

## PERFORMANTA MECANICA A IMBINARII ASCUNSE IN LINIE PENTRU SECTIUNILE TUBULARE

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanica

**autor ing. Calin-Ioan BIRDEAN**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Anghel-Vasile CERNESCU

luna 11 anul 2024

### 1. INTRODUCERE

Structurile cu formă liberă duc la dezvoltarea provocatoare a detaliilor, cum ar fi imbinările ascunse pentru a obține aspectul continuu al elementelor și, astfel, al structurii. Dacă rezistența este considerația predominantă, probabilitatea utilizării HSS (Hollow Structural Sections) crește, oferind un avantaj semnificativ sub forma unei greutatei proprii reduse pentru produsul final. Această greutate proprie mai mică aduce avantaje suplimentare, inclusiv costuri reduse de transport și manipulare, volume mai mici de metal de sudură rezultate din plăci de oțel mai subțiri și, în consecință, o viteză de producție îmbunătățită. Utilizarea HSS permite, de asemenea, automatizarea procesului de sudare, datorită sudurilor mai mici și mai simple.

Pentru a dobândi factorii conducători care influențează comportamentul imbinărilor în structurile de formă liberă, teza actuală studiază, experimental și numeric, răspunsul unei imbinări cu șuruburi al cărei aspect nu reflectă viziunea industrială a unei construcții din oțel, ci mai mult o pânză de elemente continue. Din motive tehnologice, aceasta panza ascunde imbinările de continuitate. La un nivel ridicat de solicitare cauzat în special de încovoiere, finisajul aplicat imbinării se poate deteriora, iar structura poate pierde aspectul de continuitate al elementelor. Cu prevederi limitate ale codului de proiectare pentru astfel de conexiuni și fără criterii de funcționare, teza prezintă răspunsul imbinărilor în linie, invizibile și efectul parametrilor asupra capacității și separării elementelor conectate.

În întregul ansamblu al cadrului, imbinările dintre elemente și legătura stâlpului cu fundația joacă un rol crucial. Detalierea necorespunzătoare a acestuia din urmă poate duce la încărcări suplimentare asupra fundației, ceea ce duce la dimensionarea neeconomică. În prezent, mulți proiectanți structurali limitează verificarea imbinării la solicitarea maximă de întindere în șurub. Cu toate acestea, această abordare s-a dovedit insuficientă deoarece comportamentul general al articulației este influențat semnificativ de alte elemente componente, inclusiv placa de capăt, rigidizările, panoul inimii și tălpile componentelor.

Comportamentul imbinărilor în elementele cu pereți subțiri, în special panoul inimii al ramelor metalice portal, a fost investigat de Vayas și colab., [1]. Studiul a implicat un program experimental cu imbinări realizate prin sudură și supuse la încărcare statică și dinamică. Rezistența articulației a fost monitorizată prin trei mecanisme de cedare: cedarea la forfecare a panoului central, rezistența câmpului de stres influențat de raportul dintre dimensiunea panoului central și tălpile componentelor și rezistența tălpilor componentelor.

Studiile anterioare ale lui Lim și Nethercot, [2], Chung și Lau, [3], asupra nodurilor cadrelor metalice portal realizate din elemente formate la rece au indicat că imbinările cu

șuruburi din aceste cadre prezintă un comportament semi-rigid și sunt parțial rezistente.

Metoda componentelor, o procedură de calcul binecunoscută pentru evaluarea proprietăților îmbinărilor structurale, este utilizată ca referință în EN 1993, [4], și EN 1994, [5], pentru dimensionarea rosturilor în structuri metalice și mixte. Această metodă caracterizează proprietățile unui nod în trei etape: identificarea componentelor de bază, evaluarea proprietăților mecanice ale acestor componente și asamblarea componentelor.

Pentru a investiga comportamentul îmbinărilor cu șuruburi sub efectul cuplat al momentului încovoietor și al forței axiale, a fost efectuat un studiu experimental și analitic amplu la Universitatea din Liege. Modelul mecanic dezvoltat a fost utilizat într-un program de calcul comun bazat pe metoda componentelor. Acest program, realizat de Cerfontaine și Jaspert, [6], permite determinarea numerică a răspunsului articulației tijă-coloană supusă la îndoire cu forță axială.

Comportamentul neliniar al cadrelor metalice portal cu îmbinări semirigide a fost studiat de Nogueiro și Silva, [7], de la Universitatea din Coimbra, Portugalia. Studiul a concluzionat că îmbinarea grinzii cu grinzi din coamă și stâlpul grinzii de la streașină au o influență minimă asupra comportamentului neliniar al cadrului, fixarea stâlpului în fundație fiind cel mai important contributor.

Teza își propune să evidențieze utilizarea adecvată a îmbinării în linie prin înțelegerea comportamentului componentelor conexiunii. Pentru finalizarea tezei au fost propuse următoarele obiective:

- Extragerea studiilor existente asupra conexiunilor cu șuruburi într-o revizuire a literaturii și a cunoștințelor de ultimă generație privind subiectul tezei.
- Prezentarea teoriilor pentru deviația fasciculului.
- Efectuarea de teste experimentale pentru a obține rezultate de referință pentru conexiunea în linie supusă la îndoire pură.
- Validarea unui model numeric pe baza rezultatelor experimentale.
- Efectuarea unei analize parametrice numerice pentru a stabili influența orificiului de acces, grosimea plăcii de capăt, preîncărcarea șurubului, poziția orificiului de acces, forța axială.
- Propunerea de ghiduri de proiectare pentru îmbinarea în linie.

## **2. COMPORTAMENTUL ÎMBINĂRILOR CU ȘURUBURI SUPUSE LA ÎNCOVAIERE**

Acest capitol prezintă clasele de oțel arhitectural, stadiul tehnicii, diferite tipuri de îmbinare în linie și un studiu de caz.

Practica arhitecturală de dezvoltare a sistemului structural își găsește originile în arhitectura gotică. În această perioadă, structurile de piatră, coloanele și sistemele de susținere a contraforturilor au fost extrem de detaliate, devenind estetica definitorie a stilului. Dezvoltarea sistemelor de fier și oțel în anii 1700 și 1800 a continuat această abordare. Mișcarea raționalistă structurală a secolului al XIX-lea a introdus o metodologie de construcție elementară, încadrată, însoțită de un limbaj specific al conexiunilor.

Oțelul structural expus arhitectural (AESS) denotă o categorie specializată de oțel care trebuie să îndeplinească simultan două criterii esențiale. În primul rând, trebuie să fie proiectat pentru a asigura integritatea structurală necesară pentru a susține funcțiile de bază ale clădirii, inclusiv elementele sale structurale primare, copertine sau structuri suplimentare. În al doilea rând, AESS joacă un rol esențial în estetica vizuală a structurii, fiind vizibil și servind ca o componentă semnificativă a limbajului arhitectural folosit în proiectarea clădirii. Orice oțel structural care rămâne neacoperit și expus la vedere se încadrează în domeniul oțelului expus arhitectural. Este important de reținut că AESS necesită cerințe de proiectare, detalieri și

finisare care, în general, le depășesc pe cele ale oțelului structural convențional, care este de obicei ascuns de alte materiale sau finisaje. În consecință, planificarea, detalierea, fabricarea, asamblarea și finisarea sistemelor AESS implică în mod invariabil cheltuieli mari de timp și costuri.

În timp ce categoriile AESS de la 1 la 4 au fost adaptate special pentru sistemul canadian și australasian, conceptul de categorii diferențiate AESS rămâne aplicabil pe scară largă, deoarece țin cont de variațiile de finisare, detalii, distanță de vizualizare, funcționalitate și cost.

