
Linkuri demontabile hibride din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență (HYLINK)

Cod proiect: PN-III-P2-2.1-PED-2019-5427
Contractul de finanțare nr. 512PED / 2020

Raport științific și tehnic

*Etapa 3: Încercări experimentale pe îmbinări sudate și linkuri, și elaborare
recomandări de proiectare pentru linkuri hibride*

Rezumat

În acest raport sunt prezentate și sintetizate rezultatele activităților realizate în cadrul etapei 3/2022 a proiectului „Linkuri demontabile hibride din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență (HYLINK)”. Au fost realizate toate obiectivele conform planului de realizare a proiectului, iar rezultatele activităților sunt descrise din punct de vedere științific și tehnic în raportul curent. Activitatea 3.1 cuprinde realizarea unui set de încercări îmbinări sudate din diferite mărci de oțel, îmbinări care au fost proiectate și fabricate în etapele anterioare. Programul experimental a inclus 28 de specimene cu suduri de colț și cu suduri în adâncime, realizate din cele 3 mărci de oțel analizate – oțel obișnuit S235J2, oțel inoxidabil 1.4404 și oțel de înaltă rezistență S690QL. Dintre acestea, 4 specimene au fost rezervate procesului de calibrare a protocolului de încercări (viteză, cicluri, etc.) și a instrumentării necesare pentru a înregistra rezultatele cu acuratețe, 8 specimene au fost supuse la încercări monotone, iar 16 specimene au fost încercate oligociclic cu viteză constantă. În cadrul Activității 3.2 au fost realizate încercările monotone și ciclice pe 12 linkuri demontabile omogene și hibride (7 tipologii diferite), cu respectarea programului experimental și a protocolului de încercări descris în capitolul corespunzător. Activitatea 3.3 a implicat o serie de analize menite să permită evaluarea comportării linkurilor și determinarea caracterului cedării fiecărui link. Aceste activități au inclus: prelucrarea comparativă a datelor experimentale numerice în materie de deformări ciclice maxime, moduri de cedare structurale și diagrame forță tăietoare – rotire de forfecare în link; analiza fractografică a zonelor în care s-a produs cedarea; analize de duritate în 3 secțiuni ale îmbinărilor sudate debitate direct din linkurile încercate, precum și analize spectrografice, menite să detecteze variația conținutului de elemente însoțitoare ale oțelurilor aliate care ar putea influența negativ ductilitatea sudurilor. Pe parcursul Activității 3.4 s-a urmărit calibrarea modelelor numerice de material pe baza caracteristicilor mecanice înregistrate în cadrul încercărilor pe materiale de bază, pentru a servi ca date de intrare la modelarea numerică a încercărilor pe linkuri. Modelarea linkurilor s-a bazat pe ipoteze simplificatoare formulate în timpul calibrării modelului și a luat în considerație efectul de cadru, modelat explicit. Simulările numerice au permis extinderea studiului parametric cu variația anumitor caracteristici ale linkurilor. Pe baza rezultatelor studiilor de evaluare a comportării ciclice a linkurilor și a simulărilor numerice post-test, au fost formulate concluziile care au stat la baza elaborării recomandărilor de proiectare a linkurilor demontabile hibride din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență, în cadrul Activității 3.5. Aceste recomandări completează prevederile din codurile de proiectare în vigoare, prin reguli suplimentare pentru rigidizări, dar și propunerea unui criteriu îmbunătățit de încadrare a linkurilor hibride și a celor confecționate din oțel inoxidabil, în categoria „linkuri scurte”, pe baza parametrului „lungime normalizată” care depinde de caracteristicile oțelurilor utilizate la confecționarea inimii și tălpilor linkului. Activitatea 3.6 a presupus formularea unor recomandări pentru alegerea mărcilor de sudare a oțelurilor diferite, pe baza observațiilor de pe parcursul programului experimental, dar și pe baza analizelor fractografice și spectrografice. Conform obiectivelor asumate în cadrul activității 3.7, rezultatele obținute pe parcursul proiectului de cercetare au fost diseminate prin elaborarea a 5 articole științifice.

Cuprins

1	Activitatea 3.1 Încercări oligociclice pe îmbinări sudate din materiale diferite.....	4
2	Activitatea 3.2 Încercări experimentale pe linkuri demontabile.....	6
3	Activitatea 3.3 Evaluarea comportării ciclice a linkurilor demontabile.....	8
4	Activitatea 3.4 Simulări numerice post-test pe linkuri demontabile.....	11
5	Activitatea 3.5 Elaborare recomandări de proiectare pentru linkuri demontabile hibride	14
6	Activitatea 3.6 Recomandări pentru alegerea mărcii și de sudare a oțelurilor diferite	17
7	Activitatea 3.7 Diseminarea rezultatelor 3: publicare 2 articole la conferințe sau în reviste	19
8	Concluzii	19

1 Activitatea 3.1 Încercări oligociclice pe îmbinări sudate din materiale diferite

Încercările experimentale pe specimene sudate au fost realizate pentru a verifica experimental ductilitatea în regim de solicitare monotonă și ciclică a detaliilor de sudură regăsite la îmbinarea sudată dintre inima linkului și talpa acestuia. Specimenele au fost concepute astfel încât să reproducă solicitarea preponderentă forfecare ce are loc în această îmbinare, vezi Figura 1. Specimenele experimentale au fost fabricate folosind patru combinații de materiale prezente în inima și talpa linkurilor vezi Tabelul 1. Au fost investigate două tipuri de sudură (de colț și în adâncime), cu lungimea nominală a sudurii l_s de 30 mm. Încercările de tracțiune și încercările oligociclice pe îmbinări sudate au fost realizate într-o mașină universală servo-hidraulică INSTRON 8805, vezi Figura 2.

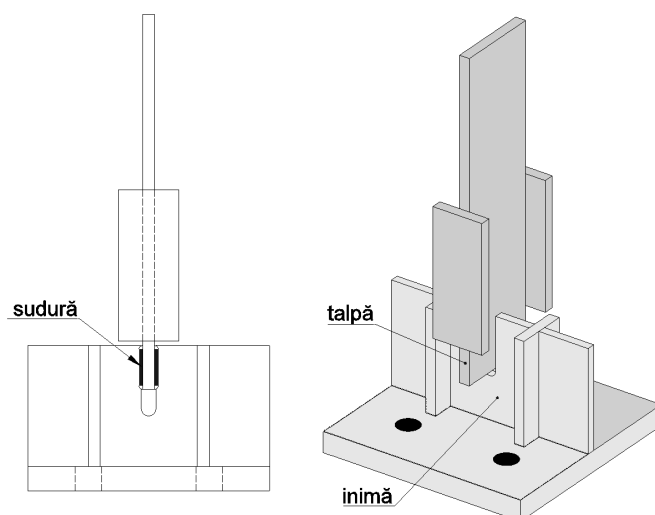


Figura 1. Specimene pentru încercări pe îmbinări sudate

Tabelul 1. Nomenclatorul îmbinărilor sudate

Specimene	Tip sudura	Oțel inimă	Oțel talpă	l_s , mm	Material de adaos
MM-F-M1 / C1 / C2	de colț, a=4mm	S235 J2	S235 J2	30	EN ISO 14341-A: G 42 4 M21 3Si1
MM-P-M1 / C1 / C2	în adâncime				
SS-F-M1 / C1 / C2	de colț, a=3mm	1.4404	1.4404	30	EN ISO 17632-A-T 42 2 P C/M 1 H5
SS-P-M1 / C1 / C2	în adâncime				
SH-F-M1 / C1 / C2	de colț, a=3mm	1.4404	S690 QL	30	EN ISO 17632-A-T 42 2 P C/M 1 H5
SH-P-M1 / C1 / C2	în adâncime				
SM-F-M1 / C1 / C2	de colț, a=3mm	1.4404	S235 J2	30	EN ISO 17632-A-T 42 2 P C/M 1 H5
SM-P-M1 / C1 / C2	în adâncime				

