

Domeniul de Inginerie Civilă și Instalații

**TEZĂ DE DOCTORAT**  
**- REZUMAT -**

**Comportarea îmbinărilor grindă-  
stâlp cu placă de capăt extinsă și  
patru șuruburi pe rând**

**Ing. Daniel Luís NUNES**

Președinte de comisie:	Prof. dr. ing. Raul ZAHARIA
Conducător de doctorat:	Prof. dr. ing. Adrian CIUTINA
Comisie de susținere:	Prof. dr. ing. Carlos REBELO
	Conf. dr. ing. Bogdan ȘTEFĂNESCU
	Prof. dr. ing. Florea DINU

Timișoara  
- 2024 -

## CUPRINS

1.	INTRODUCERE .....	3
2.	STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU .....	5
2.1.	Normative existente .....	7
3.	ABORDAREA PRELIMINARĂ A ÎMBINĂRILOR CU 4 ȘURUBURI-PE-RÂND..	10
3.1.	Comportarea globală a îmbinărilor rezistente la momente încovoietoare .....	10
3.2.	Studiu pe macro-componente .....	12
4.	PROGRAM EXPERIMENTAL PE MACRO-COMPONENTE .....	16
5.	STUDII NUMERICE .....	22
5.1.	Studiu parametric.....	22
5.2.	Capacitatea de rotire .....	28
5.3.	Influenta variației lățimii tălpii de grindă în configurațiile 4B .....	29
5.4.	Parametrul de validitate .....	32
5.5.	Concluzii .....	32
6.	ROBUSTEȚEA CADRELOR METALICA NECONTRAVÂNTUITE CU ÎMBINĂRI REZILIENTE .....	35
6.1.	Evaluarea robusteții.....	35
6.2.	Concluzii .....	38
7.	CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRII .....	40
7.1.	Cercetări ulterioare.....	42
	REFERINȚE BIBLIOGRAFICE .....	42

# 1. INTRODUCERE

În domeniul construcțiilor metalice, importanța îmbinărilor metalice este de primă importanță, servind ca element de legătură dintre componentele individuale dintr-o structură care lucrează unită. Aceste îmbinări, adesea realizate cu ajutorul șuruburilor și sudurilor, joacă un rol crucial în transmiterea eforturilor interne, în dezvoltarea articulațiilor plastice și asigurarea stabilității generale. Importanța îmbinărilor metalice devine particular importantă în contextul comportamentului structurilor metalice la încărcări și condiții extreme. Ele sunt sisteme de legătură critice în cazul forțelor concentrate, redistribuite sau disipate, influențând direct răspunsul structural la încărcări exterioare utile, vânt, activitate seismică și chiar evenimente accidentale precum încărcărilor excepționale din explozii sau impact. Înțelegerea comportamentului îmbinărilor metalice este, prin urmare, esențială pentru asigurarea siguranței și fiabilității unei structuri.

Îmbinările cu placă la capăt și cu șuruburi, sunt larg utilizate în structurile metalice în cadre de peste jumătate de secol. În Europa, îmbinările cu placă de capăt și șuruburi sunt utilizate pe scară largă pentru îmbinarea elementelor realizate din profile laminate, inclusiv secțiuni compuse oțel-beton. Configurația clasică de îmbinare cu placă de capăt și două șuruburi pe rând este pe larg utilizată în cazul structurilor metalice necontravântuite (MRFs) datorită capacității lor sporite de a dezvolta articulații plastice, în comparație cu îmbinările similare sudate. Cadrele MRF reprezintă o soluție arhitecturală simplă, dar eficientă, pentru realizarea unor deschideri neobturate și spații largi, cu asigurarea rezistenței și stabilității structurii. Compromisul în acest sens constă în rolul sporit al îmbinărilor principale grinzi-stâlp, care trebuie să ofere ansamblului un mijloc fiabil de transfer al eforturilor și de asigurare a unei rigidități adecvate, menținând în același timp un preț rezonabil de realizare al structurii.

În timp ce configurația clasică cu două șuruburi pe rând este considerată un standard în industrie, cercetările realizate în acest domeniu au demonstrat limitele aplicabilității acesteia. Deși tipologiile uzuale ale îmbinărilor cu placă de capăt pot susține încărcări importante, proiectarea unei îmbinări cu placă de capăt cu rezistență completă conduce adesea la soluții costisitoare și limitează comportarea elementelor îmbinate care trebuie să devină elemente disipative. Pe de altă parte, îmbinările cu rezistență parțială conduc la o comportare necorespunzătoare în cazul încărcărilor extreme, în care încărcările de proiectare sunt depășite, conducând de cele mai multe ori la o cedări fragile a îmbinărilor și posibil la cedarea structurii.

Motivația prezentului studiu se axează pe reevaluarea unor studii și presupuneri anterioare referitoare la comportarea îmbinărilor cu placă de capăt și 4 șuruburi pe rând. În special în Europa, există o discrepanță între presupunerile de proiectare convenționale și performanța reală a acestor îmbinări. Ipoteza generalizată că momentele încovoietoare sunt transmise exclusiv de rândurile de șuruburi apropiate de talpa întinsă a grinzii este pusă sub semnul întrebării în contextul progreselor recente din cercetare. Obiectivul principal al acestui studiu este de a obține o înțelegere profundă a comportării și performanței configurației alternative a îmbinărilor metalice cu placă de capăt și patru șuruburi pe rând, în cazul construcțiilor metalice în cadre necontravântuite. Prin investigarea răspunsului pe care acestea-l oferă în diferite scenarii de încărcare, acest studiu își propune să contribuie la o înțelegere mai profundă a rolului acestora în asigurarea integrității și a siguranței structurale. Obiectivele acestui studiu vizează furnizarea unor perspective asupra îmbinărilor prin placă la capăt cu șuruburi. Obiectivele principale ale studiului includ:

- Investigarea și optimizarea configurației convenționale cu două șuruburi pe rând prevăzută de normativul de proiectare european EN 1993-1-8, cu sisteme suplimentare în configurații cu patru șuruburi pe rând prin investigarea variațiilor de dispunere a șuruburilor, a grosimii plăcii la capăt, a diametrului șurubului și a lățimii plăcii de capăt pentru identificarea configurațiilor care îmbunătățesc performanțele îmbinării, în special în condițiile încărcărilor extreme.
- Realizarea unui studiu experimental pe 30 de specimene de macro-componențe reprezentând diferite configurații de îmbinări cu placă de capăt extinsă prin evaluarea comportamentului elastoplastic al acestora în vederea evaluării răspunsului la diferiți parametri.
- Dezvoltarea unui studiu parametric FEM avansat, bazat pe și calibrat pe rezultatele comportării experimentale, pentru explorarea unor caracteristici geometrice complementare celor investigate în testele experimentale.
- Compararea performanței configurațiilor cu două șuruburi pe rând cu cele care utilizează patru șuruburi pe rând prin evaluarea avantajelor și limitărilor fiecărei configurații în ceea ce privește rezistența, rigiditatea și comportamentul structural general.
- Furnizarea de concluzii care au potențialul de a rafina procedurile de proiectare în cazul construcțiilor metalice în cadre metalice necontravântuite, oferind perspective asupra modului în care configurațiile de îmbinare optimizate pot contribui la rezistența și adaptabilitatea acestor structuri, în special în scenarii care implică încărcări extreme.
- Contribuții la cercetarea academică prin extinderea înțelegerii comportamentului îmbinărilor metalice. Acest lucru implică oferirea de perspective asupra efectelor diferiților parametri asupra performanței îmbinării și furnizarea unei baze pentru cercetare și dezvoltare ulterioară în această direcție.

## 2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU

Cadrelle metalice necontravântuite (MRFs) sunt larg utilizate în ingineria structurală, permițând deschideri mari neobturate, oferind în același timp un comportament structural adecvat, inclusiv la încărcări laterale cum sunt forțele seismice și cele generate de vânt (Fig. 2-1). În acest tip de soluție structurală îmbinările joacă un rol crucial în asigurarea transferului momentului încovoiator între grinzi și stâlpi, printr-o proiectare adecvată care poate asigura rigiditatea, rezistența și ductilitatea corespunzătoare.

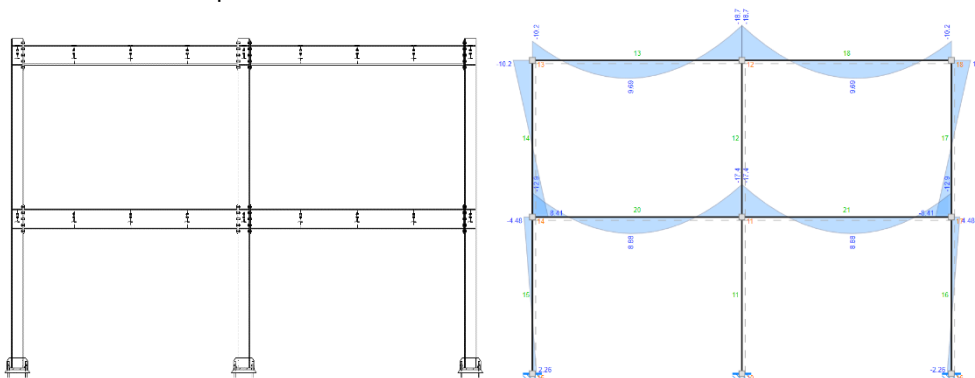


Fig. 2-1 Distribuția momentului încovoiator pentru un cadru metalic necontravântuit supus încărcărilor verticale

Îmbinările grindă-stâlp au o importanță semnificativă în comportamentul structurilor în cadre iar proiectarea acestora necesită o atenție deosebită. Configurația cea mai des utilizată este prin utilizarea plăcilor la capăt extinse, prinse cu două șuruburi pe rând, proiectată uzual pentru preluarea momentului de încovoiere elastic al grinzii. Configurația tradițională a îmbinărilor a fost analizată în detaliu demonstrându-și limitele, în special în cazul atingerii capacității la încovoiere. Un dezavantaj important al unor astfel de sisteme constă în capacitatea lor limitată de a prelua forțe axiale, așa cum a fost evidențiat în studiul realizat de Dinu, F [1].

Capacitatea preluare a forțelor axiale devine crucială în condiții speciale de încărcare, inclusiv în cazul evenimentelor seismice sau a scenariilor de încărcare extremă, în care comportamentul post-critic dorit este esențial, după cum indică standardele CEN din 2006. În astfel de evenimente, devine necesar ca îmbinările să păstreze o anumită capacitate de transmitere a eforturilor chiar și după ce au experimentat o cedare parțială. Această capacitate permite redistribuirea eforturilor între elementele structurale, asigurând integritatea structurală globală.

În acest scenariu particular, utilizarea unei configurații de patru șuruburi pe rând pentru îmbinări a fost studiată ca o soluție potențială pentru îmbunătățirea integrității structurale, în special în situații în care este necesar să se minimizeze riscul de colaps progresiv. Cu toate că investigațiile de cercetare pe aceste sisteme au fost limitate, această abordare tehnică a fost menționată în standarde franceze anterioare și continuă să fie o opțiune de proiectare viabilă în standardele germane actuale.

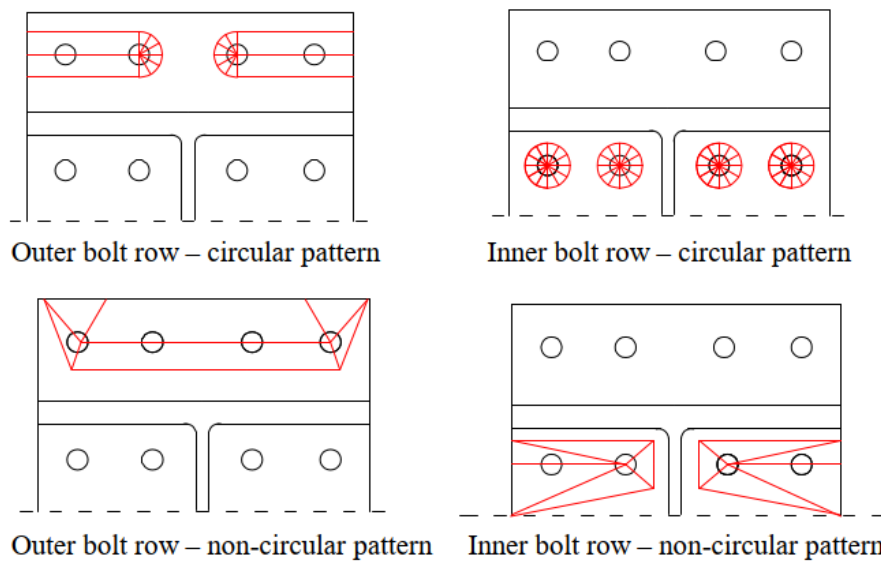


Fig. 2-2 Exemple de modele de cedare plastică cu patru șuruburi pe rând conform lui Demonceau, J-F et al. [2]

Cercetări anterioare au avut ca scop investigarea comportării îmbinărilor metalice și a mecanismelor de cedare asociate configurației cu patru șuruburi pe rând în. Contribuții semnificative au fost aduse de echipe de cercetare din diverse instituții, cum ar fi Universitatea Liège (Fig. 2-2) [3], [4], și [2]. De asemenea, la Universitatea Rzeszow au fost efectuate studii sub coordonarea lui Kozolowski et al. [5]. Mai mult, un efort colaborativ între universitățile Salerno și Coimbra a adus rezultate ilustrative [6].

Cercetarea existentă s-a concentrat în principal pe determinarea rigidității și a rezistenței elastice la momente încovoietoare a componentelor tip T echivalent prin utilizare EC3-1-8 [7], adaptarea și perfecționarea conceptelor de lungime eficace și a modurilor de cedare. Cu toate acestea, există o deficiență semnificativă în dezvoltarea unei metodologii cuprinzătoare de proiectare care să reprezinte în mod precis comportamentul post-elastic de comportare al acestor îmbinări.

În momentul actual există însă un interes reînnoit pentru acest tip de îmbinări legat de conceptul de robustețe și necesitatea unui comportament adecvat post-flexural. Prin adăugarea rândurilor exterioare de șuruburi, rezistența generală a sistemelor poate fi îmbunătățită, iar elementele adiționale de îmbinare pot fi utilizate ca măsură de siguranță în cazul unei cedări inițiale, pentru a evita cedarea rând cu rând întâlnită în cazul soluțiilor clasice de îmbinare. Studiile anterioare sugerează că abordarea a elementelor T echivalente nu poate descrie cu exactitate mecanismul de cedare al unei îmbinări, deoarece această configurație nu urmează același model de cedare [8]. Prezentul studiu se concentrează pe investigarea macro-componentelor întinse ale îmbinărilor cu placă la capăt și șuruburi. Acestea includ primele două rânduri de șuruburi ale îmbinării, inclusiv talpa și porțiunea superioară a inimii grinzii îmbinate.