În cercetările lor, Tobias Mähr și echipa sa abordează un aspect critic adesea trecut cu vederea în analiza structurală - influența comportamentului articulațiilor asupra distribuției forțelor interne, momentelor și deformațiilor generale într-o structură, [13]. Deși acest aspect este în mod obișnuit ignorat, el devine semnificativ în cazurile în care efectele sale sunt substanțiale, justificând o analiză amănunțită. Eurocod 3, Partea 1-8 [4], oferă prevederi specifice pentru analiza, clasificarea și modelarea îmbinărilor cu privire la gradele de libertate de rotație,[13]. Cu toate acestea, îi lipsesc prevederi pentru grade de libertate translaționale, [14].

O preocupare specifică apare în conexiunile de forfecare, unde poate apărea o alunecare dacă rezistența la alunecare este mai mică decât sarcina de proiectare. Această situație se aplică conexiunilor de forfecare care se încadrează în categoriile A și B conform Eurocodului 3, Partea 1-8, [4]. În structurile supuse predominant forțelor normale, acumularea efectelor de alunecare poate avea un impact semnificativ asupra forțelor interne și a deformațiilor. Încorporarea efectelor de alunecare în modelarea și calculele structurale reprezintă o provocare complexă în mecanica structurală.

Mähr și echipa sa prezintă concepte pentru luarea în considerare eficientă a efectelor de alunecare în îmbinări, în special în contextul structurilor de cadru spațial mare. Ei conturează modele „stick-slip” și demonstrează implementarea lor în modele structurale 3D. Lucrarea lor analizează tehnicile de calcul, în special în ceea ce privește sistemele supradeterminate static și comportamentul neliniar.

Semnificația și avantajele acestei abordări de analiză integrată, în care efectele comune sunt integrate în modelarea globală, sunt exemplificate prin studiul de caz al Domului Luvru Abu Dhabi. Această cupolă remarcabilă, cu un diametru de 185 de metri și cuprinzând aproximativ 11.000 de elemente de oțel, utilizează în mod predominant îmbinări de forfecare. Rezultatele cercetării subliniază imperativul de a nu neglija efectele de alunecare a articulațiilor în analiza structurală globală. Mai mult, studiul validează riguros calitatea și precizia rezultatelor calculate prin măsurători la fața locului.

În abordarea lor, parametrii necesari pentru modelul stick-slip sunt derivați dintr-o combinație de coduri de proiectare și studii de amplasare cuprinzătoare, facilitând o soluție practică. Rezultatele obținute prin această metodă euristică sunt considerate satisfăcătoare pentru Domul Luvru Abu Dhabi. Cu toate acestea, cercetătorii recunosc necesitatea unor eforturi de cercetare ulterioare menite să stabilească reguli și metodologii mai cuprinzătoare și aplicabile universal pentru a aborda complexitățile acestei probleme.

După cum K. Knebel și colegii săi S. Stephan și J. Sánchez-Alvarez prezintă în lucrarea lor „Structuri reticulate pe suprafețe cu formă liberă”, [15], proiectarea structurilor reticulate pe suprafețe cu formă liberă vine cu o mulțime de provocări, pentru inginerii structurali. Lucrarea lor este o scurtă trecere în revistă a problemelor geometrice și structurale corespunzătoare legate de acest subiect, prezentând Node Connectors for Single Layer Free-Form Structures și Double Layer Free-Form Structures.

H. Falter și colab. [16] au concluzionat în lucrarea „Beijing Airport Terminal3” că proiectele arhitecturale ale aeroportului Stansted și Chek Lap Kok au fost profund modelate de posibilitățile tehnice disponibile în anii 1980 pentru construirea de structuri spațiale expansive folosind oțel. Ulterior, progresele în tehnologia de fabricație au jucat un rol esențial

în proiectarea atât a acoperișului Airside Center din Zurich, cât și a acoperișului Terminalului 3 din Beijing, care au fost concepute ca structuri spațiale compuse din ferme spațiale.

S. Stephan și C. Stutzki, [17], introduc o metodologie de proiectare universală aplicabilă atât conexiunilor cu un singur șurub, cât și cu mai multe șuruburi ale grinzilor cu secțiuni transversale arbitrar cu pereți subțiri. Această metodologie este concepută pentru integrarea în programe de calculator. Abordarea se inspiră din algoritmul clasic de iterație a deformării pentru secțiuni transversale detaliate în [18]. Implică determinarea iterativă a capacității finale a îmbinărilor cu șuruburi prin calcule numerice care surprind distribuția tensiunilor elastic-plastice în cadrul elementelor de legătură. Metoda numerică constă în două etape: în primul rând, determinarea distribuției tensiunilor în cadrul imbinării pentru o combinație dată de forțe interne și, în al doilea rând, calcularea capacității finale a conexiunii.

În plus, lucrarea formulează ecuații de proiectare analitice special adaptate pentru conexiunile tuburilor cu mai multe șuruburi. Cercetarea culminează cu o analiză comparativă, în care rezultatele obținute din calcule numerice și analitice sunt puse în contrast cu rezultatele testelor experimentale corespunzătoare.

Conexiunile în linie sunt de obicei realizate prin metode de șuruburi, utilizând o placă de flanșă cu de obicei 4, 6 sau 8 șuruburi, o placă de îmbinare sau o placă de capăt. Placa de capăt poate fi ascunsă în spatele unei plăci de acoperire.

În plus, poate fi încorporată o placă de acoperire profilată pentru a se asigura că, conexiunea rămâne nevăzută.

În numeroase cazuri, este necesar să se raționalizeze imbinările sau să sporească eficiența, în special prin metode cu șuruburi, pentru a respecta programele de montaj. Având în vedere natura costisitoare a timpului macaralei, ascensoarele sunt adesea programate în timpul nopții, mai ales dacă este necesară închiderea străzilor sau autostrăzilor principale pentru a facilita accesul la proiect. În astfel de scenarii, optarea pentru o conexiune sudată poate să nu fie fezabilă din cauza constrângerilor de timp sau a accesului limitat.

Musée de Confluence, o capodopera arhitecturală din Lyon, Franța, proiectată de biroul de arhitectură Coop Himmelb(l)au, prezintă o fuziune avangardistă a designului computațional, principiilor biomimetice și tehnici avansate de inginerie. În timp ce arhitectul și-a imaginat fațada exterioară a clădirii ca fiind un nor, inginerii de la compania germană Josef-Gartner GmbH au avut sarcina dificilă de a transforma această formă de fațadă în realitate. Situat la confluența râurilor Rhône și Saône, forma dinamică și fluidă a muzeului provoacă normele convenționale prin modelare parametrică și algoritmi de calcul, permițând geometrii neliniare complicate care se armonizează cu contextul urban.



Fig.2.1 Musée de Confluence – Vedere izometrică (Frontal)

Fațada muzeului este o compoziție inovatoare de materiale, în primul rând sticlă și metal.

Utilizarea pe scară largă a geamurilor de înaltă performanță asigură iluminarea naturală și vederi optime, în timp ce placarea metalică acționează atât ca element de design, cât și ca sistem funcțional de umbrire, atenuând câștigul de căldură solară și sporind performanța termică.