Pentru fiecare categorie de specimene au fost realizate câte o încercare în regim monoton (identificată prin indicativul M1), și câte două încercări în regim ciclic (identificate prin indicativele C1 și C2). Protocolul ciclic a constat din câte două cicluri pentru următoarele trepte de deformare specifică ε_{xy} : ± 0.005 , ± 0.02 , ± 0.04 ..., urmate de creșterea progresivă a amplitudinii cu un pas de 0.02. Încercările au fost efectuate la viteză de deformare $\dot{\varepsilon}_{xy} = 0.002 \text{ s}^{-1}$, ceea ce a corespuns de aproximativ unei viteze de încărcare $\dot{d} = 0.07 \text{ mm/s}$. Viteza de încărcare a fost aplicată în control de deplasare, prin intermediul unui captor inductiv. Răspunsul specimenelor a fost monitorizat prin tehnica corelării imaginii digitale, ceea ce a permis pe de o parte măsurarea deformăției d a specimenului experimental, iar pe de altă parte, analiza câmpului de deformății specifice.

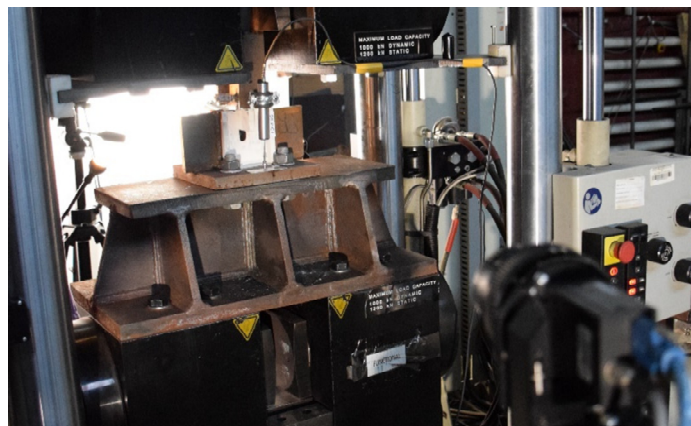


Figura 2. Montajul experimental

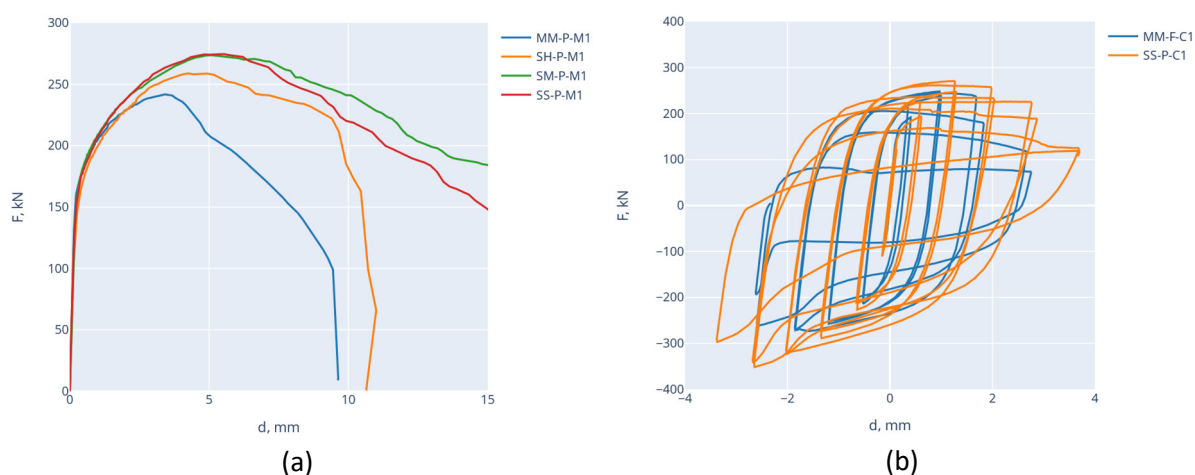


Figura 3. Curbe efort-deformație pentru încercări monotone (a) și ciclice (b)

În Figura 3a sunt comparate curbele efort-deformație pentru speci­menele realizate cu sudură în adâncime, sol­citate în regim monoton. Se poate observa o ductilitate superioară a speci­menelor cu inima din oțel inoxidabil (SS-P-M1, SM-P-M1 și SH-P-M1) în comparație cu cel din oțel moale (MM-P-M1). Tendința s-a păstrat și în cazul speci­menelor sol­citate în regim ciclic (Figura 3b), în care se poate observa o histereză mai stabilă a speci­menului din oțel inoxidabil (SS-P-C1) în comparație cu cel din oțel moale (MM-F-C1).

Analiza prin tehnica corelării imaginii digitale a câmpului de deformații specifice a relevat în general dezvoltarea unor deformații specifice de forfecare ε_{xy} în zona adiacentă sudurii (vezi Figura 4a pentru speci­menul MM-F-M1), ceea ce explică modul de cedare (în materialul de bază) observat pentru același speci­men (vezi Figura 4b). Cu toate că au demonstrat o ductilitate superioară, speci­menele din inox și hibride au fost caracterizate în general de un mod de cedare mixt (în materialul de bază și sudură), vezi Figura 4c.

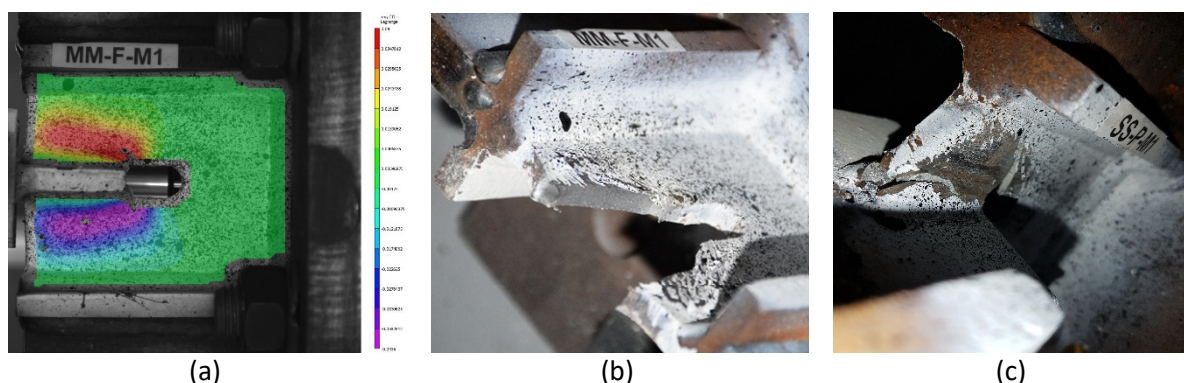


Figura 4. Câmpul de deformății specifice de forfecare pentru specimenul MM-F-M1 (a) și modul de rupere pentru speciemenle MM-F-M1 (b), respectiv SS-P-M1 (c)

2 Activitatea 3.2 Încercări experimentale pe linkuri demontabile

Montajul experimental constă dintr-o serie de subansamble (Figura 5):

