structures*, 181, doi:10.1016/j.tws.2022.110085.
- Vincent, N.K.; Varghese, A.; Ajeesh, S.S. (2023). Distortional-Global Interactive Buckling of Thin-Walled Columns with Complex Lips. *International Journal of Steel Structures*, 23(4), pp. 945-961, doi:10.1007/s13296-023-00740-4.
- Yazici, C.; Arik, E.; Özkal, F.M., (2023). Influence of design parameters on beam-to-column connections of steel storage rack systems. *Engineering Failure Analysis*, 152, doi:10.1016/j.engfailanal.2023.107439.
- Yin, L.F.; Tang, G.; Zhang, M.; Wang, B.J.; Feng, B. (2016). Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks. *Engineering Structures*, 116, 40-55, doi:10.1016/j.engstruct.2016.02.032.
- Yu, N.T.; Kim, B.; Yuan, W.B.; Li, L.Y.; Yu, F. (2019). An analytical solution of distortional buckling resistance of cold-formed steel channel-section beams with web openings. *Thin-Walled Structures*, 135, pp. 446-452, doi:10.1016/j.tws.2018.11.012.
- Zadanfarrokh, F.; Bryan, E.R. (1992). Testing and Design of Bolted Connections in Cold Formed Steel Sections. In *Proceedings of the International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 3., Missouri University of Science and Technology, 1992, <https://scholarsmine.mst.edu/iscfss/11icfss/11icfss-session11/3>.

- Zhang, J.F.; Wang, B.; Wang, S.; Deng, E.F.; Zhang, P.; Pang, S.Y.; Wen, M.G.; Ye, L.; Guo, X.S.; Gao, J.L. (2021). Eccentric compressive distortional buckling and design of non-symmetric cold-formed angular column with complex edges. *Thin-Walled Structures*, 165, doi:10.1016/j.tws.2021.107981.
- Zhang, P.; Alam, M.S. (2020). Elastic buckling behaviour of Sigma-shaped rack columns under uniaxial compression. *Engineering Structures*, 212, Article Number: 110469, doi:10.1016/j.engstruct.2020.110469.
- Zhao, X.Z.; Dai, L.S.; Wang, T.; Sivakumaran, K.S.; Chen, Y.Y. (2017a). A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, pp. 269-281. doi:10.1016/j.jcsr.2017.02.014.
- Zhao, X.Z.; Ren, C.; Qin, R. (2017b). An experimental investigation into perforated and non-perforated steel storage rack uprights. *Thin-Walled Structures*, 112, pp. 159-172, doi: 10.1016/j.tws.2016.11.016.
- Zhao, X.Z.; Dai, L.S.; Wang, T.; Sivakumaran, K.S.; Chen, Y.Y. (2017). A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, pp. 269-281, doi:10.1016/j.jcsr.2017.02.014.
- Zhao, X.Z.; Wang, T.; Chen, Y.Y.; Sivakumaran, K.S. (2014). Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 99, pp. 161-175, doi:10.1016/j.jcsr.2014.04.007.
- Zhong, W.H.; Tan, Z.; Tian, L.M.; Meng, B.; Song, X.Y.; Zheng, Y.H. (2020). Collapse resistance of composite beam-column assemblies with unequal spans under an internal column-removal scenario. *Engineering Structures*, 206, doi:10.1016/j.engstruct.2019.110143.
- Zhou, T.H.; Li, Y.C.; Ren, L.J.; Sang, L.R.; Zhang, L. (2021). Research on the elastic buckling of composite webs in cold-formed steel back-to-back built-up columns - Part I: Experimental and numerical investigation. *Structures*, 30, pp. 115-133, doi:10.1016/j.istruc.2020.12.059.
- ***a, Cataloage de prezentare a produselor, Dexion Storage Solutions SRL (Râşnov), 2019.
- ***b, Documentație tehnică referitoare la dimensiunile și caracteristicile geometrice ale secțiunii grinzilor produse pentru sistemele de depozitare, cu rafturi pentru paleți, Dexion Storage Solutions SRL (Râşnov), 2019.