Ca exemplu de astfel de „conexiune invizibilă”, două profile de oțel RHS 450x250x20 sunt prezentate mai jos. Plăcile de capăt sunt sudate în interiorul profilului cu un decalaj de 2 mm față de margine, având un spațiu minim de 4 mm atunci când sunt conectate între ele pentru a asigura transferul tensiunilor doar prin secțiunea transversală a profilelor. S-au folosit 8 șuruburi pretensionate și 2 orificii de acces, câte una pe fiecare parte a imbinării, acoperite de 2 plăci fixate cu șuruburi înecate. Profilele RHS au o teșitură de 1,5x1,5mm pe tot perimetrul secțiunii transversale. Acestea vor forma o formă de V care după procesul de pretensionare va fi completată cu o umplutură, șlefuită și vopsită. Același lucru se va întâmpla și cu golurile dintre plăcile de acoperire a găurilor de acces și profile și capul șuruburilor înecate.

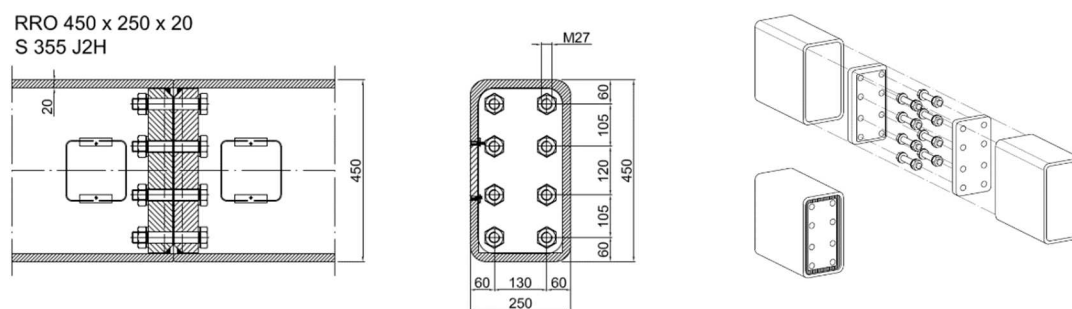


Fig.2.2 Imbinare “ascunsă” - RHS 450x250x20

Pentru a obține precizia necesară pentru o potrivire perfectă a componentelor imbinărilor ascunse, au fost utilizate tehnologii avansate de fabricație de vârf, inclusiv tăiere cu laser, prelucrare CNC și sudare robotizată.

În ciuda naturii lor ascunse, aceste imbinări din oțel joacă un rol crucial în asigurarea unui suport structural robust. Au fost efectuate analize și teste riguroase pentru a îndeplini standardele stricte de siguranță, oferind o clădire care nu este doar impresionantă din punct de vedere vizual, ci și sigură și stabilă..

### 3. RASPUNSUL STRUCTURAL AL ELEMENTELOR CU IMBINARI IN LINIE

Al 3-lea capitol se aprofundează în metodele de analiză a deformației elasto-plastice a elementelor îndoite.

Structurile, similare altor entități fizice, suferă deformații și își modifică forma atunci când sunt expuse la forțe. În cazul deformațiilor elastice — cele care revin la forma inițială odată ce structura nu mai este supusă eforturilor — sunt recunoscute diferite tehnici de calcul al deformațiilor. Aceste metode sunt clasificate în metode geometrice și metode energetice.

Explicația ecuației diferențiale consideră o grindă elastică dreaptă expusă la încărcare aleatorie, acționând perpendicular pe axa sa centrală și în planul de simetrie al secțiunii sale transversale. Suprafața neutră a stării deformate poartă numele de curbă elastică.

Metoda de integrare directă presupune exprimarea raportului dintre momentul încovoiător și rigiditatea la încovoiere a grinzii ( $M/EI$ ) în funcție de distanța  $x$  de-a lungul axei grinzii. Această expresie este apoi integrată succesiv pentru a obține ecuații pentru panta și deformarea curbei elastice. Constantele de integrare sunt determinate luând în considerare

condițiile limită. Această metodă este deosebit de eficientă pentru calcularea pantelor și deformațiilor grinzilor atunci când  $M/EI$  poate fi reprezentat ca o funcție continuă a  $x$  pe toată lungimea grinzii. Cu toate acestea, metoda de integrare directă devine mai puțin simplă atunci când este aplicată structurilor în care funcția  $M/EI$  nu este continuă. Această complexitate apare deoarece fiecare discontinuitate, rezultată din modificări ale încărcării și/sau rigidității la încovoiere ( $EI$ ), introduce două constante suplimentare de integrare în analiză. Aceste constante trebuie evaluate prin aplicarea condițiilor de continuitate a curbei elastice, proces care poate fi laborios. Pentru a face față acestei provocări, utilizarea funcțiilor de singularitate, așa cum sunt definite în multe manuale de mecanică a materialelor, poate oferi o soluție și simplifica analiza.

Charles E. Greene a introdus metoda moment-zonă pentru calcularea pantelor și a deformațiilor grinzilor în 1873. Această abordare se bazează pe două teoreme, cunoscute sub numele de teoreme moment-arie, care stabilesc o legătură între geometria curbei elastice și diagrama  $M/EI$  a acesteia. . Acesta din urmă este creată prin împărțirea ordonatelor diagramei momentului încovoiator la rigiditatea la încovoiere  $EI$ . Metoda moment-arie folosește interpretări grafice ale integralelor implicate în rezolvarea ecuației diferențiale de deformare, utilizând ariile și momentele ariilor din diagrama  $M/EI$ . Acest lucru îl face deosebit de avantajos pentru grinzile cu discontinuități de încărcare și  $EI$  variabil în comparație cu metoda de integrare directă descrisă anterior.

Metoda fasciculului conjugat, introdusă de Otto Mohr în 1868, oferă în general o modalitate mai convenabilă de a calcula pantele și deviațiile grinzilor în comparație cu metoda moment-arie. Deși ambele metode necesită efort de calcul similar, metoda fasciculului conjugat este preferată de mulți ingineri datorită convenției sistematice a semnelor și ușurinței de utilizare. Spre deosebire de metoda moment-zonă, aceasta nu necesită schițarea curbei elastice a structurii.

Metoda grinzii conjugate se bazează pe analogia dintre relațiile de sarcină, forfecare și moment încovoiator cu cele dintre  $M/EI$ , panta și deformare.

Principiul deplasărilor virtuale pentru corpurile rigide poate fi enunțat după cum urmează:

„Dacă un corp rigid este în echilibru sub un sistem de forțe și dacă este supus oricărei mici deplasări virtuale a corpului rigid, munca virtuală efectuată de forțele externe este zero” [50].

În această secțiune, explorăm o altă metodă energetică pentru calcularea deformațiilor structurale. Această metodă, aplicabilă numai structurilor liniar elastice, a fost introdusă pentru prima dată de Alberto Castigliano în 1873 și este cunoscută pe scară largă ca a doua teoremă a lui Castigliano. (Prima teoremă a lui Castigliano, care ajută la stabilirea ecuațiilor de echilibru ale structurilor, nu este tratată în acest text.) A doua teoremă a lui Castigliano este articulată după cum urmează:

„Pentru structurile liniar elastice, derivata parțială a energiei de deformare în raport cu o forță (sau cuplu) aplicată este egală cu deplasarea (sau rotația) forței (sau cuplului) de-a lungul liniei sale de acțiune”.

Etapa de îndoire elasto-plastică reprezintă momentul în care mai multe fibre ating limita de curgere. Pentru curba idealizată efort-deformare (plastic elastic-perfect), materialul nu poate suporta o tensiune mai mare decât efortul de curgere, iar fibrele la limita de curgere progresează spre interior, spre centrul grinzii. Pe secțiune transversală există o regiune elastică și o regiune plastică. Raportul dintre adâncimea miezului elastic și regiunea plastică poate lua valori de la 1 la 0. Deoarece se aplică un moment încovoiator suplimentar și nicio efort nu este mai mare decât efortul de curgere, are loc o rotație suplimentară a secțiunii: momentul-rotație curba își pierde liniaritatea și curba, dând mai multă rotație pe unitate de moment, care este exprimată calitativ ca pierderea rigidității.