- *cadrul experimental* - un cadru contravântuit excentric alcătuit din doi stâlp articulați la bază, o grindă superioară articulată la ambele capete, și grinzile rigide cu contravântuiri, echipat cu linkuri demontabile.
- *peretele de reacțiune* care permite realizarea încercărilor quasi-statice prin susținerea actuatorilor care exercită o încărcare asupra structurii. Acest perete are o rezistență substanțial mai înaltă decât structura încercată, și dezvoltă deformății de câteva ordine de mărimi mai mici.
- *actuatorul servo-hidraulic* cu o capacitate de 1000 kN și o cursă de ± 375 mm, echipat cu o unitate hidraulică, controller și articulații sferice care previn cedarea echipamentului. Actuatorul impune o deplasare la vârful stâlpului cadrului contravântuit excentric, prin intermediul unei piese de transfer;
- *planșeu puternic*, cu rolul de a susține toată structura. Acesta e înzestrat cu puncte de fixare amplasate sistematic la intervale de 0.25 - 1.0 m;
- *sistemul de ghidare* compus din grinzi, stâlpi, contravântuiri și rulmenți, asigurând stabilitatea cadrului experimental prin blocarea deplasărilor în afara planului.

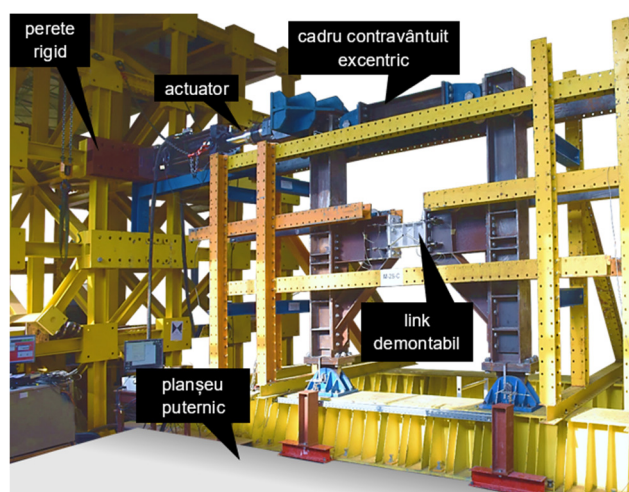


Figura 5. Montajul experimental pentru încercări pe linkuri izolate

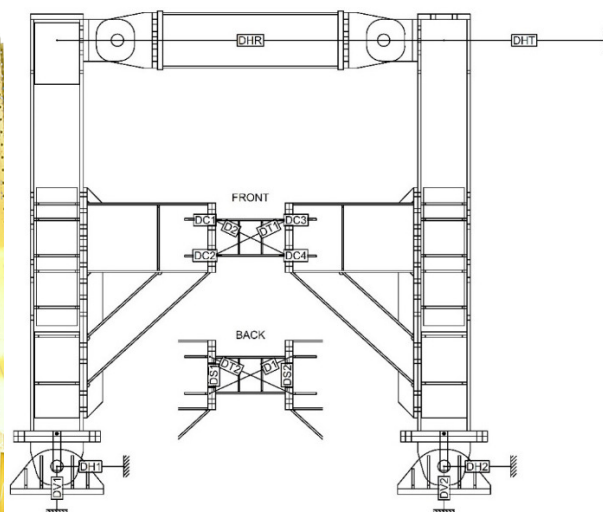


Figura 6. Instrumentarea speciemenelor experimentale

Așa cum este ilustrat în Figura 6, instrumentarea cadrului experimental include 2 tipuri de traductori pentru înregistrarea răspunsului întregii structuri dar și a zonei disipative în particular:

- *instrumentarea locală* a linkurilor, alcătuită din 10 captori locali: DT1 și DT2 pentru înregistrarea deformațiilor totale ale linkului, D1 și D2 pentru monitorizarea deformațiilor în inima linkului, DC1 - DC4 pentru măsurarea rotirii îmbinărilor și DS1 cu DS2 pentru a depista alunecările în îmbinări (Figura 7);
- *instrumentarea globală*, care constă din 6 traductori de deplasare globali: orizontali (DH1 și DH2) și verticali (DV1 și DV2) pentru monitorizarea alunecării în articulațiile stâlpilor, traductorul DHT pentru înregistrarea deplasării orizontale la vârf, și traductorul de deplasare orizontală relativă între părțile superioare ale stâlpilor DHR.

E necesar să se menționeze că linkurile, fiind zone disipative, au fost vopsite cu var pentru a facilita observarea vizuală a degradărilor la curgerea oțelului.

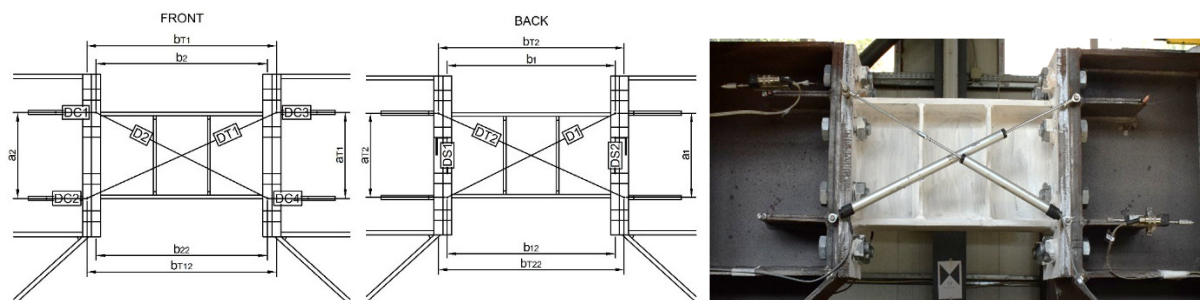


Figura 7. Traductorii de deplasare ai linkului

Ținând cont de baza materială existentă în Laboratorul CMMC din cadrul Facultății de Construcții, au fost proiectate și fabricate doar două elemente din standul experimental (ansamblul grindă-contravântuire), elementele existente fiind hașurate în Figura 8. În acest context au fost calculate eforturile de calcul în stand, astfel încât capacitatea necesară a actuatorului să nu depășească 950 kN – capacitatea actuatorului din laboratorul CEMSIG. Au fost realizate desenele de execuție, caietul de sarcini și au fost fabricate 12 linkuri, prezentate în Tabelul 2.

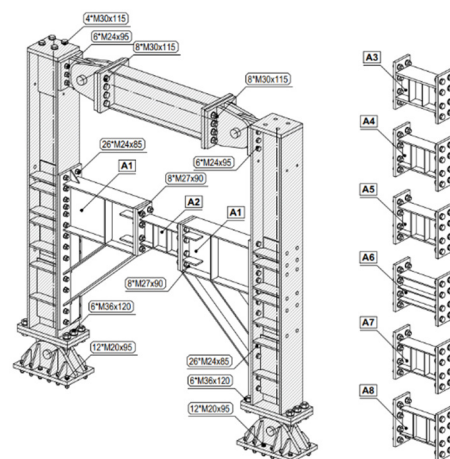


Figura 8. Ansamblu spațial și specimene experimentale – linkuri

Tabelul 2. Nomenclatorul linkurilor pentru programul experimental

ansamblu	tipologie	părți rigidizate	marcă oțel	dimensiuni	protocol de încărcare	nr. de spec.
A2	MCS +2 rig. - referință	1	S235	240x140x10x8	M,C	2
A3	MCS – ptr încercarea îmbinării	1	S355	255x200x20x25	M,C	2
A4	SS + 2 rig.	1	1.4404	250x140x12x8	M,C	2
A5	SS + 2 rig. duble	2			C	1
A6	SS+MCS+1 rig. dublă oriz.	2	1.4404+S235	240x140x10x8	C	1
A7	SS+MCS+2 rig.	1			C	2
A8	SS+HSS+2 rig. duble	2	1.4404+S690	250x80x10x8	C	2

În cadrul acestei etape, pentru caracterizarea comportării linkurilor au fost aplicate două protocoale de încercări: protocolul de încercări monotone și ciclice.