### 2.1. Normative existente

În contextul ingineriei structurale germane, o practică bine stabilită include utilizarea îmbinărilor cu placă la capăt și patru șuruburi aranjate orizontal. În anii 1970, Asociația Germană a Lucrărilor din Oțel (DSTV) a dezvoltat un model matematic pentru a calcula rezistența îmbinărilor cu placă la capăt cu 4 șuruburi pe rând. Această tradiție are propriile sale standarde, definind două tipuri de configurații: IH 2 pentru plăci la capăt înguste și IH 4 pentru plăci la capăt mai late. Mai multe experimente au fost efectuate pentru ajustarea modelului, îmbunătățind modul de calcul al îmbinărilor. Regretabil, înregistrările acestor teste nu au fost publicate. Este important totuși să se menționeze limitele modelului matematic: acesta este utilizat pentru îmbinări cu plăci la capăt groase care se încadrează într-un anumit interval. Se pot găsi cele mai recente valori de rezistență bazate pe acest model în catalogul DSTV [9]. În 2002, a fost propus un model mai general, calculat în conformitate cu Eurocodul 3. Cu toate acestea, datorită faptului că nu erau disponibile foarte multe date experimentale, autorii au adoptat o abordare conservatoare, ceea ce a condus la rezultate mai puțin eficiente din punct de vedere al costurilor în comparație cu modelul DSTV dezvoltat anterior [10].

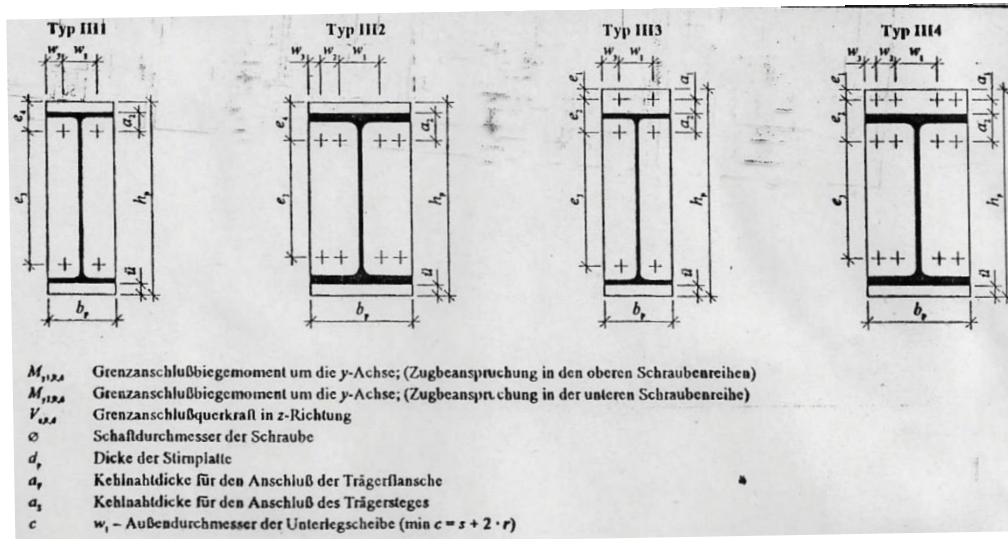


Fig. 2-3 Schiță extrasă din catalogul de proiectare a îmbinărilor conform DSTV [10]

Eurocod 3: Proiectarea structurilor de oțel - Partea 1-8: Proiectarea îmbinărilor [7], reprezintă standardul actual de proiectare a îmbinărilor în spațiul European. Standardul utilizează un sistem de clasificare în ceea ce privește rigiditatea - rigidă, semi-rigidă și articulată - respectiv rezistența îmbinărilor - rezistență completă, rezistență parțială sau articulată. Îmbinările cadrelor necontravântuite (MR) pot fi clasificate fie ca semi-continue (semi-rigide și/sau parțial rezistente) sau continue (rigide și parțial rezistente). Procedul de proiectare în EC3-1-8 se bazează pe metoda componentelor, care include evaluarea elementelor individuale T-echivalent (T-stub), reprezentând comportamentul rândurilor individuale de șuruburi (Fig. 2-4).

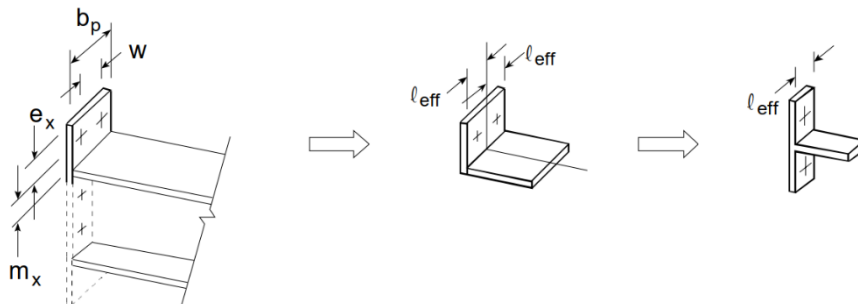


Fig. 2-4 Reprezentarea echivalentă a elementului T echivalent conform EN1993-1-8 [7]

Din acest punct de vedere literatura de specialitate referitoare la îmbinările grindă-stâlp prezintă anumite lacune în ceea ce privește îmbinarea grinzilor cu tălpi mai înguste decât grupul de șuruburi sau absența unei metode standardizate pentru evaluarea capacității de rotație. În timp ce cercetarea existentă se concentrează în principal pe comportamentul elastic și pre-critic, există o explorare insuficientă a



comportamentului post-critic, în special în configurațiile complexe 4B. De asemenea, aplicarea îmbinărilor grindă-stâlp 4B într-un context sensibil la robustețe este, de asemenea, abordată în mod insuficient. Aceste limitări împiedică dezvoltarea unor modele predictive și a unor coduri de proiectare precise, subliniind necesitatea ca studiile viitoare să prioritizeze aceste aspecte. Abordarea acestor lacune devine importantă pentru avansarea cunoașterii, informarea practicilor de proiectare și stabilirea metodologiilor solide și fiabile în ingineria structurală.

### 3. ABORDAREA PRELIMINARĂ A ÎMBINĂRILOR CU 4 ȘURUBURI-PE-RÂND

Îmbinările reprezintă componente integrale în proiectarea și performanța structurilor metalice, iar înțelegerea comportamentului acestora este crucială pentru asigurarea integrității structurale [11]. Un factor cheie care influențează performanța îmbinărilor metalice dintre grinzi și stâlpi rezistenți la momente încovoietoare, cu placă de capăt și șuruburi, este modul de dispunere al șuruburilor. În acest context, s-a efectuat un studiu numeric pentru a investiga și evalua comportamentul îmbinărilor metalice cu diferite configurații de dispunere a șuruburilor. Studiul s-a concentrat în mod specific pe compararea performanței îmbinărilor cadrelor necontravântuite dintre grinzi și stâlpi, având două șuruburi pe rând (2B) și, respectiv, patru șuruburi pe rând (4B). Obiectivul a fost de a analiza și evalua rezistența, mecanismele de cedare, ductilitatea și comportamentul post-flexural al acestor două configurații în vederea realizării unor teste experimentale ulterioare. Prin examinarea acestor aspecte, studiul își propune să ofere perspective valoroase asupra răspunsului componentelor și performanței îmbinărilor metalice, contribuind la dezvoltarea modului de proiectare al unor îmbinări mai eficiente și fiabile.

În mod tradițional, configurația cu două șuruburi pe rând (2B) reprezintă soluția comună pentru proiectarea îmbinărilor prin placă la capăt, această soluție fiind considerată o dispoziție convențională de bază. Studiul, investighează mecanismele de cedare și performanța sub diverse condiții de încărcare [12]. Accentul s-a pus pe înțelegerea răspunsului la încovoiere și post-flexural al configurației 2B.

Pe de altă parte, configurația cu patru șuruburi pe rând este o alternativă mai puțin cercetată, deși a fost luată în considerare în unele standarde de proiectare încă din anii '70. Un nou interes s-a dezvoltat în comunitatea de cercetare începând cu sfârșitul anilor 2000, și s-au făcut progrese semnificative pentru a înțelege corect comportamentul acestei configurații, dar, așa cum s-a menționat anterior, există întrebări nerezolvate referitoare la aplicarea corectă și avantajele utilizării acestei configurații [13].

#### 3.1. Comportarea globală a îmbinărilor rezistenți la momente încovoietoare

Studiul numeric efectuează o examinare a performanței mecanice a îmbinărilor rezistenți la momente încovoietoare dintre grinzi și stâlpi, cu placă la capăt și șuruburi, supuse la condiții extreme de încărcare. Obiectivul principal este evaluarea ductilității îmbinărilor, precum și a comportamentului post-critic, pentru a asigura integritatea structurală globală a structurii originale în cazul încărcărilor extreme.

Pentru a atinge acest scop, sunt investigate în detaliu diverse configurații geometrice de dispunere a șuruburilor în îmbinare (Fig. 3-2).

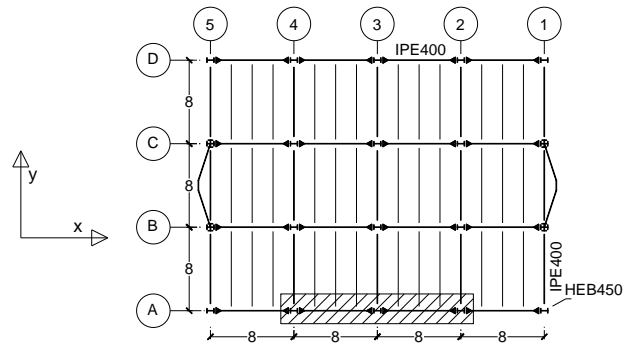
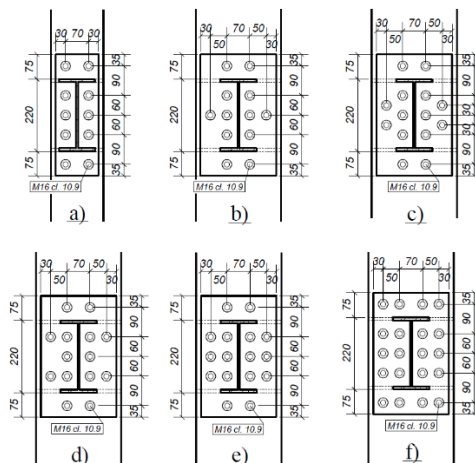


Fig. 3-1 Planul clădirii de referință și poziția specișnelor recuperate pentru testare

În cadrul acestui studiu specific, comportamentul cadrelor (prin izolarea unui cadru 2D din structură) a fost analizat luând în considerare forța verticală globală versus deplasarea stâlpului central, considerat cedat. Aceste curbe au fost înregistrate pentru fiecare configurație de dispunere a șuruburilor, iar modelele de cedare au fost analizate pentru a evalua criteriile de ductilitate. Pentru verificarea rezultatelor numerice au fost considerate rezultate experimentale, în comparație directă cu modelul 2B\_O care reproduce testul real. Astfel, comparația dintre rezultatele experimentale și cele numerice permite evaluarea preciziei și validității modelului numeric prin capturarea comportamentului real al îmbinării sub încărcările specifice. Fig. 3-3 prezintă curbele de comportare forță-deformație. În diagrame sunt comparate curbele experimentale și răspunsul corespunzător al modelului numeric (2B\_O).



- a) 2B\_O                      b) 2B\_1                      c) 2B\_2V  
d) 2B\_2                      e) 2B\_3                      f) 4B

Fig. 3-2 Configurațiile îmbinărilor (dimensiuni în mm)

În ansamblu, rezultatele demonstrează că montarea de șuruburi suplimentare, cât și lărgirea plăcii la capăt contribuie la îmbunătățirea performanței mecanice a îmbinării. Aceste modificări îmbunătățesc atât rezistența ultimă, cât și ductilitatea îmbinării, crescând în final robustețea și fiabilitatea întregului sistem structural. Configurațiile care prezintă șuruburi exterioare suplimentare demonstrează capacitatea de a recupera un procent semnificativ din rezistența maximă după cedarea inițială, evidențiind o capacitate remarcabilă de revenire post-flexurală.

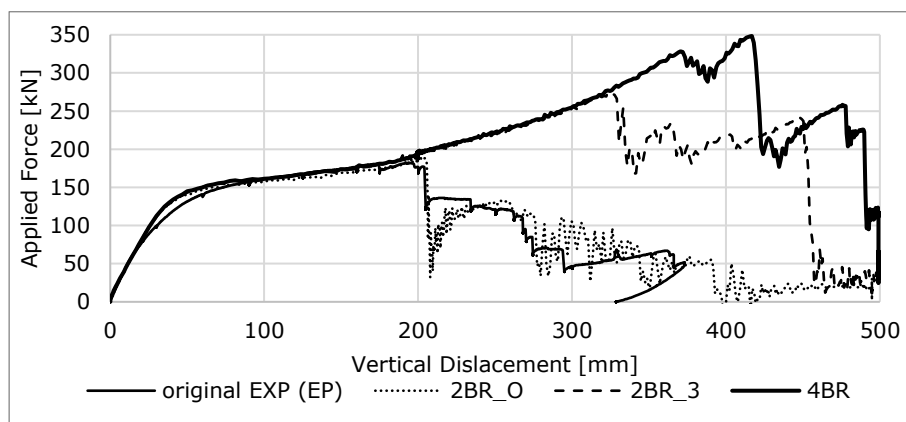


Fig. 3-3 Compararea între curbele forță-deformație

### 3.2. Studiu pe macro-componente

Pentru înțelegerea modului de comportare al configurației 4B, s-a efectuat un studiu numeric preliminar, în scopul identificării parametrilor care ar putea fi de interes în viitoarele teste experimentale.

Pentru analizarea îmbinărilor din oțel cu placă de capăt a fost folosit modelul echivalent T-stub. Cu toate acestea, atunci când întreaga zonă în tracțiune este luată în considerare, comportamentul elementului de tip T-stub trebuie modificat datorită considerării simultane a tălpii și inimii profilului de grindă. Numeroase studii au adoptat această perspectivă, incorporând aceste componente într-o configurație similară cu cea a unui T-stub [14]. Această abordare nu numai că ia în considerare comportamentul rândurilor individuale de șuruburi în raport cu talpa și inima adiacente, dar și interacțiunea între mai multe rânduri (Fig. 3-4).