Când toate fibrele din secțiunea transversală au atins limita de producție, secțiunea a atins stadiul de Capacitate de moment plastic. În acest moment elementul își mărește rotația fără nicio creștere a capacității portante.

Dacă materialul este capabil să se întărească, se observă o creștere a capacității portante, în caz contrar, odată atinsă capacitatea momentului plastic, secțiunea se poate roti liber asemănător unei balamale dar având un moment concentrat în acea secțiune.

Când se analizează o secțiune pentru răspunsul plastic, sunt de interes două caracteristici, și anume: modulul secțiunii plastice,  $W_{pl}$  și factorul de formă  $f$ .

Având în vedere codurile de proiectare, analiza plastică este discutată în codul european de proiectare a structurilor din oțel EN 1993-1-1 [13] din punct de vedere al analizei globale. Dacă sarcina critică elastică de flambaj pentru modul de instabilitate globală bazată pe rigiditățile elastice inițiale ( $F_{cr}$ ) este de 15 ori mai mare decât sarcina de proiectare a structurii ( $F_{Ed}$ ), se poate efectua o analiză plastică.

Analiza plastică globală poate fi aplicată exclusiv atunci când structura prezintă o capacitate de rotație adecvată la pozițiile specifice ale balamalelor din plastic, indiferent dacă acestea sunt în interiorul elementelor sau la îmbinări.

Ca o abordare simplificată pentru o redistribuire plastică restrânsă a momentelor în grinzi continue, în care momentele de vârf depășesc rezistența maximă de încovoiere plastică de 15% în urma unei analize elastice, porțiunile în exces dincolo de aceste momente de vârf pot fi redistribuite în cadrul oricărui element.

Una dintre condițiile pe care trebuie să le îndeplinească elementul este să fie de clasa 1 sau clasa 2. Clasificarea secțiunilor transversale are ca scop determinarea gradului în care rezistența locală la flambaj constrânge rezistența și capacitatea de rotație a secțiunilor transversale. Eurocod 3 [13] clasifică secțiunea transversală în patru clase:

- Secțiunile transversale de clasa 1 sunt cele care pot forma o balama plastică cu capacitatea de rotație necesară analizei plastice fără reducerea rezistenței.
- Secțiunile transversale de clasa 2 sunt cele care își pot dezvolta rezistența la moment plastic, dar au o capacitate de rotație limitată din cauza flambajului local.
- Secțiunile transversale de clasa 3 sunt acelea în care solicitarea din fibra de compresie extremă a elementului de oțel presupunând o distribuție elastică a tensiunilor poate atinge limita de curgere, dar flambajul local este susceptibil să împiedice dezvoltarea momentului plastic de rezistență.
- Secțiunile transversale de clasa 4 sunt acelea în care flambajul local va avea loc înainte de atingerea limitei de curgere în una sau mai multe părți ale secțiunii transversale.

#### 4. INCERCARI EXPERIMENTALE

În faza preliminară, studiul a pornit de la utilizarea programului GAS\_WIN dezvoltat de Knebel pe baza metodei de proiectare a cadrelor spațiale propusă de Stephan și Stutzki [17] care face o analiză elastică a îmbinărilor de continuitate, încastrate, ale profilelor tubulare. Această metodă nu oferă însă informații despre comportamentul îmbinării în ceea ce privește deformațiile, în special despre separarea profilelor îmbinării.

Utilizarea programelor cu elemente finite poate fi o soluție în obținerea acestor rezultate, dar corectitudinea datelor inițiale și a modelului de analiză poate fi validată doar pe baza unor teste experimentale..

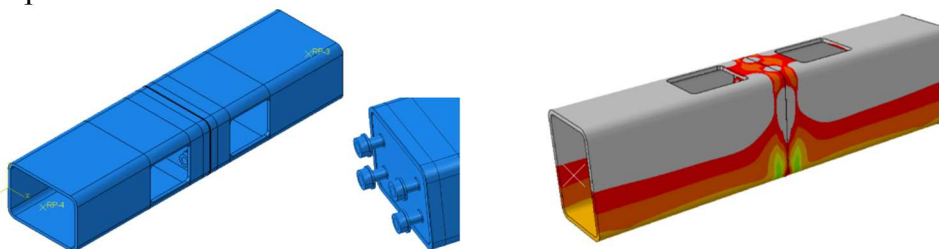


Fig.4.1 a) Model FEA al imbinarii, b) Distributia tensiunilor (moment negativ)

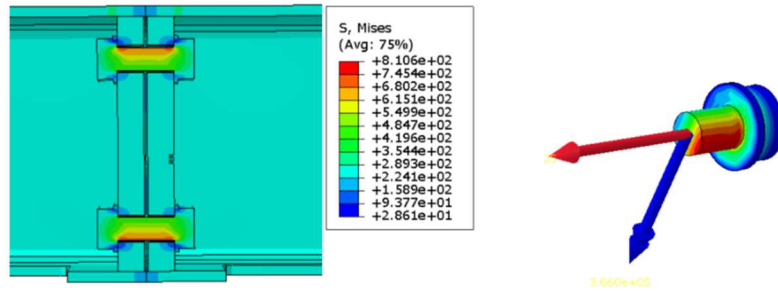


Fig.4.2 a) Tensiunile din imbinare b) Fortele interne in surub

Rezultatele obtinute au evidentiat scaderea rigiditatii atat datorita rostului cat si datorita sectiunii transversale reduse in zona orificiilor de acces pentru imbinare. Scopul testelor experimentale este obținerea de înregistrări care stau la baza validării modelelor numerice în analiza cu elemente finite. Odată cu validarea modelelor numerice se poate realiza un studiu parametric al acestor îmbinări în care se pot studia separarea elementelor, pretensionarea șuruburilor, deformațiile elementelor îmbinate și relația forță axială-moment încovoietor.

În practică, sunt utilizate atât profile tubulare dreptunghiulare, cât și circulare, astfel încât testele experimentale includ ambele tipuri de profile. Pe fiecare tip de profil au fost efectuate două teste cvasistatice, una monotonă și una ciclică, în configurația prezentată în Fig.4.4.

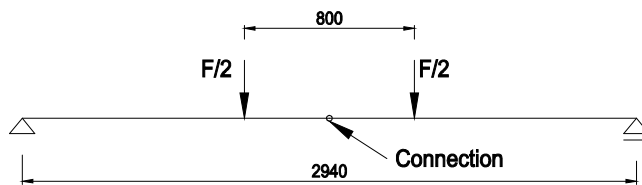


Fig.4.3 Schema statica

Epruvetele testate au fost realizate prin imbinarea a doua elemente cu aceeasi sectiune, avand profilele RHS 250x150x8, respectiv CHS 114.3x10. Numele lor a fost ales în funcție de tipul de profil RHS sau CHS urmat de numărul testului.

Desenele de execuție sunt prezentate în Fig.4.4 și Fig.4.5. Fiecare specimen are orificii de acces pentru strângerea îmbinărilor cu șuruburi de mare rezistență. Datorită capacității mai mici, s-a ales poziția de sus a orificiilor de acces.

Inainte de testarea ansamblurilor s-au facut masuratori pentru a determina dimensiunile reale ale profilelor.