Protocolul de încercări monotone

Scopul încercărilor monotone pe linkuri este determinarea principalelor caracteristici ale răspunsului linkurilor pentru o ulterioară calibrare a modelului cu elemente finite. Acest protocol presupune aplicarea unei deplasări la vârful stâlpului până la cedare.

Protocolul de încercări ciclice

Cerințele pentru încercări ciclice pe linkuri sunt prevăzute în secțiunea K2.4c a standardului american ANSI/AISC 341-16 „Seismic provisions for structural steel buildings” [11]. Se specifică impunerea unei rotiri totale după cum urmează:

- 6 cicluri la $\gamma_{total} = 0.00375$ rad
- 6 cicluri la $\gamma_{total} = 0.005$ rad
- 6 cicluri la $\gamma_{total} = 0.0075$ rad
- 6 cicluri la $\gamma_{total} = 0.01$ rad
- 4 cicluri la $\gamma_{total} = 0.015$ rad
- 4 cicluri la $\gamma_{total} = 0.02$ rad
- 2 cicluri la $\gamma_{total} = 0.03$ rad
- 1 ciclu la $\gamma_{total} = 0.04$ rad
- 1 ciclu la $\gamma_{total} = 0.05$ rad
- 1 ciclu la $\gamma_{total} = 0.07$ rad
- 1 ciclu la $\gamma_{total} = 0.09$ rad
- încărcare continuă cu un increment de $\gamma_{total} = 0.02$ rad, cu un singur ciclu de încărcare la fiecare valoare a rotirii.

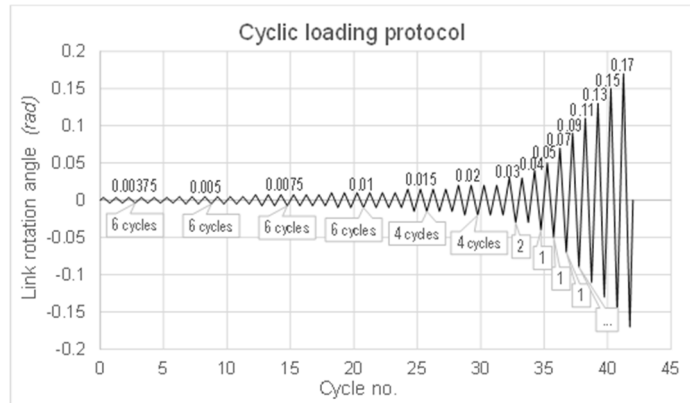


Figura 9. Protocolul de încercări ciclice pe linkuri demontabile

Protocolul de încercări ciclice este prezentat în termeni de rotire absolută a linkului γ_{total} în Figura 9.

3 Activitatea 3.3 Evaluarea comportării ciclice a linkurilor demontabile

Evaluarea comportării linkurilor omogene și hibride s-a realizat pe baza rezultatelor obținute în urma încercărilor experimentale monotone și ciclice pe linkuri, precum și a analizei fractografice și de duritate pe probele extrase din linkuri.

Datele de ieșire ale încercărilor experimentale pe linkuri sunt exprimate în termeni de forță tăietoare și rotire a linkului.

Forța tăietoare în linkuri poate fi determinată cu următoarea relație: FA

$$V = FA \cdot \frac{H}{L}$$

unde: FA este forța din actuator.

H și L sunt dimensiunile cadrului, cf. Figura 10.

Rotirea totală a linkului γ_T a fost determinată direct, pe baza înregistrărilor experimentale:

$$\gamma_T = \frac{2 \cdot \sqrt{a_T^2 + b_T^2} \cdot (DT2 - DT1) + (DT2^2 - DT1^2) \cdot b_T}{4 \cdot a_T \cdot b_T} \cdot \frac{b_T}{e}$$

unde: $DT1$ și $DT2$ – deformațiile totale ale linkului;

e – lungimea linkului;

a_T și b_T – distanțele relative dintre traductorii de deplasări locali, conform Figura 7.

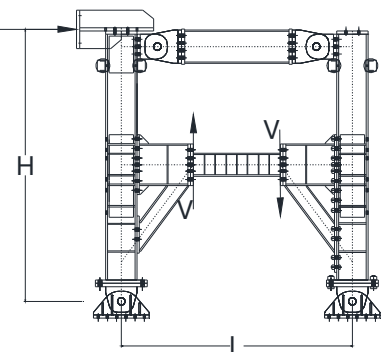
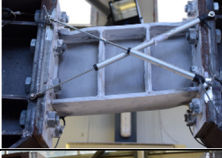


Figura 10. Geometria montajului experimental

În continuare, în Tabelul 3 se prezintă rezultatele obținute pentru câteva dintre linkurile supuse încercărilor experimentale. Sinteza acestor rezultate se poate formula astfel:

- sudura dintre tălpile linkului și placa de capăt. După primele linkuri supuse la încercări ciclice (M-2S-C1, M-2S-C2 și S-2S-C1) s-a constatat că cedarea s-a produs în sudura de colț, care conform prevederilor proiectului de execuție trebuia să fie sudură în adâncime. Această sudură de colț (simbolizată cu "F" în Tabelul 3) a fost reparată de firma producătoare prin îndepărtarea sudurii inițiale, realizarea șanfrenului prin polizare și realizarea sudurii în adâncime ("RF1"). După realizarea următoarelor încercări ciclice pe linkuri s-a constatat că pătrunderea sudurilor R1 a fost incompletă. Reparația linkurilor R2 a avut un impact negativ major, posibil datorat fenomenului de fisurare la reîncălzire (reheat cracking) care conduce la fragilizarea sudurii și o ductilitate relativ redusă, fapt care se poate observa în Figura 11 b). Acest lucru a împiedicat evaluarea întregului potențial în materie de ductilitate ciclică a linkurilor analizate.
- deformația ciclică maximă înregistrată, fără pierderi de rezistență - γ_T . În această analiză se reflectă și influența calității sudurii, descrisă la primul punct.

Tabelul 3. Rezultatele încercărilor experimentale pe linkuri

Link	Marca oțelului	γ_T	Tipul sudurii	Linkul după încercare	Cedări locale	
M-2S-C1	S235	$\pm 0,110$ rad	F			
M-2S-C2	S235	$\pm 0,130$ rad	F			
S-2S-C1	1.4404	$\pm 0,09$ rad	F			
S-2S-C2	1.4404	$\pm 0,110$ rad	R1			
S-2DS-C	1.4404	$\pm 0,05$ rad	R2			
SM-2S-M	1.4404 + S235	$+ 0,207$ rad	R2			
SM-2S-C	1.4404 + S235	$\pm 0,07$ rad	R2			

SM-DHS-C	1.4404 + S235	$\pm 0,09$ rad	R2			
SH-2DS-M	1.4404 + S690	+ 0,148 rad	R1			
SH-2DS-C	1.4404 + S690	$\pm 0,04$ rad	R1			

Pe baza rezultatelor experimentale obținute se pot formula o serie de concluzii, prezentate selectiv în Figura 11.