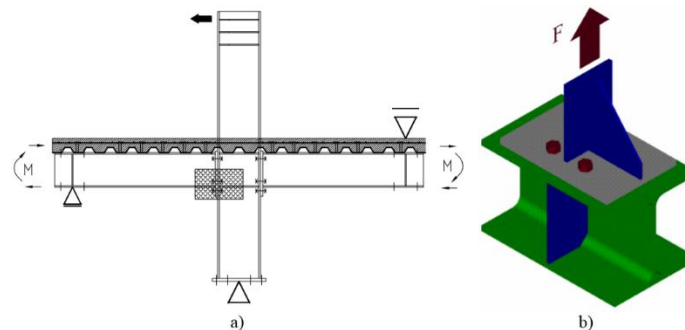


Fig. 3-4 Macro-componentă solicitată la întindere cu două șuruburi pe rând izolată dintr-o îmbinare dintre grindă și stâlp

Pentru a examina impactul potențial al suplimentării prin șuruburi exterioare, s-a conceput o îmbinare alternativă față de o îmbinare originală cu două șuruburi pe rând dintr-un studiu anterior, păstrând aceleași elemente structurale și menținând caracteristicile geometriei originale. După cum a fost demonstrat în studiul numeric prezentat anterior cu privire la șuruburi, cheia îmbinării constă în elementele întinse ale acesteia. Astfel, în acest studiu, partea superioară a îmbinării a fost izolată ca o macro-componentă pentru a analiza în mod specific comportamentul său la tracțiune (Fig. 3-5).

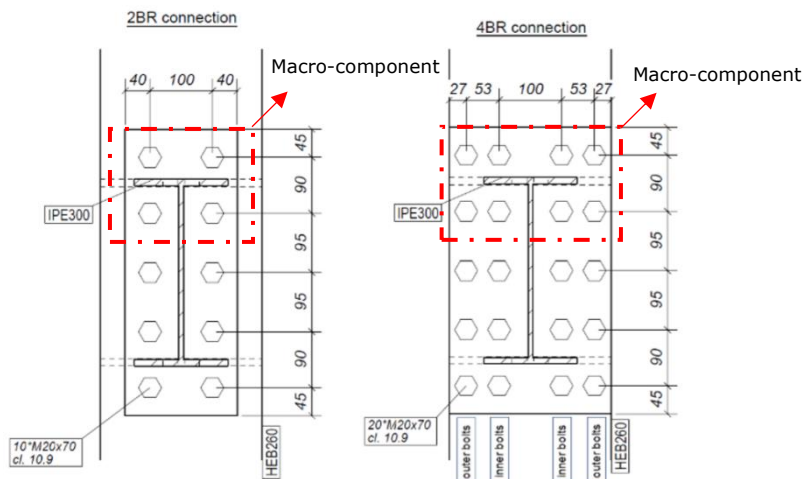


Fig. 3-5 Izolarea macro-componentei

Izolarea zonei de întindere cuprinde cele două rânduri de șuruburi adiacente tălpii grinzii, precum și talpa grinzii și partea corespunzătoare a inimii, care contribuie la distribuția forțelor între ambele rânduri de șuruburi. Comportamentul zonei de tracțiune este, de asemenea, cheia rigidității la rotire a îmbinării, în cazul în care panoul de inimă al stâlpului nu sunt luate în considerare – în general rigiditatea zonei

rigidizate de compresiune este foarte mare și presupusă infinită în calculul de proiectare. Astfel, rotirea îmbinării poate fi ușor obținută prin înmulțirea deformației orizontale totale a zonei de tracțiune cu brațul de forță considerat ca distanța până la centrul de rotire (linia mediană a tălpii comprimate).

Diagramele din Fig. 3-6 și Fig. 3-7 evidențiază clar o diferență semnificativă între cele două configurații (2B și 4B) în răspunsurile caracteristice ale curbelor forță-deformație. În mod specific, configurația cu patru șuruburi pe rând prezintă un comportament plastic și post-flexural mult mai rezilient în comparație cu configurația cu două șuruburi pe rând. Configurația cu patru șuruburi demonstrează o ductilitate mai bună și o performanță importantă de recuperare a rezistenței în ceea ce privește capacitatea sa de a suporta deformația plastică fără pierderi semnificative de rezistență. Pe de altă parte, faza elastică a răspunsului rămâne în mare parte similară între cele două configurații.

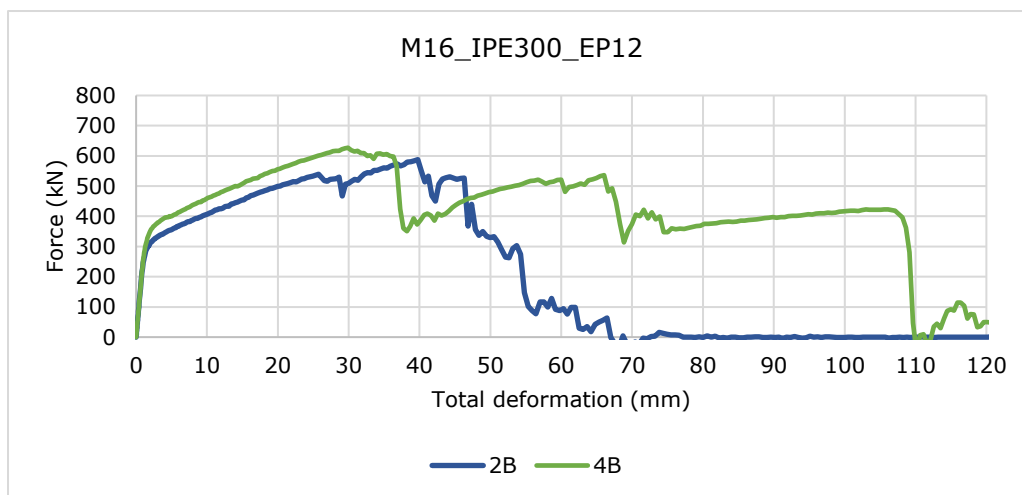


Fig. 3-6 Curbe de comportament pentru modelele 2B și 4B pentru M16\_IPE300\_EP12

În ansamblu, configurația cu patru șuruburi pe rând prezintă avantaje în domeniul post-elastic în ceea ce privește ductilitatea, mecanismele de cedare și robustețea îmbinării, în special în comparație cu configurațiile clasice cu două șuruburi pe rând, considerate în mod obișnuit în codurile de proiectare precum EN 1993-1-8.

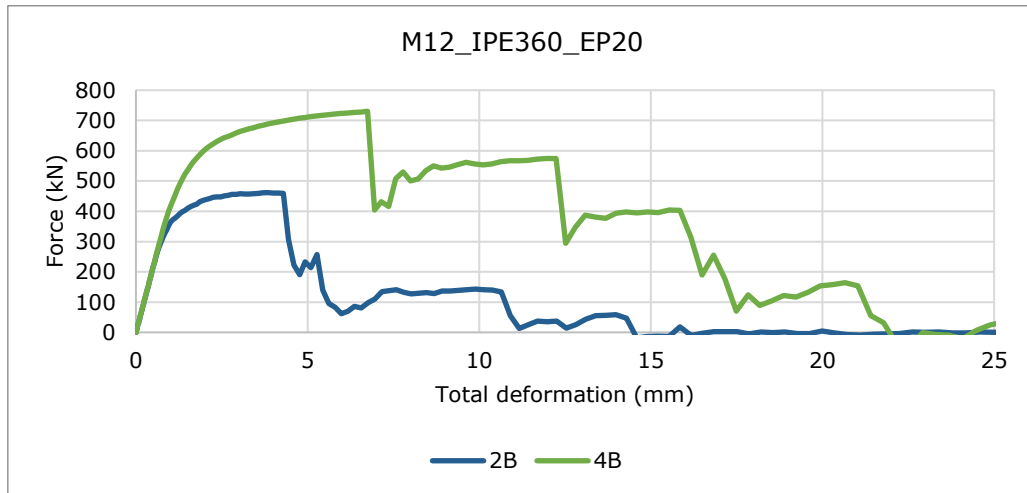


Fig. 3-7 Curbe de comportament pentru modelele 2B și 4B pentru M12\_IPE360\_EP20

## 4. PROGRAM EXPERIMENTAL PE MACRO-COMPONENTE

Configurația tipică pentru îmbinările grindă-stâlp ale cadrelor metalice necontravântuite utilizează plăci de capăt cu două șuruburi pe rând [15]. Această configurație este detaliată în normativul european de proiectare EN 1993-1-8 și se bazează pe evaluarea rezistenței și rigidității diverselor componente ale îmbinării. Cu toate acestea, în condiții de încărcare extremă, există potențialul de a îmbunătăți performanța acestei configurații.

Studiile numerice prezentate în capitolul 3 au indicat aspecte importante privind comportamentul configurațiilor 4B și posibilele lor avantaje în raport cu îmbinările clasice 2B. Din studiile parametrice, raportul  $t/d$  (dintre grosimea plăcii de capăt și diametrul șurubului) și lățimea tălpii grinzii au prezentat un impact semnificativ asupra comportării îmbinării. De asemenea, important pentru testarea ulterioară a fost delimitarea limitelor practice pe care programul experimental ar trebui să le ia în considerare, cum ar fi limitele geometrice pentru evitarea plasticității complete a grinzii și compatibilitatea dintre forțele maxime obținute și capacitatea instalației din laborator.

În urma analizelor prezentate, a fost elaborat un program experimental cu următoarele obiective:

- confirmarea și măsurarea relevanței raportului  $t/d$  și a lățimii tălpii de grindă;
- observarea formării cuplajului diagonal între rândurile de șuruburi întinse;
- studiul impactului și comportamentul sudurii dintre grindă și placă de capăt;
- constituirea unei baze de cunoștințe calibrate pentru studii numerice mai ample, cum ar fi aceea a îmbinărilor complete și aplicarea directă în analiza structurală a clădirilor.

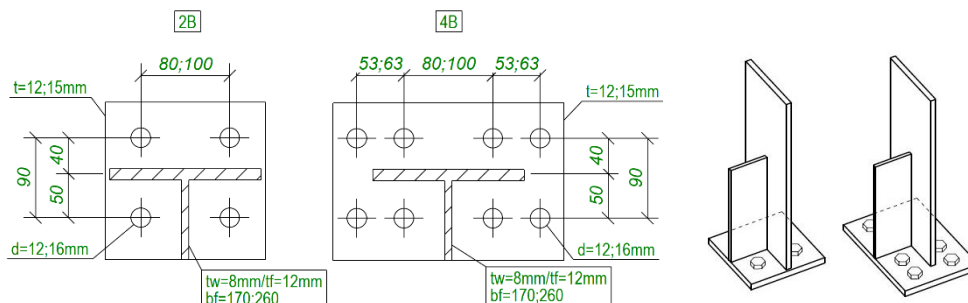




Fig. 4-1 Configurația specimenelor experimentale

Studiul experimental a implicat teste la întindere prin analiza a 30 de specimene de macro-componente, care reprezintă zona de tracțiune a unei îmbinări dintre o grindă și un stâlp cu placă de capăt extinsă. Au fost investigați diverși parametri, inclusiv diametrul șurubului, grosimea plăcii la capăt, lățimea tălpii și aranjamentul geometric al șuruburilor. Studiul s-a concentrat pe examinarea comportamentului elasto-plastic al sistemelor prin compararea performanței acestora cu soluțiile tradiționale cu două șuruburi pe rând. Parametrii luați în considerare, așa cum sunt prezentați în Fig. 4-1, includ profilele grinzilor IPE360 și HEA260, grosimile plăcilor la capăt de 12 mm și 15 mm, diametrele șuruburilor de 12 mm și 16 mm, și modelele de dispunere a șuruburilor denumite P1, P2 și P3.

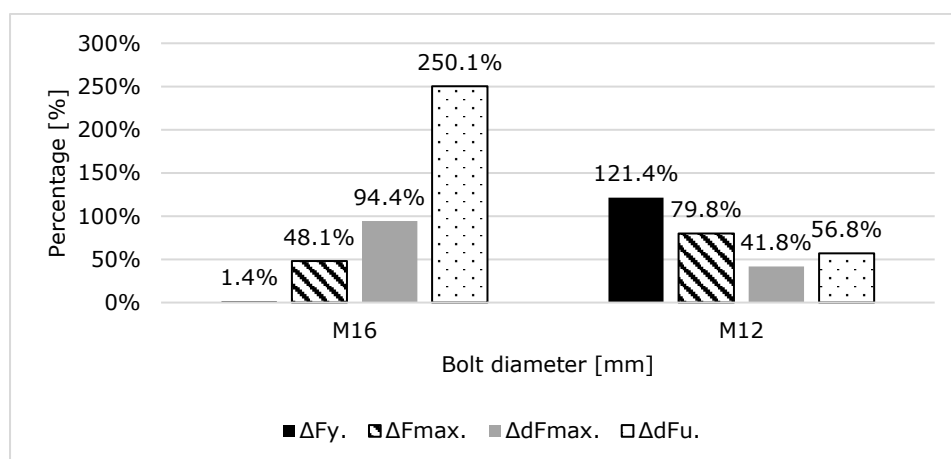


Fig. 4-2 Câștigurile relative de rezistență pentru configurația 4B (I360\_t15\_P1) în cazul variației diametrului șurubului

Variația diametrului șurubului, în special trecerea de la M16 la M12, evidențiază o creștere semnificativă atât în variația rezistenței la cedare, cât și în variația rezistenței maxime, așa cum este ilustrat în Fig. 4-2. Acest lucru poate fi atribuit schimbării raportului de rigiditate dintre placa de capăt și șuruburi. Astfel, o placă de capăt mai rigidă facilitează o distribuție îmbunătățită a forțelor pe șuruburi, în special cele exterioare. Cu toate acestea, câștigul de ductilitate este mai mic, în principal din cauza comportamentului mai fragil al îmbinării, orientat către o cedare de tip 3.

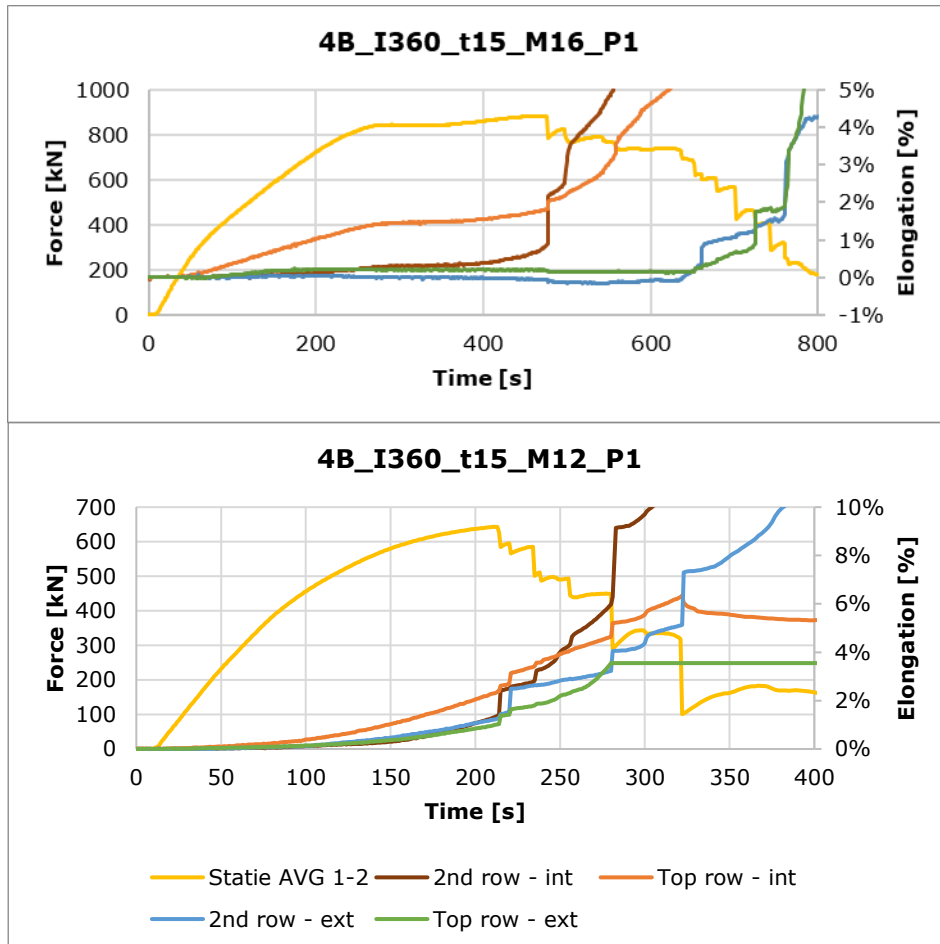


Fig. 4-3 Forța și alungirea șurubului în funcție de timp pentru 4B\_I360\_t15\_P1

În ceea ce privește alungirea șurubului, citirea prezentată în Fig. 4-3 arată o colaborare mult mai timpurie și mai pronunțată a șuruburilor exterioare, în concordanță cu creșterea raportului  $t/d$  (de la șuruburi M16 la șuruburi M12).