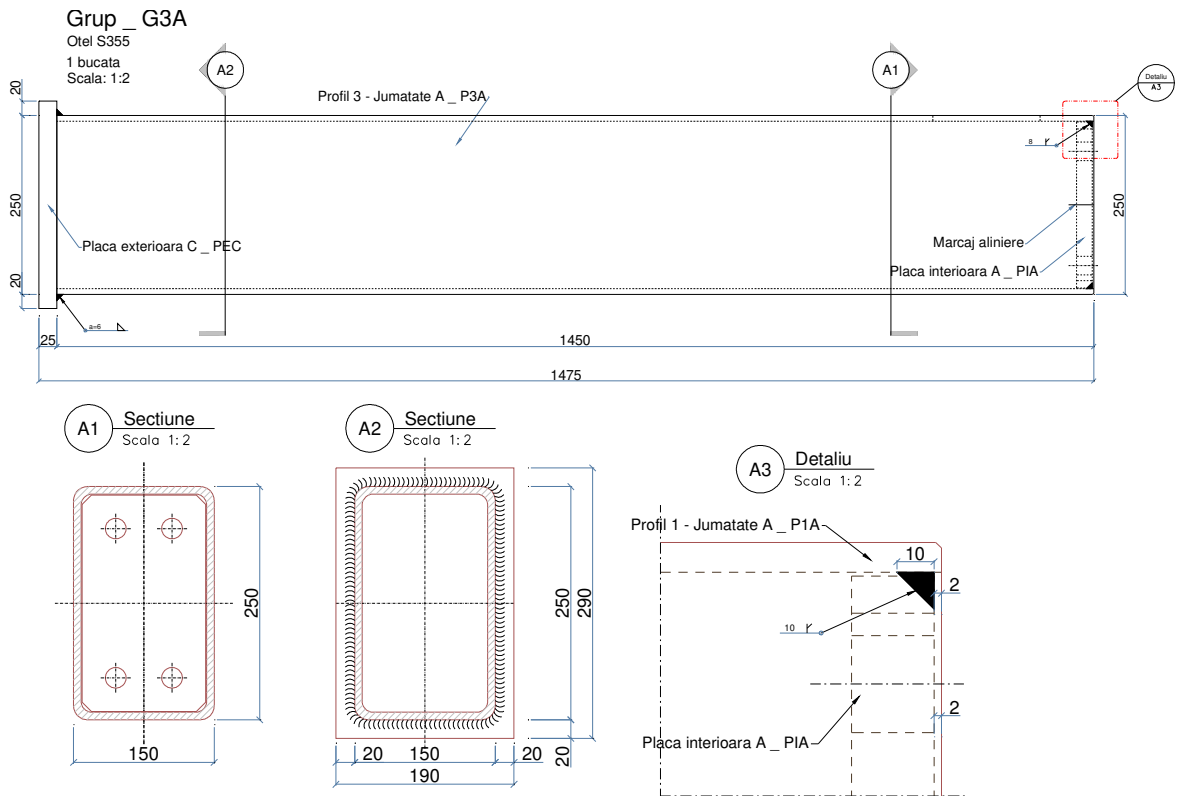


Fig.4.4 Desene fabricatie RHS250x150x8

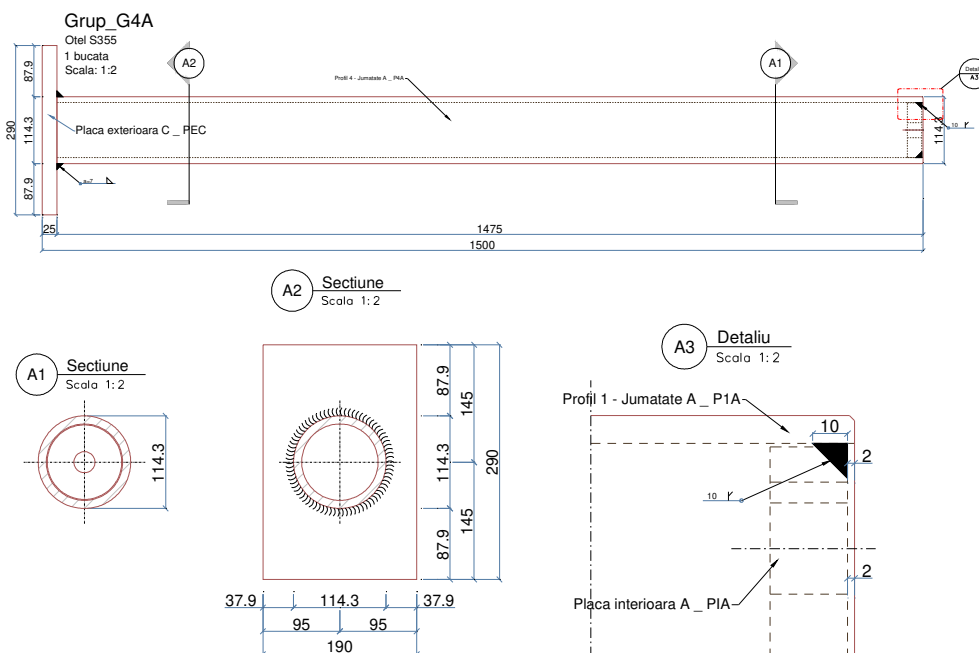


Fig.4.5 Desene fabricatie CHS114.3x10

Șuruburile folosite la îmbinări au fost M20 gr 10,9 pentru RHS și M24 gr 10,9 pentru CHS, EN 14399.

Împerecherea probelor este o condiție obligatorie pentru o presiune constantă în îmbinare și pentru a obține o potrivire perfectă, piesele au fost notate cu A și B, prezentate în Fig.4.6 și luate în considerare pentru asamblarea finală a specimenului.



Fig.4.6 Marcarea elementelor pentru a obtine perechi

Din profilele de testat au fost extrase probe pentru încercări de tracțiune conform ISO 6892-1 [20].

Preîncărcarea șurubului a fost evaluată separat pentru a verifica cheia dinamometrică. Cinci șuruburi au fost preîncărcate și au măsurat forța în șuruburi de o celulă de sarcină universală a mașinii de testare

Încercările asupra ansamblurilor cu șuruburi au fost efectuate în Laboratorul Departamentului de Structuri din Oțel și Mecanica Structurală, în cadrul încercărilor 2D.

În cadrul experimental s-a montat un actuator de 500kN de direcție verticală și s-au poziționat suporturile ansamblului la distanța corectă. Pentru a evita deplasările în afara planului motorului, a fost construită o structură independentă, Fig.4.7.

Suporturile epruvetelor obținute din piese de oțel și au permis rotația și deplasarea orizontală astfel încât schema statică să poată fi considerată ca o grindă cu suport cu știfturi și role.