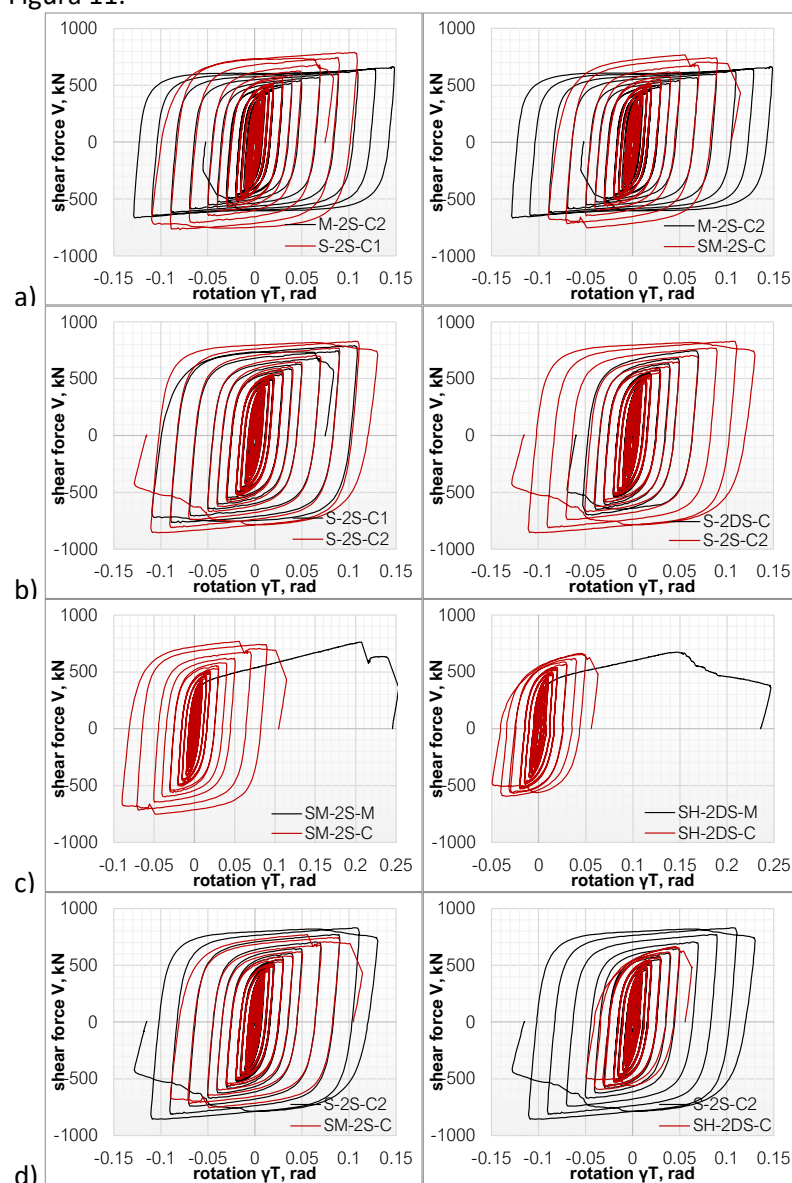


Figura 11. Analiza comparativă a rezultatelor încercărilor experimentale pe linkuri

Din Figura 11 a) se poate observa că linkurile din inox manifestă o consolidare cu cca 10% mai mare decât linkurile din oțel obișnuit, lucru valabil și pentru linkurile hibride SM, lucru care se datorează inimii din oțel inoxidabil.

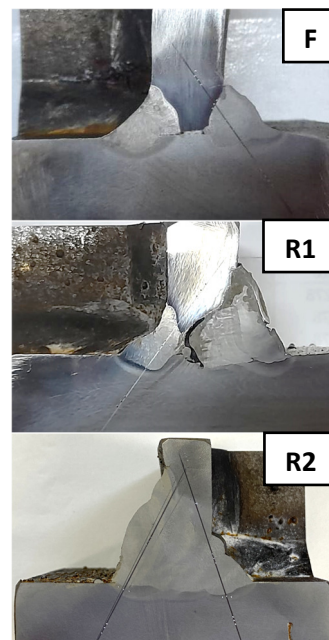
Figura 11 b) ilustrează impactul negativ al resudării linkurilor, care, devin mai ductile datorită sudurii în adâncime R1, își pierd o parte semnificativă din ductilitate în urma reparației R2.

În Figura 11 c) se observă că cedarea linkurilor la solicitări ciclice a fost condiționată nu doar de factorul de ductilitate, ci și de atingerea unei rezistențe maxime, de același ordin de mărime ca rezistența maximă înregistrată la solicitări monotone.

Diagramele prezentate în Figura 11 d) arată că linkurile hibride (SM-2S-C, SH-2DS-C) au înregistrat valori mai mici ale rotirii și prezintă o scădere de ductilitate față de linkurile omogene din oțel inoxidabil. Acest fenomen se datorează atât procedurilor de resudare cât și dezvoltării unei forțe mai mari în link.

Rezultatele analizei fractografice și de duritate au condus la constatarea unor durificări în structura cristalină a sudurilor prin precipitarea de carburi de crom. Acest fapt a fost favorizat de prezența în baia metalică a unui procent din materialul de bază (oțel nealiat), care a accentuat fenomenul de oxidare a îmbinării sudate și a determinat fragilizarea acestuia. Fenomenul formării de carburi de crom a fost accelerat și pe fondul reparației sudurii, care, prin cantitatea suplimentară de căldură introdusă, a favorizat precipitarea carburilor de crom la limita de grăunte. De menționat că precipitarea carburilor de crom în jurul granițelor de grăunte, determină scăderea conținutului de crom sub 10,5%, moment în care oțelul devine oxidabil. Aceasta poate de asemenea conduce la apariția fenomenului de coroziune intergranulară.

Probele extrase din linkuri au confirmat prezența sudurilor de colț în locul celor în adâncime prevăzute în proiect. Au fost realizate o serie de încercări de duritate Vickers cu sarcina HV10, pe porțiuni din sudură, zonele influențate termic și în materialul de bază. S-a constatat că în afara fenomenelor susmenționate a mai existat, într-o anumită proporție, și un alt mecanism de fisurare caracteristic oțelurilor inoxidabile austenitice și oțelurilor termorezistente, cauzat de fisurarea prin reîncălzire (care mai e numită și fisurare de relaxare a tensiunilor). Astfel, valorile de duritate obținute evidențiază faptul că nu se recomandă realizarea de reparații prin sudare la linkuri. Acest fapt va permite minimizarea existenței tensiunilor reziduale din îmbinarea sudată precum și la caracteristici de rezistență mărite.



4 Activitatea 3.4 Simulări numerice post-test pe linkuri demontabile

În urma încercărilor experimentale pe materiale de bază (încercări la tracțiune, încercări oligociclice, încercări Charpy, încercări pe șuruburi și pe specimene de tracțiune debitate din șuruburi), pe îmbinări sudate și pe linkuri au fost obținute o serie de date experimentale care pot fi valorificate ulterior prin calibrarea numerică a unor modele cu proprietăți reale. În acest sens, prima etapă o constituie calibrarea modelului de material, supus la încercări de tracțiune (

Figura 12).