În toate speciemenele testate, secvența de cedare a început în mod consecvent cu cedarea inițială a plăcii la capăt prin încovoiere, urmată de cedarea șuruburilor. În mod predominant, șuruburile au cedat prin forfecarea filetelui, caracteristică șuruburilor HV supuse la întindere.

Cu toate acestea, atât cedarea șurubului, cât și cedarea plăcii de capăt sunt puternic corelate cu raportul  $t/d$  al îmbinării. În cazul valorilor mai mici ale raportului  $t/d$  (indicând modul 2 către 1, cu un prag în jur de  $t/d \approx 0.29$ ), s-au înregistrat deformări mari în placa de capăt, care la rândul său a exercitat un moment de

încovoiere relevant asupra șuruburilor, conducând la o forfecare asimetrică a filetului (Fig. 4-4). Datorită deformării mari a plăcii de capăt, s-a observat și o cedare a sudurilor la marginea tăpii grinzii, în modelele IPE360 (Fig. 4-5).



Fig. 4-4 Degradarea șuruburilor testate în cazul specimenului 4B\_I360\_t12\_M16\_P3



Fig. 4-5 Deformația plăcii de capăt și cedarea sudurii în cazul specimenului 4B\_I360\_t12\_M16\_P3

Cazurile 4B au prezentat în mod specific cedări mai complexe și decalate ale șuruburilor. Șuruburile au cedat în perechi simetrice, iar secvența de cedare a urmat în general modelele observate în simulările numerice prezentate anterior [16]: (i) cedarea șuruburilor interioare din al doilea rând (extern), (ii) cedarea șuruburilor

interioare din primul rând (intern), (iii) cedarea șuruburilor exterioare din al doilea rând, și (iv) cedarea șuruburilor exterioare din primul rând. În specițiile cu diametre mai mari ale șuruburilor, s-a produs o cedare parțială a sudurilor între etapele (ii) și (iii) datorită încărcării excentrice a sudurilor (Fig. 4-6).



Fig. 4-6 Rezultatul deformării specițiilor

În cazul configurației 2B, progresia la cedare a plăcii de capăt are loc liniar, rând cu rând, urmând dispunerea șuruburilor. Cu toate acestea, datorită mecanismului complex de cedare observat în specițiile 4B, fenomenele de cedare devin mai complexe. Cedarea alternează solicitarea atât pe partea externă, cât și pe partea internă a plăcii de capăt, rezultând o complexitate mai mare a fenomenelor de cedare (Fig. 4-6).

Analiza rezultatelor experimentale s-a concentrat pe evaluarea influenței șuruburilor exterioare adiționale asupra performanței specițiilor de macro-componente. Au fost observate următoarele tendințe:

- Rezistența macro-componentei cu configurația 4B a arătat o îmbunătățire atât în valorile forțelor elastice, asociată cu rezistența la cedare, cât și în forțele maxime atinse.
- Deformația corespunzătoare forțelor maxime a înregistrat o creștere semnificativă în cazul configurației 4B.

Mecanismul de cedare al specițiilor 4B s-a dovedit a fi semnificativ mai complex și influențat de diferiți factori geometrici și mecanici, cum ar fi caracteristicile plăcii de capăt, diametrul șuruburilor și distanța dintre acestea. După cedarea primului șurub, caracteristicile geometrice și mecanice ale plăcii de capăt au jucat un rol crucial în amânarea cedării, rezultând o rezervă de rezistență și ductilitate. Rezultatele experimentale au demonstrat o diferență în mecanismul de cedare, în care prezența șuruburilor exterioare conduce la o progresie mai complexă a ruperii șuruburilor, începând de la rândurile interioare către cele exterioare.

În comparație cu studiul numeric prealabil din capitolul 3, deși valorile absolute ale rotirilor și rezistențelor nu au fost atinse din cauza diferențelor în caracteristicile materialelor, au fost confirmate mai multe tendințe generale, cum ar fi:

- modelele de cedare ale șuruburilor obținute în studiul numeric sunt consistente cu observațiile experimentale;
- configurațiile 4B prezintă o creștere semnificativă a rezistenței, în special a lui  $F_{max}$ , în funcție de rigiditatea plăcii de capăt;
- s-au observat câștiguri importante în ductilitate în componente cu raportul  $t/d$  rezultând în modul 2 spre 3.

Pe baza studiului numeric se poate concluziona că adăugarea de șuruburi exterioare pe rând îmbunătățește comportamentul post-elastic al îmbinărilor grindă-stâlp din oțel cu plăci de capăt extinse. Această îmbunătățire se atribuie redistribuirii dinamice a forțelor la nivelul îmbinării, care este influențată de parametrii geometrici și mecanici ai îmbinării și modurile parțiale de cedare observate. Principalul avantaj al integrării de șuruburi suplimentare constă în îmbunătățirea ductilității și a rezistenței maxime a îmbinărilor.

## 5. STUDII NUMERICE

Rezultatele experimentale furnizate în capitolul 4 oferă informații valoroase despre răspunsul și performanța macro-componentelor cu 4 șuruburi pe rând, în special în comparație cu configurațiile tradiționale cu două șuruburi pe rând (2B). Studiul experimental a arătat, de asemenea, influențele în comportare datorat diferiților parametri, cum ar fi diametrul șurubului, grosimea plăcii de capăt, lățimea tălpii sau dispunerea șuruburilor.

Pentru îmbunătățirea comportării specimenelor testate și a explora influența altor parametri diferiți, se recurge la modelarea numerică a conexiunilor considerate utilizând Analize Avansate cu Element Finite (FEA) în 3D. Modelarea numerică oferă mai multe avantaje în proiectare și cercetare, inclusiv capacitatea de a simula comportamente complexe, investiga diverse scenarii de proiectare, analiza detaliată a elementelor modelate și precizarea răspunsului elementelor structurale în diferite condiții de încărcare.

Acest capitol își propune să prezinte modelele numerice FEA dezvoltate pentru a simula comportamentul specimenelor testate experimental. Modelele numerice au fost construite utilizând pachetele software ABAQUS [17] capabile să reprezinte cu precizie răspunsul mecanic al îmbinărilor metalice. Modelele FEA au fost calibrate și validate în raport cu rezultatele experimentale pentru a asigura acuratețea și fiabilitatea lor.

### 5.1. Studiu parametric

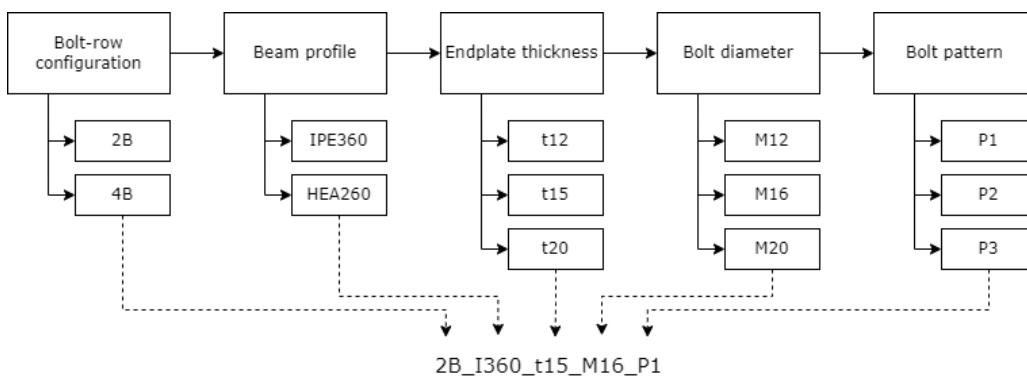


Fig. 5-1 Variabilele considerate în studiul parametric

Pentru a obține o înțelegere mai profundă a comportamentului noii configurații, prin studii parametrică au fost identificate și modificate sistematic mai multe variabile relevante. Această abordare a avut ca scop investigarea impactului

acestor variabile asupra comportamentului general al îmbinărilor, prin găsirea influenței acestora asupra aspectelor cheie ale performanței macro-componentei. Fig. 5-1 furnizează o reprezentare vizuală a parametrilor selectați pentru analize, permițând o înțelegere mai clară a semnificației acestora în studiu:

- Numărul de rânduri de șuruburi: 2/4
- Profilul grinzii: IPE360/HEA260
- Grosimea plăcii de capăt: 12mm/15mm/20mm
- Diametrul șurubului: M12/M16/M20
- Configurația șuruburilor: P1=53x80x53/P2=63x80x63/P3=53x100x53

Pentru validarea modelelor FEA, rezultatele simulate au fost calibrate în raport cu cele experimentale prezentate în capitolul anterior. Astfel, au fost evaluate curbele forță-deformație, cu accent special pe forța maximă și deformațiile în puncte critice. Comparațiile dintre predicțiile FEA și rezultatele experimentale au permis evaluarea exactității modelelor numerice în capturarea comportamentului general și a răspunsului îmbinărilor (Fig. 5-2 și Fig. 5-3).

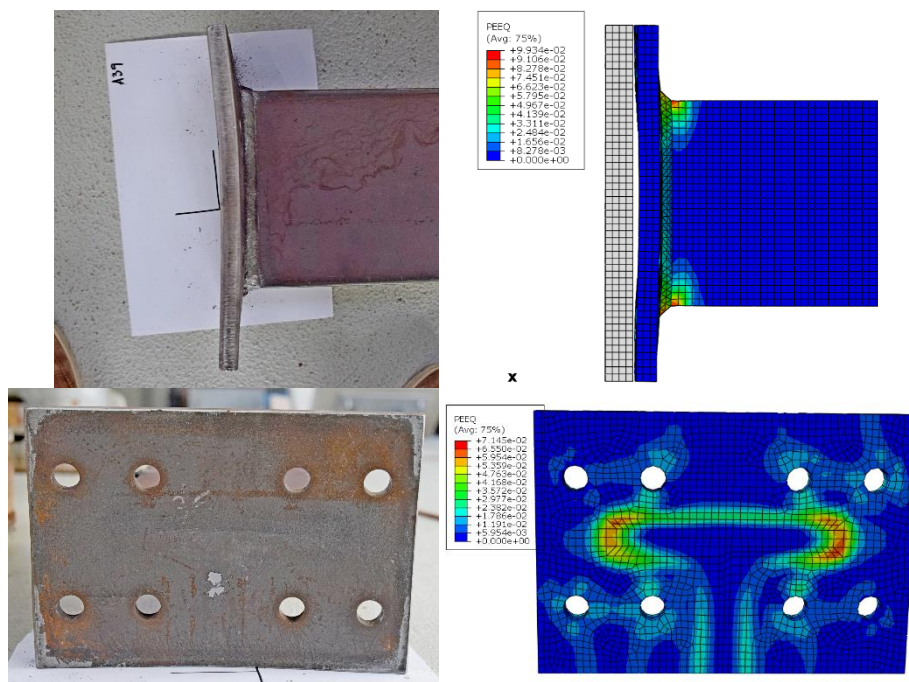


Fig. 5-2 Comparația dintre rezultatele experimentale și cele numerice pentru modelul 4B\_P3, valori PEEQ

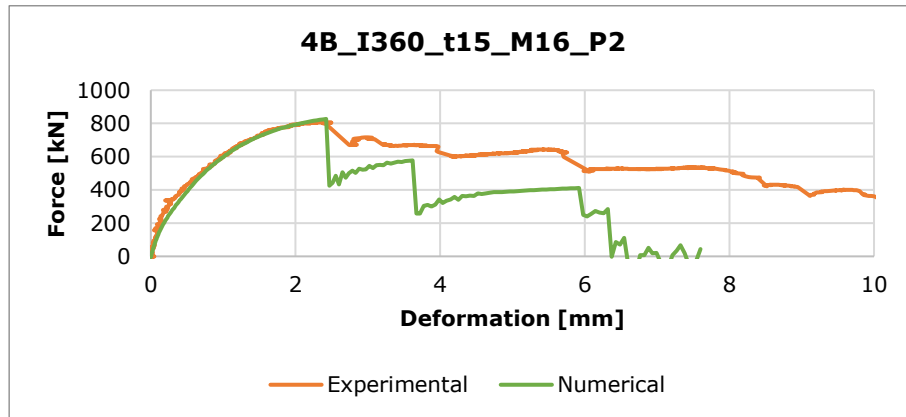


Fig. 5-3 Curbele Forță-deformație pentru modelul 4B\_I360\_t15\_M16\_P2 obținute prin validarea numerică

Având în vedere natura spectrală a modurilor de cedare în care modul 2 de cedare poate fi mai aproape de modul 1 sau de modul 3, se calculează coeficientul  $\delta_{2-3}$ , ilustrând apropierea modului de cedare de modulul 3, comparativ cu modulul 1:

$$\delta_{2-3} = \frac{|F_{T.2.Rd} - F_{T.1.Rd}|}{|F_{T.2.Rd} - F_{T.3.Rd}| + |F_{T.2.Rd} - F_{T.1.Rd}|} \quad (5-1)$$

În acest context, o valoare apropiată de 0%, indică o tendință apropiată către modul 1, în timp ce o valoare aproape de 100% sugerează o tendință de cedare apropiată de modul 3. În mod specific, o valoare apropiată de 0% semnifică o prevalență dominantă a comportamentului în modul 1, în timp ce o valoare apropiată de 100% indică o prevalență predominantă a comportamentului în modul 3.