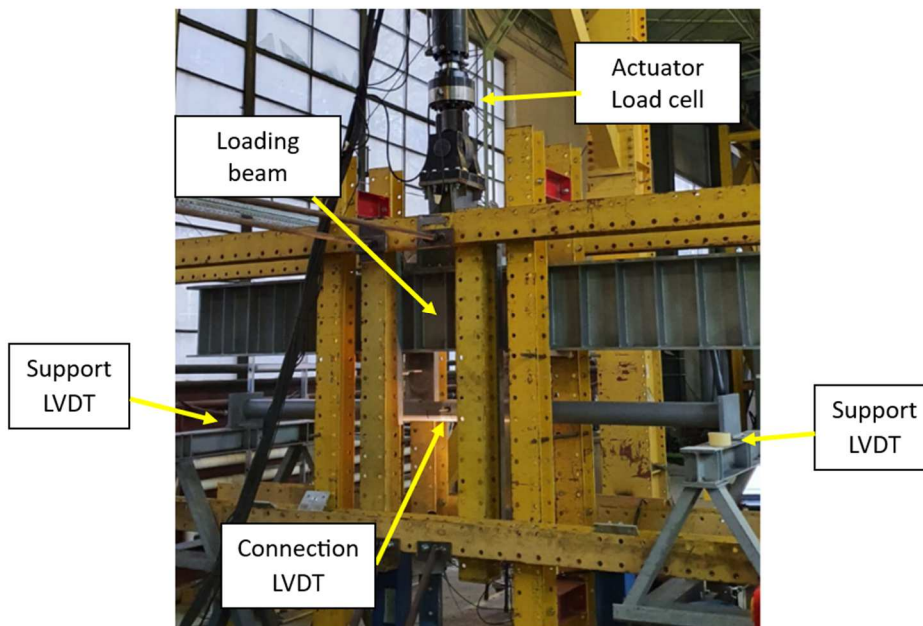


Fig.4.7 Configurarea testului

Transmiterea forțelor de încărcare s-a realizat prin intermediul unor dispozitive care permiteau rotirea liberă a punctelor de încărcare. În cazul profilelor RHS, dispozitivul conține o rolă și plăci de oțel de 8 mm pentru a distribui sarcina pe toată lățimea flanșei superioare), în timp ce pentru profilele CHS a fost decupată o piesă de oțel pentru a transmite sarcinile la conturul superior. a profilului.

Datele înregistrate au constat în monitorizarea forței de încărcare și a deplasării capului actuatorului, a datelor obținute de la celula de sarcină a actuatorului și, respectiv, a deplasărilor de la LVDT (transductoare de deplasare liniară variabilă) poziționate lângă suporturi.

În plus, a fost utilizat un sistem de monitorizare optică bazat pe tehnica Digital Image Correlation (DIC). Cu ajutorul acestuia sunt monitorizate deformările care apar în zona monitorizată, dar și deplasări între punctele de referință. Monitorizarea a fost efectuată pe zona extinsă a îmbinării cu șuruburi de la talpa inferioară. Pentru monitorizare este necesară o suprafață cu contrast de suprafață, așa că a fost aplicat un strat de vopsea albă mată peste care au fost create modelele de pete.

Rezultatele curente conțin atât informații calitative, comportament și mod de cedare, cât și rezultate cantitative, curbe de forță de deplasare înregistrate de actuator și LVDT-uri.

În timpul încărcării nu s-au observat deformații ale pereților în secțiune transversală în apropierea orificiilor de acces prevăzute pentru strângerea șuruburilor de îmbinare. Cedarea s-a produs prin îndepărtarea firului, fără o cedare fragilă.

Rezultatele calitative constau din curbele forță-deplasare pe baza cărora va fi calibrat modelul numeric. Deplasarea constă în diferența dintre deplasarea verticală a îmbinării și media deplasărilor suporturilor. Pentru profilele RHS curba F-D este.

Separările dintre îmbinarea celor două profile, au fost obținute din înregistrările DIC. Se observă că cele două exemplare prezintă valori foarte apropiate ale separării articulațiilor. De asemenea, sistemul de monitorizare optică poate oferi informații despre distribuția tulpinilor specifice în zona articulației.

Imaginile au fost programate pentru a fi înregistrate la fiecare 2 secunde și doar fiecare a 100-a imagine este afișată aici.

S-a observat că după cedarea filetelui, zona monitorizată prezintă tensiuni de întindere pozitive. Explicația unui astfel de răspuns poate fi găsită fie în deformarea plastică, fie, mai probabil, deformările de compresiune cauzate de pretensionarea șuruburilor, care nu sunt luate în considerare de DIC, se transformă în deformări pozitive după cedare. Din păcate, amplitudinea acestor deformații nu este cunoscută deoarece ruperea filetelui este încă supusă forței. Dacă urmează a fi cuantificate aceste deformații, imaginea DIC de referință trebuie luată înainte de precompresie, dar întrucât acest proces implică deplasări ale specimenului, tehnica este aproape imposibilă. O metodă de evaluare a acestor deformații poate fi găsită în soluția de analiză numerică, care va fi prezentată în capitolele următoare.

Încercările ciclice au fost efectuate pentru a observa comportamentul îmbinării, separarea îmbinării, după mai multe cicluri de încărcare. A fost luat în considerare un protocol de teste pulsative cu o amplitudine de aproximativ 50% din testele monotone. Protocolul pulsatoriu reprezintă încărcarea structurii la o anumită forță și descărcarea specimenului la o solicitare nulă. Pentru fiecare direcție de forță (încărcare și descărcare), a fost ales un interval de 10 s, rezultând o rată de încărcare de 0,05 Hz pe ciclu. Acest lucru a permis sistemului de monitorizare DIC să înregistreze separarea articulațiilor, dL. Pentru fiecare specimen, au fost efectuate un număr total de 500 de cicluri.

## **5. ANALIZA NUMERICA**

A fost definit un model cu elemente finite pentru a observa răspunsul articulației și pentru investigații parametrice. Analiza a fost efectuată folosind Abaqus [25]. Elementele solide 3D au fost definite ca părți ale ansamblului pentru profilul RHS, placa de capăt de conectare și respectiv șurubul, Fig.5.1, [22].

Deși configurația de testare prezintă un plan de simetrie, întregul specimen experimental a fost modelat, Fig.5.2. [22].

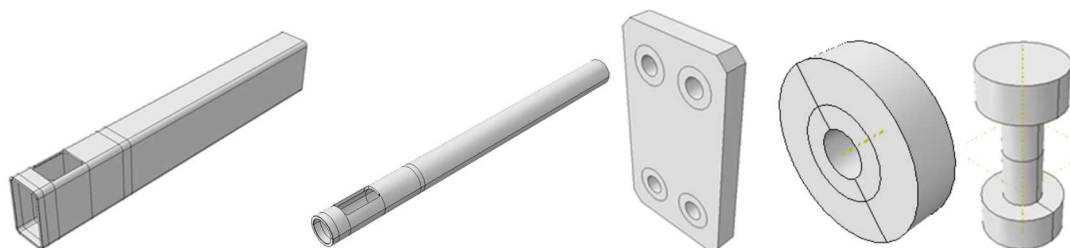


Fig.5.1 Definirea partilor RHS si CHS in modelul FEM, [22]

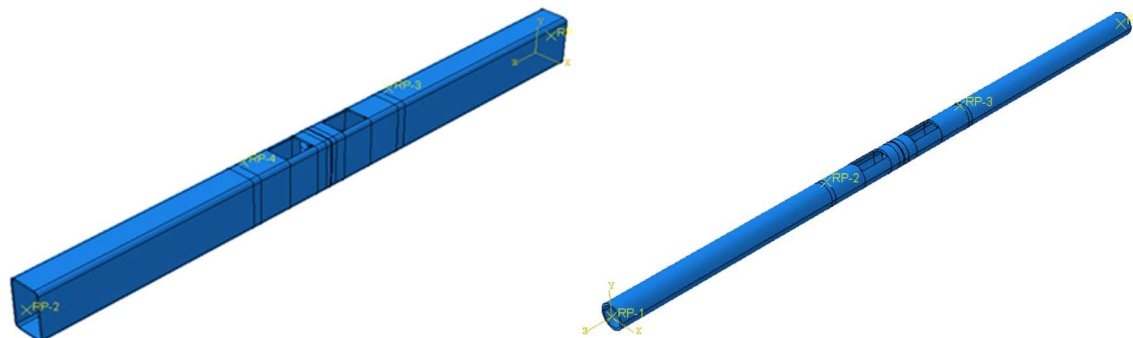


Fig.5.2 Ansamblul RHS si CHS in modelul FEM, [22]

Proprietățile materialului au fost luate în considerare din încercările de tracțiune efectuate pe specimen extras din profilul RHS și din materialul suruburilor. În modelul FEM, modelul plastic a fost utilizat luând în considerare o curbă biliniară. Piesa elastică este definită de modulul de elasticitate,  $210000\text{N/mm}^2$ , în timp ce partea plastică este considerată a fi între limita de curgere și rezistența la tracțiune,  $441\text{--}553\text{N/mm}^2$ ,  $396\text{--}516\text{N/mm}^2$  și  $1104\text{--}1177\text{N/mm}^2$  pentru RHS, placa de capăt și respectiv șurubul. Aceste valori au fost transformate în efort real folosind relația furnizată de Eurocod 1993-1-5 [21], conducând la o rezistență la tracțiune de  $605\text{N/mm}^2$ ,  $557\text{N/mm}^2$  și  $1231\text{N/mm}^2$ , pentru RHS, placa de capăt și șurub, respectiv, [22].