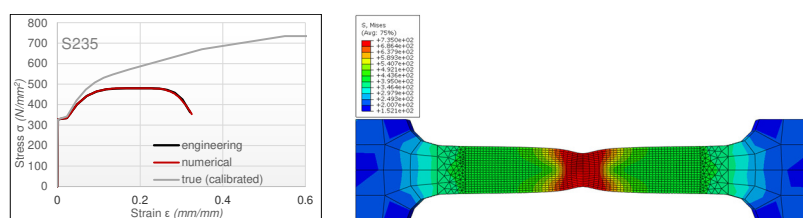


Figura 12. Rezultatele simulării numerice a încercării la tracțiune pe specimenul T-M8 din oțel S235

După cum se poate observa în figură, modelul constitutiv de material calibrat pe baza datelor experimentale reproduce cu fidelitate curba tensiune-deformație obținută în timpul încercărilor.

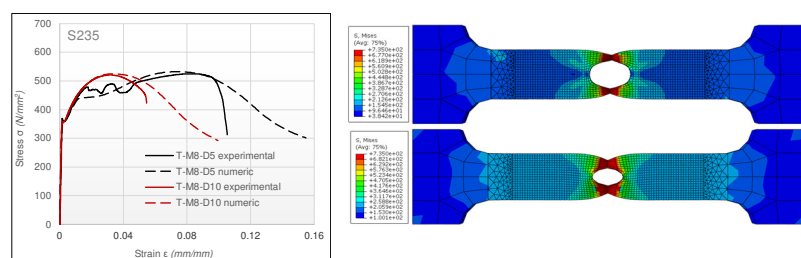


Figura 13. Rezultatele MEF pe speciemenle de tracțiune cu găuri

Pentru speciemenle de tracțiune cu găuri, rezultatele simulărilor numerice într-o primă iterație prezintă o concordanță satisfăcătoare în termeni de rezistență maximă la tracțiune, nu și în termeni de ductilitate.

În cadrul Activității 2.1 – „ Simulări numerice pre-test și dimensionarea finală a linkurilor” a fost realizat un model numeric al linkului izolat, care impune idealizarea condițiilor de margine: deplasarea axială a linkului liberă sau împiedicată. În realitate însă, condiția de împiedicare axială este intermediară celor două variante extreme, fiind condiționată de transmiterea eforturilor prin grinziile și contravântuirile adiacente, precum și de efectul de saibă al planșeelor, etc. În urma calibrării modelului numeric (Figura 11) s-a constatat că modelarea efectului de cadru prin modelarea explicită a montajului experimental cu elemente 2D (stâlpi, grinzi, contravântuiri) în combinație cu elemente „shell” (linkul, rigidizările), oferă rezultate capabile să reproducă starea de eforturi reală. Schema statică reprodușă în calculul cu elemente finite se prezintă în Figura 15.

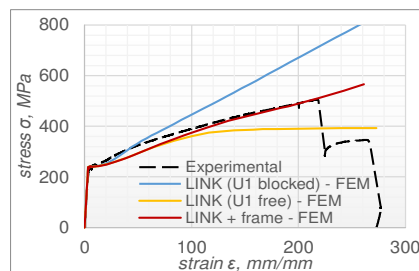


Figura 14. Calibrarea modelului și concordanța dintre rezultatele experimentale și rezultatele MEF

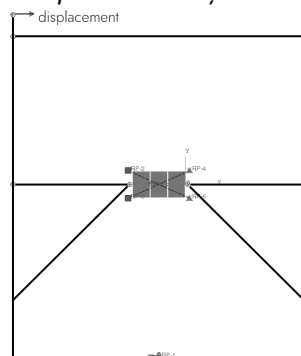


Figura 15. Modelul cadrului pentru simularea numerică a încercărilor pe linkuri

În urma simulărilor numerice post-test, folosind proprietățile materiale calibrate, se obține o comportare similară cu cea din timpul încercărilor experimentale monotone, pentru linkurile SM-2S și SH-2DS. Aceasta se poate observa prin compararea curbelor forță tăietoare - rotire de forfecare din link (Figura 16), cât și prin observarea deformatelor linkului în apropierea rotirii ultime (0,2 rad în cazul linkului SM-2S-M și 0,15 rad în cazul linkului SH-2DS-M) (Figura 17).

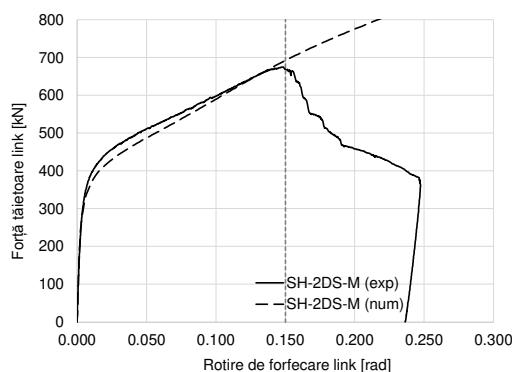
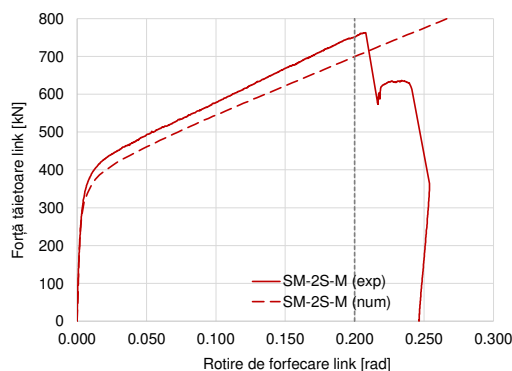


Figura 16. Diagramele experimentale și numerice forță tăietoare – rotire pentru linkurile solicitate monotone (SM-2S-M și SH-2DS-M)

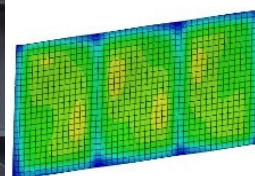
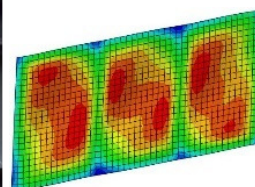


Figura 17. Linkul deformat în apropierea rotirii ultime (stânga) și deformată linkului modelat numeric în apropierea rotirii ultime (dreapta)

Modelele numerice calibrate folosesc la validarea comportării celor cinci linkuri studiate și încercate. În urma simulărilor numerice monotone se obțin curbele de comportare ale linkurilor (Figura 19), și sunt extrase valori ale eforturilor echivalente von Mises și ale deformațiilor plastice echivalente (PEEQ), atât pentru inima linkului, cât și pentru tălpi, la rotiri de 0.15 și 0.2 rad (Tabelul 4).

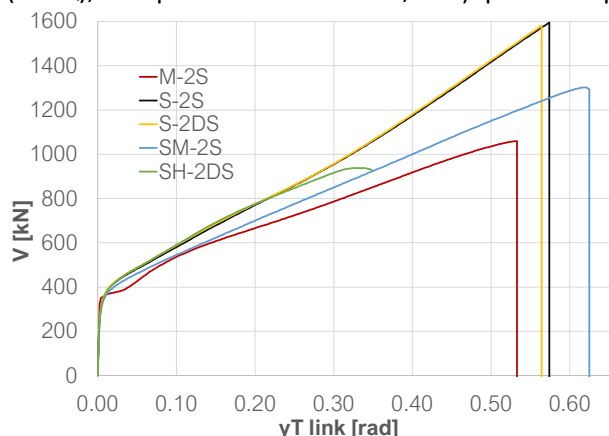


Figura 18. Răspunsul linkurilor modelate numeric

Principalele concluzii se pot formula analizând răspunsul numeric al linkurilor până la o rotire de 0,2 rad. În acest interval se observă o forță tăietoare considerabil mai mare în linkurile din oțel inoxidabil (S-2S și S-2DS) și cel hibrid oțel inoxidabil - oțel de înaltă rezistență (SH-2DS), decât în cele din oțel carbon moale (M-2S) și cel hibrid oțel inoxidabil – oțel carbon moale (SM-2S), ceea ce duce la cerințe de deformații plastice mai mici în tălpile din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență față de cele din oțel carbon moale, acest lucru indicând un comportament superior în domeniul plastic al linkurilor din oțel carbon moale.