După cum s-a menționat anterior, modelele cu placă de capăt mai rigidă au arătat rezultate semnificativ mai bune în ceea ce privește rezistența. În Fig. 5-4, evoluția forțelor de cedare și a forțelor maxime este corelată cu apropierea de fiecare mod de cedare, fie modul 1, fie modul 3. Pentru speciamele care păstrează caracteristici cu tendință către modul 1, câștigurile între 2B și 4B sunt mici, sau chiar negative. În cealaltă parte a spectrului, însă, ambele valori ale rezistențelor înregistrează creșteri clare pentru cazurile care tind către modul 3.

În proiectarea îmbinărilor semi-continue la încărcări accidentale ductilitatea macro-componentelor reprezintă un factor crucial în redistribuția eforturilor. Capacitatea acestor componente de a suferi deformații plastice le permite să absoarbă energie și să redistribuie forțele în cadrul structurii. Această capacitate de deformație joacă un rol semnificativ în îmbunătățirea performanței structurale generale și a rezilienței în scenariul de încărcare extremă, în care robustețea structurii trebuie luată în considerare iar comportamentul post-critic al îmbinării poate fi decisiv pentru evitarea unui colaps parțial total. Așa cum s-a observat pe parcursul acestui studiu,



configurația 4B a înregistrat în mod constant o reziliență semnificativă după prima cedare a șuruburilor în comparație cu variantele 2B.

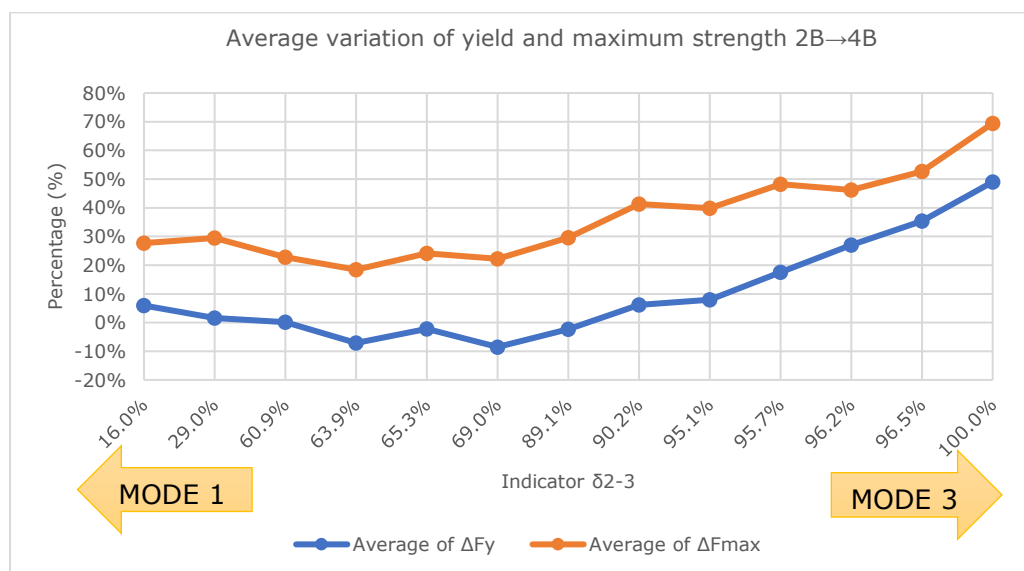


Fig. 5-4 Câștigul mediu 2B-4B în rezistențele la cedare și forța maximă în legătură cu tendința modului

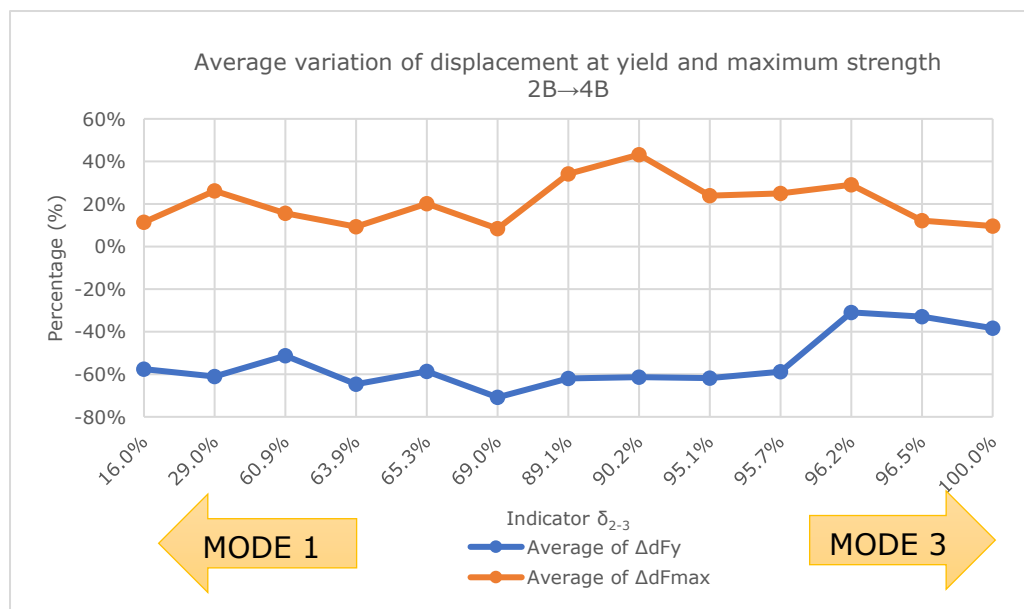


Fig. 5-5 Câștigurile medii de deformație 2B-4B la rezistențele de cedare respectiv la forța maximă

În Fig. 5-6 este prezentată variația medie a deformației la o scădere de 20% a încărcării maxime de la 2B la 4B ( $d_{80\%F_{max,4B}} / d_{80\%F_{max,2B}}$ ) în funcție de indicatorul  $\delta_{2-3}$ , pentru fiecare profil de grindă. În cazul profilului IPE360, conexiunea prezintă o pierdere în reziliență. La fel de semnificativă este și creșterea considerabilă a rezilienței pentru modelele 4B care se apropie de modul 3 de cedare în comparație cu configurația 2B.

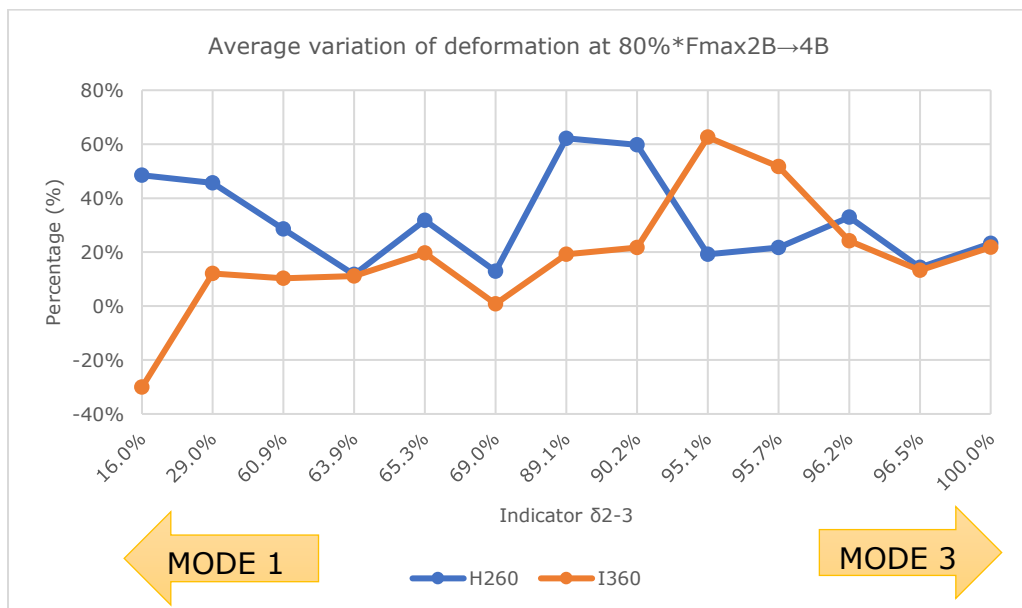


Fig. 5-6 Variația medie a deformației la  $80\%F_{max}$  după prima cedare 2B-4B

În ceea ce privește profilul grinzii HEA260, câștigurile 4B-2B în deformație (Fig. 5-6) sunt în general cuprinse între +11,7% și +31,7%, cu două excepții: (i) pentru modele apropiate de modul 1, modelele au raportat câștiguri de până la +48,5%, în contrast cu modelele omoloage IPE360; (ii) Pentru modelele cu  $\delta_{2-3}$  între 89% și 91%, s-a înregistrat o creștere de până la 61%.

Considerând forța ultimă la un nivel inferior - 50% - în raport cu forța maximă, rezultatul ductilității/elasticității se schimbă considerabil (see Fig. 5-7). Modelele cu talpă mai lată (profilul HEA260) au înregistrat o creștere regulată pe tot spectrul, cu câteva excepții. În cazul tălpii mai înguste (profilul IPE360), rezultatele înregistrate sunt mult mai variate: creșterea deformației crește progresiv la +252,4% pentru modelele cu  $\delta_{2-3} = 69,0\%$ , apoi scade progresiv la +75,2 pentru modelul pentru modul 3 de cedare.

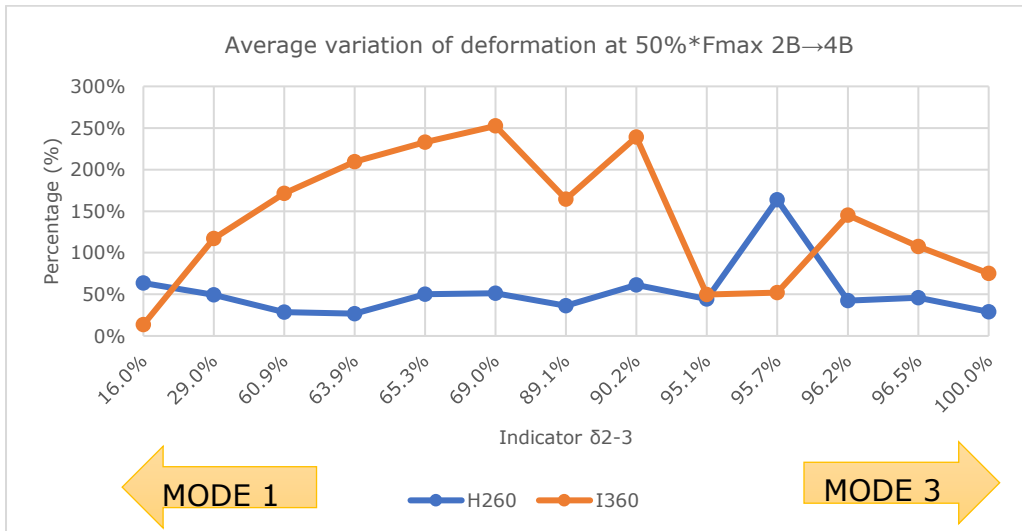


Fig. 5-7 Variația medie a deformației la 50%Fmax după prima cedare

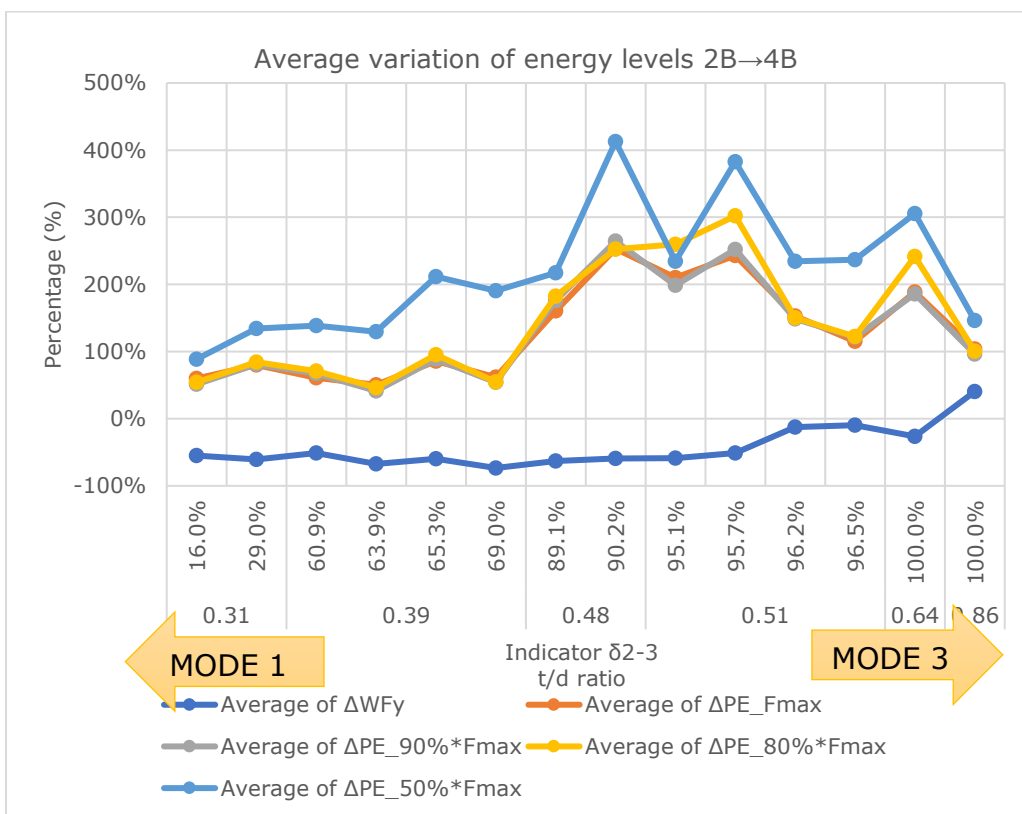


Fig. 5-8 Variația energiei disipate în punctul de cedare ( $W_y$ ) și energia de deformare plastică (PE) pentru  $F_{max}$ ,  $90\%F_{max}$ ,  $80\%F_{max}$  și  $50\%F_{max}$

Pentru evaluarea globală a performanței generale a îmbinărilor care să integreze atât rezistența, cât și ductilitatea, a fost calculată energia disipată pentru fiecare punct de interes (POI):

$$W_i = \int_0^{\delta_i} F d\delta \quad (5-2)$$

unde

$\delta_i$  este deformația la fiecare POI

Pentru a obține nivelul de energie disipată a îmbinării, energia de deformare plastică cumulativă (PE) a fost calculată prin eliminarea energiei elastice:

$$PE_i = W_i - W_y \quad (5-3)$$

În Fig. 5-8, este trasată variația medie a energiei disipate dintre modelele 2B și 4B în punctul de cedare ( $W_y$ ) și PE pentru  $F_{max}$ ,  $90\%F_{max}$ ,  $80\%F_{max}$  și  $50\%F_{max}$  în funcție de indicatorul  $\delta_{2-3}$  și raportul  $t/d$ .

## 5.2. Capacitatea de rotire

Urmărind prevederile EN 1993-1-8, se poate trasa o diagramă a ductilității observate în modelele 4B rezultate din studiul numeric în funcție de raportul  $t/d$ , ilustrând limitele specificate în secțiunile 6.2.7.2(9) și 6.4.2(2) pentru "rotire nelimitată" și "rotire insuficientă" (Fig. 5-9).