La capetele ansamblului au fost definite un suport cu știfturi și un suport de role, în timp ce o deplasare de  $30\text{mm}$  a fost definită folosind puncte de referință în pozițiile de încărcare punctuală.

Aceste patru puncte de referință au fost conectate la ansamblu prin cuplare cinematică pentru secțiunea transversală RHS și zona de încărcare.

Placa de capăt de conectare a fost conectată la profilul RHS utilizând constrângerea Tie. Este necesar să se definească interacțiunea de contact suplimentară între șuruburi și placa de capăt și între cele două profile RHS care sunt în contact.

Interacțiunea de contact a fost definită pentru comportamentul normal și tangențial, permițând separarea după contact. Contactul tangențial a fost definit cu un coeficient de frecare de  $0,1$ .

Fiecare parte a fost îmbinată cu element finit C3D8R (o cărămidă liniară cu 8 noduri, integrare redusă, control clepsidră). Dimensiunea elementului a fost de aproximativ  $5\text{mm}$ , permițând 2 elemente pe grosimea elementului RHS. Pentru a reduce timpul de calcul, lungimea elementului finit pe direcția longitudinală a fost mărită, [22].

Pentru șuruburi, o preîncărcare de  $130\text{kN}$  a fost definită într-o etapă separată înainte de sarcina aplicată, analizată într-o etapă Statică. Propagarea de preîncărcare a fost modificată la „Fixat la lungimea curentă” pentru următoarele etape de analiză, pentru a permite dezvoltarea tensiunilor interne în șuruburi din cauza îndoirii epruvetei. Valoarea preîncărcării este apropiată de valoarea determinată în programul experimental pentru cheia dinamometrică, Tabel 4.2

Prin efectuarea analizei cu elemente finite se compară curba forță-deplasare cu cea

obținută în urma experimentului.

Se obține o corespondență foarte bună pentru rigiditatea inițială a ansamblului. Deși, forța maximă este în intervalul de 10% mai puțin cauzată de o scădere a rigidității modelului FEM, modelul este considerat a fi valabil pentru studii ulterioare asupra influenței preîncărcării, grosimii plăcii de capăt sau orificiului de acces.

Un fenomen important prezentat de model este distribuția neuniformă a presiunii între profilele RHS precum și îndoirea șuruburilor deja dezvoltate în etapa de preîncărcare. Deși placa de capăt este foarte groasă, de 25 mm, îndoirea plăcii duce la o presiune neuniformă a capului șurubului, astfel, la îndoirea tijei șurubului.

Prin extragerea deplasărilor longitudinale ale nodurilor apropiate de legătură și adăugarea valorii absolute a deplasărilor celor două noduri s-a obținut separarea articulației. De menționat că presarcina a introdus o deformare inițială de 0,045 mm. Această valoare a fost scăzută din separarea finală a îmbinării deoarece deformațiile din experiment nu au fost incluse în înregistrările sistemului DIC.

S-a realizat un studiu parametric luând în considerare efectul de conectare, efectul de găuri de mână, efectul de preîncărcare a șurubului, efectul de grosime a plăcii de capăt, poziția efectului de găuri de acces și efectul de forță axială.

## 6. RECOMANDARI ÎN PROIECTARE

### Recomandări calitative

Pregătirea îmbinării în linie reprezintă un rol important pentru estetica conexiunii. Datorită posibilității de a obține tăieturi neperpendiculare pe axa elementului, conexiunea trebuie să utilizeze elementele aceleiași tăieturi care trebuie marcate astfel încât ansamblul să fie conectat cap la cap.

În plus, datorită toleranței orificiului șurubului, conexiunea poate avea alunecări, astfel încât trebuie utilizată o clemă care susține ambele elemente conectate până când preîncărcarea șurubului stabilizează legătura prin frecare.

În ceea ce privește orificiul de acces, pentru a evita concentrarea mare a tensiunilor, este obligatorie o rază de curbura între marginile orificiului de acces.

Dimensiunile orificiului de acces trebuie proiectate în conformitate cu uneltele utilizate pentru preîncărcarea șuruburilor, adică cheia dinamometrică sau echipamentul de precomprimare a șuruburilor hidraulice.

Deoarece orificiul de acces reduce capacitatea profilului, dimensiunile proiectate trebuie asigurate. De asemenea, în funcție de forma profilului și de factorul de utilizare al profilului, poate apărea flambaj local (mai ales pentru secțiuni goale dreptunghiulare). Poziția plăcii de capăt este considerată în interiorul secțiunii goale, la 2 mm distanță de planul de tăiere. Cu toate acestea, această distanță ar trebui să fie o funcție aleasă cu grijă a tipului de sudare (sudură de colț sau placă teșită) între placa de capăt și fața interioară a tubului. Dacă distanța este prea mică pentru o sudură în colț, gâtul de sudare se poate extinde pe cealaltă parte a planului de tăiere.

După cum sa discutat, grosimea peretelui se poate deforma dacă grosimea sa este prea mică sau dacă placa de capăt este prea subțire și se deformează sub sarcina șurubului. Capacitatea elementului depinde de înălțimea profilului și de grosimea peretelui. Pentru o proiectare economică, această capacitate a momentului încovoietor ar trebui să aibă o valoare apropiată de capacitatea îmbinării cu șuruburi. În cazul unei plăci de capăt groase, îndoirea peretelui elementului va fi de neglijat.

Modul de cedare al îmbinării testate a arătat două tipuri diferite, de ex. dezlipirea filetelor și ruperea tijei șurubului. EN 14399-1-2015 [23], descrie două tipuri de ansambluri de șuruburi, adică HR și HV. Ansamblul tip HR este proiectat pentru a obține ductilitate

predominant prin alungirea plastică a șurubului având o înălțime minimă a piuliței  $\geq 0,9 D$  și lungimi lungi ale filetului, cu specificații conform EN14399-3, [26]. Tipul HV este proiectat pentru a obține ductilitate predominant prin deformarea plastică a fileturilor angrenate având înălțimea piuliței la aproximativ  $0,8 D$ . Ansamblul HV eșuează în general prin îndepărtarea filetului pe toată lungimea filetului tijei, permițând menținerea unei anumite cantități de rezistență chiar și după cedare în timp ce HR are un rezultat de cedare mai fragil. Cu toate acestea, așa cum se arată în secțiunea de testare experimentală actuală, deși s-au folosit ansambluri HV pentru conexiune, specimenul cu un șurub în conexiune a cedat în mod exploziv, fără semne de îndepărtare a filetului. Această cedare a ansamblului HV în imbinarea curentă este asociată cu efectul de îndoire mare care a determinat inițierea unei concentrări de tensiuni în filet.