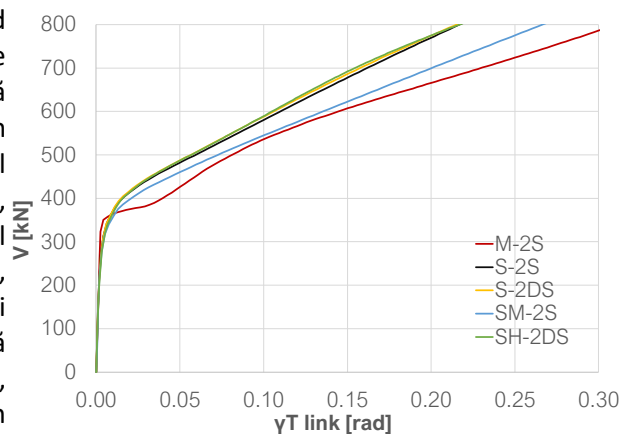


Figura 19. Răspunsul numeric al linkurilor MEF

Tabelul 4. Rezultatele simulărilor numerice post-test

Link	0.15 rad				0.2 rad			
	Inimă		Tălpi		Inimă		Tălpi	
	S Mises [N/mm ²]	PEEQ [mm/mm]	S Mises [N/mm ²]	PEEQ [mm/mm]	S Mises [N/mm ²]	PEEQ [mm/mm]	S Mises [N/mm ²]	PEEQ [mm/mm]
M-2S	537.4	0.1182	405.1	0.04185	567.5	0.1655	454.2	0.06237
SM-2S	577.3	0.1158	408.4	0.04294	648.9	0.1609	460.8	0.06539
S-2S	581.8	0.1184	427.1	0.03914	644.7	0.1581	457.3	0.05461
S-2DS	586.9	0.1215	427.7	0.03944	656.1	0.1658	455.0	0.05343
SH-2DS	586.8	0.1214	864.8	0.04076	652.5	0.1634	890.4	0.05960

Linkul SM-2S prezintă o creștere moderată a forței tăietoare din link (datorită inimii din oțel inoxidabil, cu valori PEEQ mai mici), ceea ce conduce la o ușoară creștere (aproximativ 5%) a PEEQ în tălpi, față de linkul M-2S. Între rezultatele obținute pe linkurile din oțel inoxidabil cu rigidizări pe o singură parte și pe ambele părți, S-2S și S-2DS, nu se observă diferențe notabile. În ceea ce privește linkul hibrid SH-2DS, se observă o rezistență mult mai mare a materialului din tălpi (HSS), dar fiind proiectat tot ca link scurt, deformațiile plastice PEEQ sunt la un nivel asemănător cu celelalte linkuri. De asemenea prezintă o ductilitate mult mai mică, determinând o cedare prematură în tălpi, ceea ce reprezintă un efect nefavorabil. În inima din oțel inoxidabil sunt valori similare cu celelalte linkuri.

În cadrul acestei activități au fost formulate recomandări pentru proiectarea linkurilor demontabile hibride confecționate din mărci de oțel diferite. Proiectarea și dimensionarea linkurilor este corelată cu proiectarea întregului sistem structural, iar variația caracteristicilor linkurilor au un efect important asupra răspunsului structurii. În această ordine de idei, pentru a reduce deplasările relative de nivel la cele două stări limită, se recomandă adoptarea linkurilor "scurte", care, conform §6.8.2(2) din EN 1998-1:2004, disipă energia prin deformări plastice ale inimii sub influența forței tăietoare. Totodată, întrucât linkurile demontabile, prin definiție sunt menite să concentreze degradările post-seism, este important să se asigure posibilitatea înlocuirii linkurilor afectate în urma cutremurului, prin calculul capacității de recentrare a structurii. Această condiție presupune ca deplasarea laterală de nivel la curgerea cadrelor necontravântuite să depășească deplasarea corespunzătoare la atingerea capacității de deformare plastică a cadrelor contravântuite excentric, pentru a preveni dezvoltarea deformațiilor plastice în cadrele MRF înaintea cedării EBF.

Procesul de proiectare a linkurilor presupune următoarele etape:

1. clasificarea linkului funcție de lungime și asigurarea rezistenței la forță tăietoare și moment încovoietor;
2. asigurarea stabilității în afara planului a inimii linkului prin prevederea rigidizărilor;
3. încadrarea secțiunii linkului în clasele de secțiune prevăzute în codurile de proiectare;
4. asigurarea rezistenței îmbinării prin dimensionarea plăcii de capăt și alegerea pachetului de șuruburi pretensionate;
5. calculul sudurilor linkurilor.

În continuare se prezintă succint recomandările corespunzătoare etapelor susmenționate:

1. Linkurile "scurte", conform §6.8.2(2) din EN 1998-1:2004, disipă energia prin deformări plastice ale inimii sub influența forței tăietoare. Conform §6.8.2(8) din EN 1998-1:2004 astfel de linkuri trebuie să respecte condiția:

$$e \leq e_s = 1,6M_p/V_p \quad [1]$$

Formula [1] are la bază relația propusă inițial în 1983 de către Manheim și Popov, sub forma: $e_{s,max} = 2M_{max}/V_{max}$, unde $e_{s,max}$ – lungimea linkului scurt, obținută din echilibrul static. În anul 1986, în urma unui set de încercări experimentale, ținând cont de consolidarea linkului la solicitări ciclice, Kasai și Popov au limitat valoarea maximă la solicitări ciclice din încovoiere la $M_{max}=1,2M_p$, și din forfecare la $V_{max}=1,5V_p$, obținând relația prevăzută în codurile de proiectare în vigoare:

$$e \leq e_s = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot M_p}{1,5 \cdot V_p} = \frac{1,6M_p}{V_p} \quad [2]$$

În relația [2] figurează valoarea $\rho = 1,6$ pentru linkuri scurte, atât în normativul european EN 1998-1:2004, cât și cel american ANSI/AISC 341-16. Într-o serie de lucrări recente (Azad și Topkaya, Ghadami et al.), acest parametru a fost numit „lungime normalizată” a linkurilor.