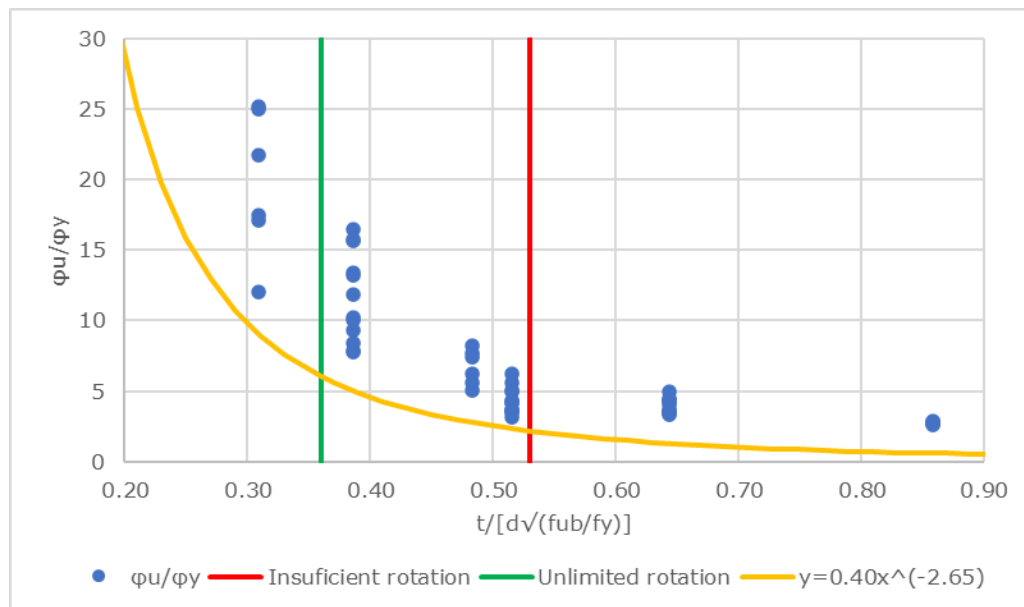


Fig. 5-9 Curba de regresie pentru valorile minime plus o reducere de 25% pentru siguranța ductilității la  $\phi_u$  în relație cu raportul  $t/d$

Cu toate că EN1993-1-8 nu furnizează valori specifice pentru capacitatea de rotire, datele numerice confirmă tendința de pierdere a ductilității pentru rapoarte t/d mai mari și o ductilitate exponențial mai bună pentru rapoarte t/d mai mici. Acest lucru permite o abordare empirică pentru a delimita un prag acceptabil în funcție de raportul t/d, prin trasarea unei regresii polinomiale. Curba polinomială trasată în Fig. 5-9 definește domeniul de aplicabilitate minim al ductilității obținute din analiza numerică, cu un coeficient de siguranță de 1.25, analog coeficientului parțial pentru rezistența îmbinărilor  $\gamma_{M2}$ . Astfel, relația dintre ductilitatea relativă și raportul t/d poate fi exprimată ca:

$$\frac{\theta_u}{\theta_y} = 0.40 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-2.65} \quad \text{but} \quad \frac{\theta_u}{\theta_y} < 9 \quad (5-4)$$

unde

$f_y$  este rezistența la cedare a plăcii de capăt

$f_{ub}$  este rezistența ultimă a șuruburilor

Pentru valori mici ale t/d, valorile pentru ductilitatea relativă ar trebui să fie limitate la valoarea minimă obținută, plus marja de siguranță.

În mod similar, aceeași abordare poate fi folosită pentru stabilirea unui prag pentru etapele ultime ale fazei post-critice: 90%\* $F_{max}$ , 80%\* $F_{max}$  și 50%\* $F_{max}$ , cazuri în care limitele de ductilitate pot fi exprimate prin:

$$\frac{\theta_{max90}}{\theta_y} = 0.43 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-2.62} \quad \text{dar} \quad \frac{\theta_{max90}}{\theta_y} < 9.35 \quad (5-5)$$

$$\frac{\theta_{max80}}{\theta_y} = 0.45 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-2.62} \quad \text{dar} \quad \frac{\theta_{max80}}{\theta_y} < 9.86 \quad (5-6)$$

$$\frac{\theta_{max50}}{\theta_y} = 0.48 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-3.04} \quad \text{dar} \quad \frac{\theta_{max50}}{\theta_y} < 17.15 \quad (5-7)$$

### 5.3. Influența variației lățimii tălpii de grindă în configurațiile 4B

Rezultatele din programul experimental au indicat în general o îmbunătățire globală a caracteristicilor îmbinărilor în configurațiile 4B, iar sporurile specifice dintre speciamele cu configurații diferite au variat în funcție de parametrul modificat. Cu alte cuvinte, impactul parametrului modificat a fost diferit între diversele configurații, conducând la grade variate de îmbunătățire ale răspunsului.

În cazul variației lățimii tălpii de grindă, comportarea observată a plăcii de capăt a fost semnificativ diferită în funcție de profilul grinzii (Fig. 5-10): în timp ce în cazul profilului HEA260, placa de capăt a dezvoltat un model final de cedare similar

cu modelele necirculare prevăzute de către Demonceau, J-F.[referință], în cazul grinzii IPE360, placa de capăt a prezentat o cedare plastică importantă în extensia sa laterală, prezentând o deformare importantă de-a lungul liniei verticale a marginii tălpii.



Fig. 5-10 Forma deformată a plăcii de capăt pentru profilul HEA260 (stânga) și IPE360 (dreapta)

Datorită diferențelor observate, a fost considerat necesar realizarea unei investigații suplimentare pentru a obține o înțelegere mai clară a impactului lățimii tălpilor asupra comportamentului general al îmbinării. În concordanță cu acest obiectiv, s-a efectuat un studiu parametric suplimentar, care implică o lărgire progresivă a lățimii tălpilor de la o lățime inițială  $b=150\text{mm}$  (caracteristică pentru un profil IPE300) la o valoare de  $240\text{mm}$ . Acest studiu a avut ca scop analiza și evaluarea sistematică a efectelor variației lățimii tălpilor asupra performanței globale a îmbinării.

În ceea ce privește deformația în punctele cheie stabilite precum  $F_y$ ,  $F_{\max}$  și  $F_u$  (Fig. 5-11), fiecare model prezintă un o variație ușor diferită odată cu lărgirea lățimii aripilor. Atât  $dF_{\max}$  (deformația la forța maximă), cât și  $dF_u$  (deformația la forța ultimă) demonstrează o scădere clară pe măsură ce aripa se lărgeste, indiferent de grosimea plăcii de capăt (Fig. 5-12). Această scădere poate fi atribuită efectului de rigidizare a plăcii de capăt dat de talpă mai lată, care reduce numărul de linii de cedare și limitează în mod substanțial ductilitatea totală a îmbinării. Pe de altă parte, deformația la care apare  $F_y$  ( $dF_y$ ) arată doar schimbări ușoare, dar cu o tendință crescătoare pentru placa mai subțire  $t12$  și o tendință descrescătoare pentru cea mai groasă  $t15$ .

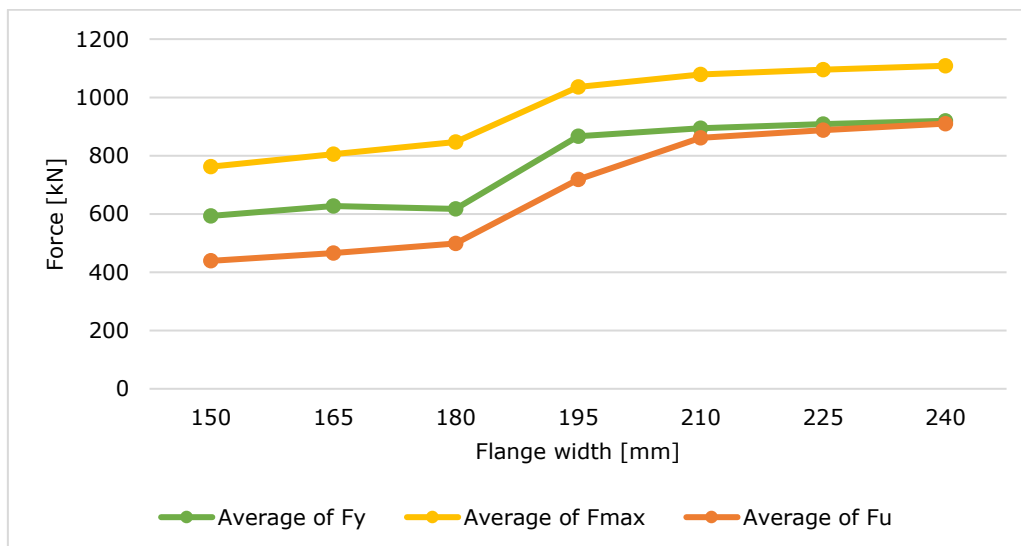


Fig. 5-11 Evoluțiile  $F_y$ ,  $F_{max}$  și  $F_u$  în funcție de lățimea tălpilor

Evoluția valorilor prezentate pentru diferitele forțe și deformații este prezentată în Fig. 5-11 și Fig. 5-12. În diagrame, atât curbele de forță, cât și cele de deformație prezintă o schimbare semnificativă a pantei în jurul valorii de 180mm la 195mm. Aceste valori coincid cu valoarea lățimii totale a grupului de șuruburi, care este de 186mm ( $b_{bg}$ ). Schimbarea abruptă a pantei indică un punct de tranziție în care comportamentul îmbinării este influențat de poziția relativă a marginii tălpilor și de poziția șuruburilor exterioare.

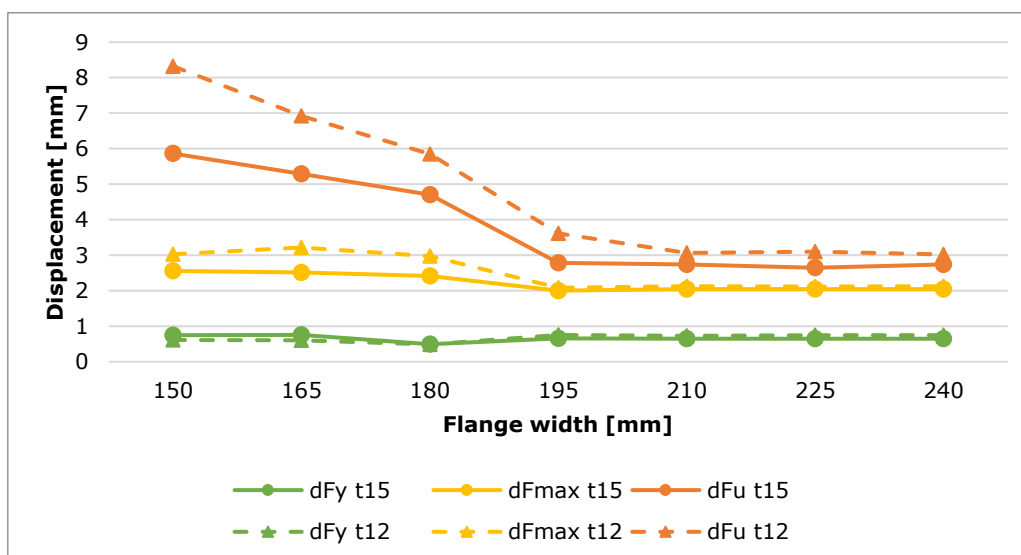


Fig. 5-12 Evoluțiile  $dF_y$ ,  $dF_{max}$  și  $dF_u$  în funcție de lățimea tălpilor

#### 5.4. Parametrul de validitate

Mai mulți parametri au un impact direct asupra comportamentului îmbinărilor 4B. Următoarele tendințe ar trebui luate în considerare în proiectarea cu o astfel de configurație:

- În funcție de obiectivul dorit, diferite lățimi ale tălpii profilului conduc la comportamente diferite. În timp ce o talpă a profilului mai lată decât lățimea grupului de șuruburi  $b_{bg}$  asigură o contribuție mai bună a șuruburilor exterioare și rezultate mai mari de rezistență, aceasta reduce ductilitatea și asigură un comportament post-critic benefic; Șuruburile interioare ar trebui plasate în interiorul limitelor lățimii tălpii;
- Valorile raportului  $t/d$  și ale indicatorului  $\delta_{2-3}$  reflectă, de asemenea, diferite tendințe de comportare. În timp ce valori ridicate  $t/d > 0,51$  și  $\delta_{2-3} > 95\%$  asigură o bună rezistență, pentru o ductilitate mai mare, valorile  $t/d$  între 0,47 și 0,49 și  $\delta_{2-3}$  între 88% și 91% conduc la rezultate optime pentru grinzi mai late ( $b \geq b_{bg}$ ), iar valorile  $t/d$  între 0,50 și 0,52 și  $\delta_{2-3}$  între 94% și 96% conduc la rezultate optime pentru grinzi mai înguste ( $b < b_{bg}$ );
- Capacitatea de rotire estimată la forța maximă și în etapele post-critice poate fi calculată prin următoarele formulări:

$$\frac{\theta_u}{\theta_y} = 0.40 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-2.65} \quad \text{but } \frac{\theta_u}{\theta_y} < 9 \quad (5-5)$$

$$\frac{\theta_{max90}}{\theta_y} = 0.43 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-2.62} \quad \text{but } \frac{\theta_{max90}}{\theta_y} < 9.35 \quad (5-6)$$

$$\frac{\theta_{max80}}{\theta_y} = 0.45 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-2.62} \quad \text{but } \frac{\theta_{max80}}{\theta_y} < 9.86 \quad (5-7)$$

$$\frac{\theta_{max50}}{\theta_y} = 0.48 \cdot \left( \frac{t}{d} \sqrt{\frac{f_y}{f_{ub}}} \right)^{-3.04} \quad \text{but } \frac{\theta_{max50}}{\theta_y} < 17.15 \quad (5-8)$$

- Pentru întregul proces de proiectare, sudurile ar trebui proiectate pentru a susține punctele potențiale de concentrare a tensiunilor, în special la marginile tălpii, în care forța este transferată la șuruburile exterioare;

#### 5.5. Concluzii

Configurația cu patru șuruburi pe rând (4B) a prezentat în mod constant valori mai mari ale forței maxime ( $F_{max}$ ) în comparație cu configurația cu două șuruburi pe rând (2B). Acest efect a fost în mod deosebit pronunțat atunci când configurația 4B a fost combinată cu profile de grinzi mai late și tălpi mai rigide în raport cu șuruburile. În mod remarcabil, îmbinările cu tălpi mai rigide au demonstrat o rezistență semnificativ îmbunătățită și un comportament post-critic important. Cu toate acestea, profilele de grinzi mai late, care au demonstrat valori mai mari ale rezistenței, au prezentat limitări în ceea ce privește ductilitatea post-critică. În plus, utilizarea



diametrelor mai mari ale șuruburilor a condus la deformarea plastică timpurie a aripilor tălpii și la scăderea rezistenței totale la întindere.