Astfel, pentru a evita cedarea bruscă a conexiunii se recomandă utilizarea șuruburilor de tip HV conform EN14399-4, [24].

### **Recomandari cantitative**

În scopuri practice, răspunsul unei conexiuni este stabilit în mod obișnuit prin utilizarea metodei componentelor. Această metodă analitică oferă rezultate fiabile pentru stabilirea curbelor forță-deplasare ale îmbinărilor semirigide. Eurocod 3, partea 1-8, [4] prezintă 20 de componente care pot fi calculate pentru rezistența și rigiditatea lor.

Pornind de la geometria conexiunii, pentru imbinarea RHS curenta se au în vedere următoarele componente: bolț în tensiune (bt), placa de capăt în încovoiere (epb) al doilea rând de șuruburi (bt'), momentul de încovoiere inferior al capătului- placa (epb') va fi luată în considerare. Pentru conexiunea CHS sunt luate în considerare numai șurubul în tensiune (bt), placa de capăt în îndoire (epb) și peretele grinzii în tensiune (bwt).

În acest subcapitol sunt calculate următoarele: rezistența imbinării, rigiditatea imbinării atât pentru RHS, cât și pentru CHS.

## **7. CONCLUZII**

Dezvoltarea tensiunilor neobservabile și deformațiile părților structurale implicate într-un ansamblu reprezintă comportamentul în profunzime al unei imbinari. Scopul acestei cercetări este de a evidenția răspunsul unei imbinari în linie a secțiunii tubulare cu placa de capăt interioară.

Lucrarea de cercetare se concentrează pe trei părți principale:

- Teste experimentale privind imbinarea în linie a secțiunilor tubulare dreptunghiulare și circulare

- Analize numerice (validarea unui model numeric și a unui studiu parametric)

- Ghid de proiectare pentru imbinarea în linie.

Pornind de la trecerea în revistă a literaturii privind imbinările „invizibile” care pot transmite forțe interne combinate, cercetarea a evidențiat posibilele configurații ale conexiunilor continue. Poziția unei astfel de îmbinări într-o structură este importantă, iar tehnologia utilizării îmbinărilor „invizibile”, cu șuruburi situate în interiorul secțiunilor tubulare implică anumite restricții de asamblare și rigiditate la încovoiere limitată deoarece majoritatea acestor îmbinări sunt utilizate pentru transmiterea forțelor axiale.

Informațiile privind reglementările de proiectare pentru oțelul arhitectural și modul în care imbinările ar trebui tratate și prelucrate în funcție de impactul vizual asupra observatorului sunt reiterate de autor. Aceasta este urmată de o explicație a tipurilor de imbinari în linie și un studiu de caz practic despre modul în care a fost utilizată conexiunea în linie într-o structură.

Deoarece o parte importantă a conexiunii este reprezentată de deformarea acesteia, este prezentată o listă cuprinzătoare de metode de calcul a deformării, care este utilizată

pentru a arăta o comparație între relațiile analitice și rezultatele experimentale. Comparația arată importanța imbinarilor în linie în determinarea comportamentului real al structurilor.

Rezultatele programului experimental au oferit baza studiului numeric, pentru validarea modelului și analizele parametrice. Cu toate acestea, asamblarea specimenului a arătat că, chiar dacă elementele sunt perfect tăiate, alinierea elementelor conectate depinde de toleranța găurilor pentru șuruburi.

Datorită poziției șuruburilor, în interiorul perimetrului secțiunii, pentru o proiectare rațională, toate imbinările depind de capacitatea șuruburilor. Se recomandă utilizarea tipului de șuruburi HR, deoarece îndepărtarea filetelui șuruburilor menține o anumită rezistență.

Analizele numerice au evidențiat o influență mică a preîncărcării șurubului și a poziției orificiului de mână, în timp ce o mare importanță în capacitatea îmbinării sunt rezistența șurubului și grosimea plăcii de capăt.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] I. Vayas, J. Ermopoulos, and H. Pasternak, "Design of steel frames with slender joint-panels," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 35, no. 2, pp. 165–187, Jan. 1995, doi: 10.1016/0143-974X(94)00034-F.
- [2] J. B. P. Lim and D. A. Nethercot, "Stiffness prediction for bolted moment-connections between cold-formed steel members," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 60, no. 1, pp. 85–107, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0143-974X(03)00105-6.
- [3] K. F. Chung and L. Lau, "Experimental investigation on bolted moment connections among cold formed steel members," *Engineering Structures*, vol. 21, no. 10, pp. 898–911, Oct. 1999, doi: 10.1016/S0141-0296(98)00043-1.
- [4] CEN, "EN 1993-1-8 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints," 2005.
- [5] C.E.N., "EN 1994-1-1:2004 - Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures," 2004.
- [6] J.-F. Démonceau, F. Cerfontaine, and J.-P. Jaspart, "Resistance of steel and composite connections under combined axial force and bending including group effects: Analytical procedures and comparison with laboratory tests," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 160, pp. 320–331, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.05.030.
- [7] P. Nogueiro, L. Silva, N. Silvestre, and D. Camotim, "Non-linear behavior of pitched-roof frames with bi-linear semi-rigid connections," presented at the Proceedings - Annual Technical Session, Structural Stability Research Council, 2000.
- [13] CEN, "EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings," Brussels, 2005.
- [14] T. Mähr, M. Espinha, and R. Ziegler, "03.12: Global structural modelling of space frame structures with consideration of joint behaviour: An integral analysis approach," *ce/papers*, vol. 1, no. 2–3, Art. no. 2–3, 2017, doi: 10.1002/cepa.97.
- [15] S. Stephan, J. Sanchez-Alvarez, and K. Knebel, "Reticulated Structures on Free-Form Surfaces," Jan. 2004.
- [16] M. Manning et al., "Beijing Airport Terminal 3." Accessed: Dec. 16, 2023. [Online]. Available: [https://www.ernst-und-sohn.de/app/artikelrecherche/artikel.php?lang=de&ID=25131&utm\\_source=eus&utm\\_medium=artikel-db&utm\\_campaign=StCo\\_2009\\_1](https://www.ernst-und-sohn.de/app/artikelrecherche/artikel.php?lang=de&ID=25131&utm_source=eus&utm_medium=artikel-db&utm_campaign=StCo_2009_1)
- [17] S. Stephan and C. Stutzki, "A General Method for the Design of Bolted Connections for Space Frames," presented at the Fifth International Conference on Space Structures, Guildford, UK, 2002.
- [18] R. Kindmann and J. Frickel, *Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit*. 2017.

- [19] A. Kassimali, Structural analysis, Fourth edition. USA: Cengage Learning, 2011.
- [20] ISO, “ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.” 2016.
- [21] CEN, “EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements,” Brussels, 2006.
- [22] C.-I. Birdean, I. Both, I. Marginean, and A. Cernescu, “Numerical analysis of an in-line connection for hollow sections,” Procedia Structural Integrity, vol. 47, pp. 87–93, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.06.045.
- [23] CEN, “EN 14399-1:2015 -High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 1: General requirements,” 2018.
- [24] CEN, “EN 14399-4:2015. High-strength structural bolting assemblies for preloading - System HV. Hexagon bolt and nut assemblies,” 2015.
- [25] Dassault Systemes, Abaqus 6.14 Documentation. Providence, RI,: Simulia Systems, 2014.
- [26] CEN, “EN 14399-3:2015. High-strength structural bolting assemblies for preloading - System HR. Hexagon bolt and nut assemblies.”