În ceea ce privește ductilitatea prin deformare, studiul a demonstrat că valorile de deformare la forța de cedare și la forța maximă variază între diferitele configurații. În general, configurația 4B a prezentat o capacitate de deformație mai mare, indicând o ductilitate îmbunătățită. Combinarea tălpiilor mai late cu diametre mai mici ale șuruburilor a condus la valori mai mari ale ductilității și la un comportament post-critic îmbunătățit. Profilele mai late ale grinzilor au contribuit în mod sistematic la îmbunătățirea ductilității, cu excepția cazurilor în care o distribuție mai largă a șuruburilor a redus rezerva de rezistență post-critică a îmbinării. După o analiză statistică, sunt propuse expresii ale rotirilor (?) pentru cele trei etape ale ductilității post-critice.

Rezultatele studiului numeric subliniază interacțiunea complexă dintre diferiți parametri în proiectarea îmbinărilor metalice cu placă de capăt și cu șuruburi. În timp ce configurația 4B oferă o rezistență sporită, atingerea unui echilibru optim între rezistență și ductilitate necesită o considerație atentă a rigidității tălpii, profilului grinzii și a distribuției șuruburilor. Rezultatele sugerează că în cazul configurațiilor care favorizează o tendință către modul 2 de cedare, oferă un compromis favorabil între rezistență și comportamentul post-critic.

Evoluția rezultatelor în raport cu indicatorul  $\delta_{2-3}$  este semnificativă. Configurațiile care prezintă o valoare a lui  $\delta_{2-3}$  între 89,1% și 96,2%, indicând o înclinare către modul 2 de cedare către modul 3, au prezentat rezultate mai bune în ceea ce privește atât rezistența, cât și ductilitatea. Raportul  $\delta_{2-3}$  pare să servească ca un indicator important pentru realizarea unui echilibru dorit între rezistență și ductilitate în diferite configurații.

Programul experimental și simulările numerice au relevat mai multe constatări cheie privind influența lățimii tălpii asupra rezistenței la forța de cedare, rezistenței maxime, a deformării plastice și a modurilor de cedare:

- Comportamentul tălpii a prezentat diferențe semnificative pentru profilele de grinzi HEA260 și IPE360. Talpa mai largă a profilului HEA260 a condus la un model de cedare în concordanță cu modelele non-circulare considerate, în timp ce talpa profilului IPE360 a experimentat o cedare plastică importantă în zonele laterale ale tălpii. Acest lucru indică faptul că lățimea tălpii afectează caracteristicile de deformare ale tălpii.
- Modelele numerice analizate au arătat că o creștere sistematică a lățimii tălpii de la 150 mm la 240 mm a condus la valori mai mari ale rezistenței la forța de cedare și rezistența maximă, dar acest lucru este însoțit de o scădere a deformațiilor totale la forța maximă și forța ultimă datorită efectului de rigidizare al tălpii mai late.

- Modelele cu un grup de șuruburi mai dispersat (pe orizontală) sunt limitate de constrângerile geometrice ale regiunii sudate. În ciuda potențialului lor pentru deformări suplimentare, ductilitatea maximă realizabilă este restrânsă de limitele zonei sudate.

## 6. ROBUSTEȚEA CADRELOR METALICA NECONTRĂVÂNTUITE CU ÎMBINĂRI REZILIENTE

Adoptarea unei configurații reziliente pentru îmbinări poate dovedi a fi o soluție adecvată pentru situații excepționale de proiectare în care robustețea este importantă. În acest capitol, se efectuează o analiză a robusteții asupra unei clădiri metalice multietajate considerând o proiectare clasică pentru o zonă cu seismicitate redusă dar fără prevederi specifice pentru alte încărcări accidentale. Analiza este extinsă prin variația mai multor parametri, cum ar fi tipul de grindă și configurația îmbinării.

Adoptarea unei configurații reziliente pentru îmbinare poate fi o soluție rațională chiar și în situații de proiectare în care rezistența îmbinării pare a fi superioară celei a elementelor îmbinate: chiar dacă în faza de proiectare rezistența îmbinării pare mai mare decât cea a grinzilor, în realitate există mai multe situații în care rezistența reală a grinzii poate fi mai mică decât cea a îmbinării:

- iv. Discrepanțe în evaluarea suprarezistenței materialului (excesivă în grindă și/sau deficitară în componentele de îmbinare);
- ii. Constrângeri laterale nejustificate sau rigiditate excesivă;
- iii. Supraestimarea lungimii reale de flambaj;
- iv. Subestimarea rigidității îmbinării, așa cum este definită în modelul numeric, conducând la valori scăzute ale momentelor de încovoiere.

### 6.1. Evaluarea robusteții

O metodă curentă pentru evaluarea performanței robusteții unei clădiri este prin analiza în cazul îndepărtării unui stâlp de susținere. În proiectarea unei clădiri noi, trebuie să se aplice măsuri specifice pentru protejarea acesteia împotriva prăbușirii progresive ca urmare a unor acțiuni accidentale extreme, în funcție de clasa de consecințe a clădirii. În analiza scenariului propus de înlăturare a stâlpului, se așteaptă ca structura și elementele structurale și a îmbinărilor acestora să aibă o rezistență și ductilitate adecvată, astfel încât căile alternative de încărcare să poată să se dezvolte și să evite prăbușirea clădirii.

În cazul pierderii unui stâlp al unui cadru MRF, grinzile adiacente (și îmbinările respective grindă-stâlp) trebuie să susțină partea rămasă a stâlpului și să permită dezvoltarea acțiunii catenare. În timp ce secțiunile grinzilor din oțel sunt în general ductile la încărcări combinate de tracțiune și încovoiere, același lucru nu este de valabil întotdeauna pentru îmbinările semi-continue. Conform lui Dinu et al., acest tip de

îmbinare prezintă un comportament necorespunzător pentru dezvoltarea finală a forțelor catenare.

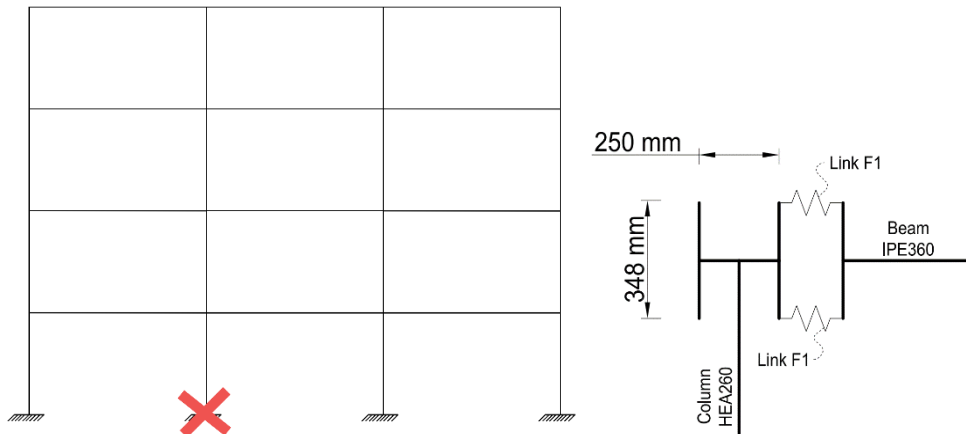


Fig. 6-1 Eliminarea suportului stâlpului și configurația îmbinării

În scenariul propus în acest capitol, de pierdere a suportului stâlpului, comportarea unui cadru metalic MRF este comparată în cazul utilizării unei configurații clasice de îmbinare 2B și o configurație alternativă cu patru șuruburi pe rând (4B). Studiul consideră o analiză a cadrului 2D, prin eliminare unuia dintre stâlpii centrali ai cadrului marginal MR ai clădirii propuse pentru înlăturare. În această analiză, sunt considerate atât comportarea dinamică a structurii în e timp, cât și neliniaritatea geometrică a elementelor, prin luarea în considerare a masei materialului (și a efectelor inerțiale asociate) și recalcularea matricei de rigiditate la fiecare pas de incrementare

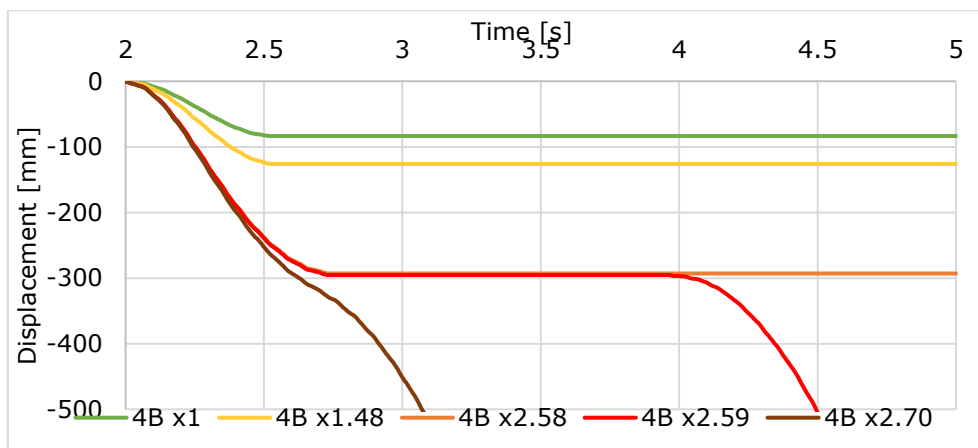


Fig. 6-2 Evoluția deplasării descendente pentru modelul structural 4B\_HEA260\_t15\_M20

Încărcarea gravitațională în combinația excepțională a fost incrementată cu factorul de supraîncărcare -  $\Omega$ . Pentru fiecare valoare a încărcării, a fost înregistrată și trasată deplasarea verticală în punctul înlăturării suportului stâlpului în funcție de timp. Etapele considerate relevante au fost încărcarea de bază ( $\Omega=1$ ), punctul prăbușirii structurale și trei puncte separate în comportamentul îmbinării pentru cel mai deformabil: i. pragul elastic (atingerea  $\theta_y$ ); ii. pragul plastic (atingerea  $\theta_u$ ); și iii. pragul de cedare (atingerea  $\theta_{max}$ ).

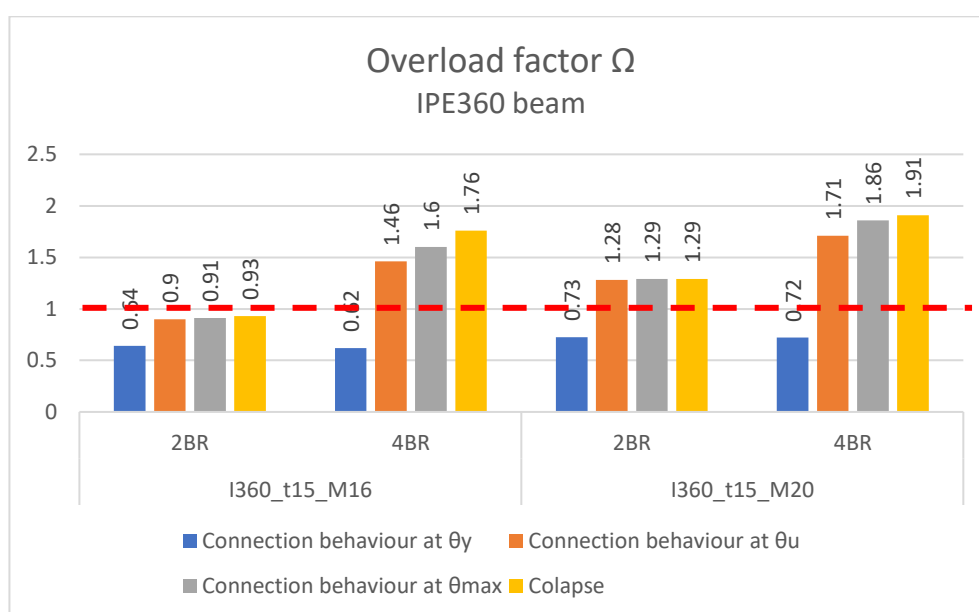


Fig. 6-3 Factorul de suprasaîncărcare pentru configurațiile IPE360

În Fig. 6-3 și Fig. 6-4 se pot compara valorile  $\Omega$  între diverse configurații ale modelelor structurale. În ceea ce privește varianta originală a cadrelor IPE360, modelul 2B\_I360\_t15\_M16, se poate observa că toate valorile  $\Omega$  sunt mai mici decât 1 (reprezentat de linia roșie punctată), ceea ce înseamnă că structura ar colapsa sub acțiunea încărcărilor accidentale de proiectare. În varianta 4B, ar fi nevoie de o creștere de 46% a încărcării de proiectare pentru a ajunge la punctul critic în îmbinare și o creștere de 76% pentru a ajunge la colaps. În varianta M20, creșterea performanței este similară pentru configurațiile 2B și 4B, iar varianta 2B poate evita acum cedarea îmbinării ( $\Omega > 1$ ). Cu toate acestea, în contrast cu omologul său 4B, răspunsul sistemului 2B demonstrează o lipsă de reziliență, suportând doar 1% în plus între punctele critic și de colaps. În schimb, varianta 4B arată faptul că 20% din încărcare poate fi susținută după primul punct de cedare înainte ca structura să cedeze.

Configurația originală (2B) în care grinzile au profil HEA260, modelul 2B\_HEA260\_t15\_M20, prezintă o rezervă de 14% pentru prima cedare a îmbinării și 30% până la colaps, ceea ce reprezintă o rezervă de ductilitate importantă dar limitată. Configurația corespunzătoare cu 4B, a susținut o încărcare suplimentară de 48% până la punctul critic și o rezervă considerabilă de 159% până la cedare. În varianta utilizării unor îmbinări cu șuruburi M16 (mai mici), varianta 2B a colapsat înainte de a atinge încărcarea de proiectare ( $\Omega_{pc}=0.88$ ), dar configurația omoloagă 4B a arătat un nivel important de reziliență: în ciuda faptului că îmbinările au atins punctul de cedare înainte de a atinge încărcarea de proiectare, structura a putut susține o încărcare suplimentară de 46% înainte de a cedare.

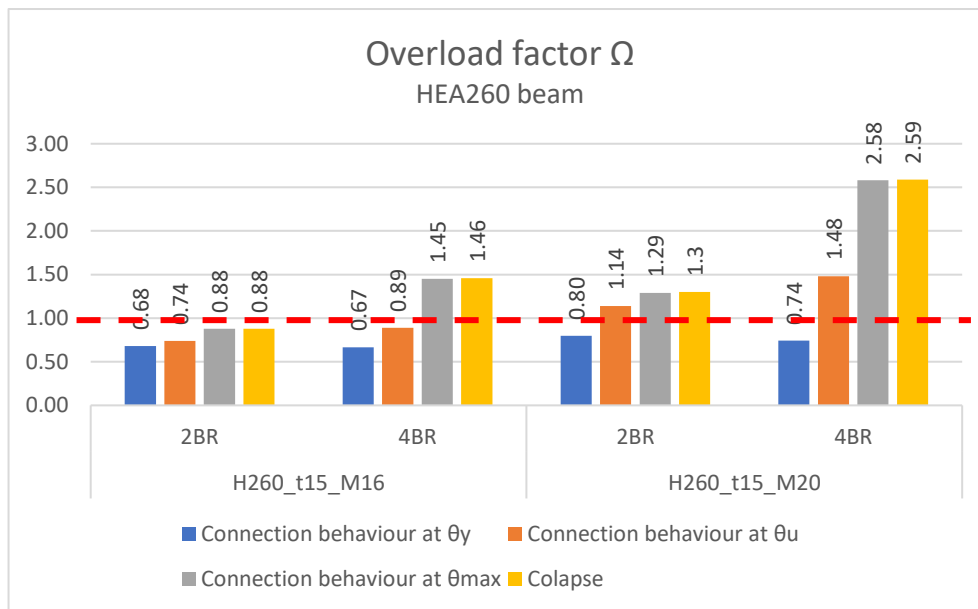


Fig. 6-4 Factorul de supraîncărcare pentru configurațiile HEA260

## 6.2. Concluzii

În faza elastică, ambele modele originale cu îmbinări în configurație 2B și placă de capăt cu grosimea de 15 mm, respectiv configurația 2B\_t15\_M16 (grinzi IPE respectiv HEA), prezintă valori reduse ale multiplicatorului de încărcare, indicând lipsa unei proiectări optimizate a îmbinării pentru a permite transferul și redistribuirea forțelor în cadrul structurii care să evite cedarea acesteia. Acest concluzie se poate trage și în cazul configurației 4B\_H260\_t15\_M16, chiar dacă a susținut un spor de încărcare cu 20% mai mare decât modelul omolog 2B. De asemenea, chiar dacă configurația 4B prezintă în mod constant valori mai mari ale rezistenței elastice, de până la 62,2%, diferența este mică în comparație cu variațiile înregistrate în comportamentul post-elastic.

În faza plastică ( $F_u$ ), influența rândurilor suplimentare de șuruburi adăugate pe exterior este mult mai pronunțată, oferind structurii o rezervă semnificativă de rezistență și ductilitate, crescând până la 249% în comparație cu faza elastică, în timp ce soluția clasică permite doar o creștere maximă 78%. Diferența dintre 2B și 4B este și mai pronunțată în cazul grinzii HEA260, pentru care talpa mai lată permite o rigidizare suplimentară a plăcii de capăt și o distribuție mai bună a forțelor către șuruburile exterioare. În faza post-critică ( $F_{max}$ ), diferențele rămân ridicate, de 248% pentru 4B în comparație cu 161% pentru 2B. Cu toate acestea, avantajele relative între punctul post-critic și punctul de cedare au fost foarte limitate în varianta 4B\_HEA260 (1%) în comparație cu 4B\_IPE360 (16%). Prin urmare, rezerva dintre cedarea unei îmbinări și prăbușirea întregii structuri este nesemnificativă, semnalând sensibilitatea structurii la o îmbinare cu o comportare deficicientă într-un scenariu care include pierderi de elemente structurale.

După prima cedare, rezerva de rezistență oferită de îmbinări are un impact redus asupra rezultatului global. Dar în timp ce efectul acestei rezerve este inexistent în cazul îmbinărilor 2B, în cazul particular al configurației 4B cu profile de grinzi înguste (IPE360), această rezervă aduce o contribuție mică, dar semnificativă la comportamentul structural. În acest caz, placa de capăt mai deformabilă permite o redistribuire mai eficientă a forțelor între șuruburi după apariția primei cedări ale șuruburilor. Acest lucru poate adăuga până la 16% la valoarea multiplicatorului de încărcare și poate întârzia cedarea structurală progresivă.

Ca o concluzie generală, se poate afirma că performanța îmbinărilor cu configurație 4B într-un context complex al unei structuri necontravântuite poate adăuga niveluri importante de reziliență întregii structuri. Indicatorii de performanță pentru aceste îmbinări sunt strâns legați de raportul  $t/d$ , oferind performanțe îmbunătățite în limite specifice, în funcție de caracteristicile geometrice ale componentelor îmbinării.

## 7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PROPRII

Studiile prezentate au demonstrat că în configurațiile de îmbinări cu patru șuruburi pe rând (4B) se înregistrează constant o rezistență mai mare, în special în cazul profilurilor de grinzi cu tălpi mai late și a plăcilor de capăt mai rigide. Pentru grinzi HEA260, această creștere a fost constantă, în timp ce pentru profilele de grinzi IPE360 creșterea a variat în funcție de diferitele moduri de cedare. Diferențele de rezistență la cedare dintre configurațiile 2B și 4B au fost remarcabile, în special în cazul îmbinărilor cu șuruburi cu diametre mai mici și plăci de capăt mai groase. Plăcile de capăt mai rigide au îmbunătățit rezistența și comportamentul post-critic, iar profilele cu tălpi mai late ale grinzilor au prezentat limite în ceea ce privește ductilitatea post-critică. Diametrele mai mari ale șuruburilor au condus la deformări plastice premature la interfața dintre profilul de grindă și placa de capăt.

Ca tendință generală, valorile deformațiilor înregistrate la nivelul plăcii de capăt la cedare pentru configurația 4B au fost mai mici decât în cazul sistemelor 2B, indicând o rigiditate crescută în faza elastică. În schimb, deformația la rezistența maximă a variat între diversele configurații considerate, configurația 4B prezentând în general o ductilitate mai mare. Obținerea unui echilibru optim între rezistență și ductilitate necesită o considerație atentă a rigidității plăcii de capăt, profilului de grindă și respectiv a distanțelor de distribuție a șuruburilor.

Încadrând studiul analizat în contextul proiectării după EN 1993-1-8, se poate afirma că în cazul configurațiilor care favorizează o tendință de cedare de la modul 2 către modul 3 de cedare se oferă un compromis favorabil între rezistență și ductilitate. Varierea lățimii tălpii în proiectarea îmbinărilor influențează, de asemenea, caracteristicile de deformare ale plăcii de capăt: creșterea sistematică a lățimii tălpii îmbunătățește capacitatea de rezistență, rezistența la cedare și rezistența maximă, dar induce o reducere a deformației totale datorită efectului de rigidizare a plăcii de capăt. În acest caz relația dintre lățimea tălpii și lățimea grupului de șuruburi reprezintă cheia în tranziția comportării îmbinării. Configurațiile cu grupuri de șuruburi mai dispersate sunt limitate de constrângerile geometrice în zona sudată, limitând ductilitatea îmbinării.

Din studiile extinse numerice și experimentale efectuate, pot fi trase două concluzii principale:

- Pentru configurațiile de îmbinări 2B caracterizate printr-o cedare predominantă către modul 1 și 2 de cedare, nu se observă diferențe semnificative între configurațiile 2B și 4B în faza elastică. Cu toate acestea, în faza plastică și post-critică, sunt înregistrate îmbunătățiri semnificative ale performanței, atât în ceea ce privește rezistența, cât



și ductilitatea, prin recuperări succesive și semnificative ale rezistenței.

- Pentru configurațiile de îmbinări 2B caracterizate printr-o cedare predominantă asemănătoare modului 3, configurația 4B permite o creștere semnificativă a rezistenței, în timp ce mecanismul de cedare rămâne fragil, caracterizat de cedarea șuruburilor, prezentând nivele scăzute de ductilitate.

Studiile numerice și experimentale au condus la mai multe indicații de proiectare pentru a ajuta la configurarea unei îmbinări ductile de tip 4B.

Răspunsul și performanța robustă a unei structuri MRF au fost analizate într-un scenariu al unui cadru metalic necontravântuit prin pierderea unui stâlp, concentrându-se în mod specific pe comportarea îmbinărilor grindă-stâlp. Au fost considerate două configurații de îmbinare, analizate anterior - t15\_M16 (raport t/d de 0,48) și t15\_M20 (raport t/d de 0,38) pentru capacitățile lor de rezistență și ductilitate. În faza elastică, ambele modele originale (2B) au prezentat capacități de transfer necorespunzătoare ale încărcărilor, conducând la vulnerabilitate structurală. Cu toate că în cazul configurației 4B\_H260\_t15\_M16 au fost înregistrate nivele superioare de încărcare decât în cazul echivalentului 2B, diferența de comportare demonstrată a fost limitată.

În faza plastică, adăugarea rândurilor exterioare de șuruburi a îmbunătățit semnificativ rezervele de rezistență și ductilitate, în special în configurația 4B. Varianta de grindă HEA260 a demonstrat o creștere mai importantă datorită tălpii mai late. În faza post-critică, câștigurile în rezistență au rămas ridicate, în special pentru configurația 4B. Cu toate acestea, sensibilitatea structurii față de îmbinările cedate a devenit evidentă, acestea având o rezervă limitată între cedarea îmbinării și cedarea întregii structuri.

După prima cedare de șuruburi, rezerva de rezistență a avut un impact redus în ansamblu, dar configurația 4B, în special cu profile de grinzi înguste (IPE360), a demonstrat o ușoară contribuție la reziliența structurală. Placa de capăt deformabilă a facilitat redistribuirea eficientă a forțelor, întârziind potențial prăbușirea progresivă cu până la 16%.

În ansamblu, în cazul analizelor structurale, performanța îmbinărilor cu configurația 4B a contribuit semnificativ la reziliența structurală, cu indicatori de performanță strâns legați de raportul t/d în cadrul unor valori geometrice specifice.

### 7.1. Cercetări ulterioare

În lumina rezultatelor obținute în acest studiu, s-au deschis mai multe căi de cercetare legate de îmbinările cu patru șuruburi pe rând:

- comportarea șuruburilor și a sudurilor joacă un rol crucial în răspunsul post-critic al unei îmbinări. În tipul specific de îmbinare studiat în această teză, anticiparea precisă a comportamentului său post-critic reprezintă o necesitate dacă acestea ar trebui să joace un rol în evitarea prăbușirii parțiale sau totale a structurii. În acest sens, tipul și momentul cedării șuruburilor trebuie să fie anticipate în situațiile în care deformațiile importante ale plăcii de capăt conduc la forță axiale excentrice aplicate pe șurub. De asemenea, datorită rolului semnificativ al rigidității plăcii de capăt în comportamentul îmbinării, comportamentul sudurilor la moment încovoietor și torsiune ar trebui să fie investigat, în special în jurul punctelor de concentrare a eforturilor și discontinuităților geometrice;
- abordarea pe macro-componente, deja adoptată de mai mulți cercetători, necesită o validare experimentală în contextul îmbinărilor la scară reală;
- armonizarea rezultatelor cu standardele de proiectare actuale, deși inițiată, necesită o definiție mai clară, în special în ceea ce privește limitele aplicării sale, cum ar fi lățimea tălpii, corelarea raportului  $t/d$  și limitările sau impunerile tehnologice, cum ar fi cerințele specifice de sudare;
- O metodă securitară de evaluare a capacității de rotire este importantă pentru anticiparea corectă a comportării îmbinărilor în condiții de încărcare extremă. Plecând de la limitările standardelor actuale, trebuie dezvoltată o abordare securitară pentru a caracteriza comportarea post-critică a îmbinărilor metalice pentru aplicare în proiectare. Expresiile propuse în cadrul acestui studiu trebuie confirmate printr-un număr semnificativ de teste experimentale;
- Organele de asamblare cu două piulițe în loc de una pot reduce probabilitatea cedării filetelui, ceea ce poate crește suplimentar reziliența conexiunilor 4B, evitând cedările fragile care pot provoca cedări structurale nedorite;
- Am zis că integrăm aici și posibilitatea analizelor ciclice.

## REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- [1] F. Dinu, I. Marginean and D. Dubina, "Experimental testing and numerical modelling of steel moment-frame connections under column loss," *Engineering Structures*, no. 151, 2017.

- 
- [2] J.-F. Demonceau, J.-P. Jaspart, K. Weynand and C. Muller, "Connections with four bolts per horizontal row," in *EUROSTEEL 2011*, Budapest, 2011.
- [3] J. Demonceau, K. Weynand and C. Müller, "Analytical model to characterize bolted beam-to-column joints with four bolts per row," in *SDSS'Rio 2010 STABILITY AND DUCTILITY OF STEEL STRUCTURES*, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [4] J.-F. Demonceau, J.-P. Jaspart, K. Weynand and C. Muller, "Application of Eurocode 3 to steel connections with four bolts per horizontal row," in *Stability and ductility of Steel Structures 2010*, Rio de Janeiro, 2010.
- [5] Z. Pisarek and A. Kozłowski, "Characteristics of bolted endplate joints with four bolts in a row," in *10th Scientific Conference Rzeszow-Lviv-Kosice*, Kosice, Slovakia, 2005.
- [6] L. Massimo, R. Gianvittorio, S. Aldina and L. S. Da Silva, "Experimental analysis and mechanical modeling of T-stubs with four bolts per row," *Journal of Constructional Steel Research*, no. 101, pp. 158-174, 2014.
- [7] CEN, *EN1993-1-8 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, 2005.
- [8] D. L. Nunes, I. Marginen, A. Ciutina and F. Dinu, "Influence of four bolts per row connections on a steel frame building subjected to column," in *Integrity – Reliability – Failure 2018*, Lisbon, 2018.
- [9] O. Oberegge, *Bemessungshilfen für profilorientiertes Konstruieren*, Köln, 1997.
- [10] G. Sedlacek and K. Weynand, "Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau," 2002.
- [11] L. Calado, "Design of Connections," in *Seismic Resistant Steel Structures*, vol. 420, Vienna, Springer, 2000.
- [12] M. Ivanyi, "Semi-Rigid Connections in Steel Frames," *Semi-Rigid Joints in Structural Steelwork, International Centre for Mechanical Sciences*, vol. 419, 2000.
- [13] A. Gjukaj, P. Cvetanovski and F. Gashi, "THE EFFECT OF COLUMN WEB STIFFENERS ON MOMENT RESISTANCE AND DUCTILITY OF EXTENDED END-PLATE BOLTED CONNECTION," in *2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering - 2CroCEE*, Zagreb, 2023.
- [14] P. Wang, J. Xiu, J. Li and L. Yu, "Tensile behavior of cruciform stubs with four bolts per row," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 32, no. 1, 2023.

- [15] M. D'Aniello, R. Tartaglia, R. Landolfo, J.-P. Jaspart and J.-F. Demonceau, "Seismic pre-qualification tests of EC8-compliant external extended stiffened end-plate beam-to-column joints," *Engineering Structures*, vol. 291, 2023.
- [16] D. L. Nunes and A. Ciutina, "Behaviour of end-plate steel connections with 4 bolts per row under large deformations," in *9th International Conference on Steel and Aluminium Structures (ICSAS19)*, Bradford, 2019.
- [17] Dassault Systèmes, *Abaqus FEA 14.1*, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>, 2016.