De menționat că această formulă este valabilă pentru linkurile omogene, fabricate integral din oțel obișnuit. În urma simulărilor numerice pe linkuri hibride și din oțel inoxidabil, s-a constatat o distribuție neuniformă a tensiunilor și deformațiilor în panoul de inimă a linkului. În acest context, se propune introducerea unei relații îmbunătățite [3] bazată pe caracteristicile individuale ale materialelor din care sunt confecționate inima și tălpile linkului, care permite determinarea lungimii normalizate pentru:

- linkurile confecționate din oțeluri cu alte proprietăți decât cele ale oțelului moale;
- linkurile hibride.

$$e \leq e_s = \frac{2M_{max}}{V_{max}} = \frac{2 \cdot \omega_{sh,M} \cdot \gamma_{rm,flange} \cdot M_p}{\omega_{sh,V} \cdot \gamma_{rm,web} \cdot V_p} = \rho \cdot \frac{M_p}{V_p} \quad [3]$$

Lungimea normalizată, determinată din relația [3], este:

$$\rho = 2 \cdot \frac{\omega_{sh,M} \cdot \gamma_{rm,flange}}{\omega_{sh,V} \cdot \gamma_{rm,web}} \quad [4]$$

unde:

γ_{rm} - factorul de suprazistență al materialului, care reprezintă raportul dintre valoarea medie și cea nominală a limitei de curgere;
 $\omega_{sh,M}$ - coeficientul de consolidare al elementului disipativ la încovoiere
 $\omega_{sh,V}$ - coeficientul de consolidare al elementului disipativ la forfecare. Coeficientul de consolidare la forfecare la solicitări ciclice pentru oțelul inoxidabil a fost determinat prin stabilirea ductilității de pe curba forța tăietoare-rotire pentru o încercare monotonă, corespunzătoare deformației maxime la încercări oligociclice.

În Tabelul 5 se prezintă valorile recomandate pentru mărcile de oțel analizate.

Tabelul 5. Coeficienții ω_{sh} și γ_{rm} , și lungimea normalizată ρ pentru linkurile analizate

	$\omega_{sh,V}$	$\omega_{sh,M}$	$\gamma_{rm,w}$	$\gamma_{rm,f}$	ρ
MCS	1.5	1.2	1.45	1.45	1.6
SS	1.7	1.2	1.45	1.45	1.4
SS+HSS	1.7	1.05	1.45	1.05	0.9
SS+MCS	1.7	1.2	1.45	1.45	1.4

- Pentru a asigura capacitatea de rotire plastică necesară a linkului, este necesară dispunerea unor rigidizări intermediare pe inima linkului. Criteriile specifice de proiectare pentru rigidizări sunt cele specificate în secțiunea 6.8.2 din EN 1998-1:2004. Conform analizelor numerice realizate în cadrul proiectului HYLINK s-a constatat că pentru linkurile hibride, confecționate din diferite mărci de oțel, rigidizările amplasate pe o singură parte a inimii nu sunt suficiente. Rigidizările dezvoltă deformații excesive în afara planului, iar distribuția tensiunilor și deformațiilor în inima linkului este neuniformă. *În consecință, se recomandă introducerea rigidizărilor pe ambele părți ale inimii, pentru uniformizarea câmpului de tensiuni și deformații, și reducerea solicitărilor în rigidizări.* Paragraful §6.8.2(11) din EN 1998-1:2004 prevede dispunerea rigidizărilor de ambele părți ale inimii linkului, cu grosimea de minim 0,75tw sau 10mm. Respectarea acestei condiții în cazul structurilor curente ar rezulta rigidizări cu o grosime mai mare decât grosimea inimii, lucru care nu se justifică. Atât în cadrul simulărilor numerice cât și pe parcursul încercărilor experimentale rigidizările linkului nu au suferit degradări importante. *De aceea se recomandă soluția unor rigidizări de grosimea inimii.*
- Standardul european EN 1998-1:2004 nu impune cerințe pentru clasa secțiunii linkurilor solicitate la acțiunea forței tăietoare, limitând recomandările de proiectare la categoria elementelor disipative supuse la eforturi de compresiune sau încovoiere (secțiunea §6.5.3(2)). În standardul american ANSI/AISC 341-16, secțiunea F3.5b.1, se specifică necesitatea încadrării linkurilor în cerințele clasei de secțiune pentru elementele din clasa de ductilitate înaltă (DCH). În acest context, conform Tabelului 6.3 din EN 1998-1:2004, elementelor DCH le corespunde clasa necesară de secțiune 1. *În continuare se recomandă încadrarea secțiunii linkurilor, ca elemente disipative, în cerințele clasei de secțiune 1.*
- Îmbinarea link-grindă trebuie să fie realizată astfel pentru a permite o înlocuire facilă a linkului după degradarea acestuia în urma unui cutremur. Această cerință poate fi respectată asigurând un răspuns preponderent elastic al îmbinării link-grindă. Pentru aceasta, valorile de calcul ale eforturilor din îmbinare trebuie determinate conform relațiilor:

$$V_{j,Ed} = \gamma_{ov} \cdot \omega \cdot V_{pl,link} \quad [1]$$

$$M_{j,Ed} = \frac{V_{j,Ed} \cdot e}{2} \quad [2]$$

unde:

$V_{j,Ed}$ – valoarea de calcul a forței tăietoare din îmbinare;

$M_{j,Ed}$ – valoarea de calcul a momentului încovoiător din îmbinare.

Totodată, îmbinările link-grindă trebuie să fie proiectate pentru a rezista efectului combinat al momentului încovoiător și forței tăietoare, conform următoarelor relații:

$$V_{j,Ed} < V_{j,Rd} \quad [3]$$

$$M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}(V_{j,Ed}) \quad [4]$$

unde:

$V_{j,Rd}$ este forța tăietoare capabilă a îmbinării link-grindă, determinată conform EN 1993-1-8;

$M_{j,Rd}(V_{j,Ed})$ este momentul încovoietor capabil al îmbinării link-grindă ținând cont de interacțiunea cu forța tăietoare din îmbinare $V_{j,Ed}$, determinat conform EN 1993-1-8.

5. *Se recomandă realizarea unor suduri în adâncime (cu pătrundere completă) între toate elementele linkurilor confecționate din table sudate, inclusiv placa de capăt a linkului. Această recomandare se bazează atât pe prevederile standardului american ANSI/AISC 341-16, secțiunea F3.5b (1), și pe studii anterioare (Dusicka et al.), cât și pe concluziile formulate pe parcursul încercărilor experimentale curente. Sudura în adâncime este menită să asigure o rezistență suficientă la oboseala oligociclică, și conform §4.9 al. (5) și (6) din EN 1993-1-8:2005, aceasta trebuie să asigure o rezistență de calcul cel puțin egală cu a celei mai slabe piese din îmbinare, pentru ca deformațiile plastice să se dezvolte în materialul de bază adiacent.*

Obiectivul principal al operației de sudare este asigurarea continuității materialelor de asamblat. În cazul metalelor și aliajelor metalice, această continuitate se realizează la nivelul rețelelor cristaline. Analiza macro și microscopică a îmbinărilor sudate, relevă existența a trei zone, zone care au fost analizate în cele ce urmează:

- îmbinarea sudată (IS),
- zona de trecere (ZT)
- zona influențată termic (ZIT').

Teoretic, pentru a se putea obține o îmbinare rezistentă, și de calitate, este suficientă topirea marginilor metalelor de bază pe o grosime egală cu doar câteva zeci de straturi atomice. În practică, pentru a avea siguranța topirii pe toată suprafața îmbinării, această grosime este întotdeauna semnificativ mai mare.

Sudarea cu arc electric prin topire, este rezultatul unei activări termice importante, activare ce determină încălzirea materialului componentelor la temperaturi superioare temperaturii de topire. Studiul modelului fizic al procesului de sudare care determină apariția unei băi metalice în stare lichidă este condiționat de localizarea și volumul băii de metal topit, aspecte ce determină în zona învecinată, aflată în stare solidă, un ciclu termic ale cărui caracteristici (viteza de încălzire, temperatură maximă, timp de menținere și viteza de răcire), poate varia în limite largi.

Sudarea cu arc electric prin topire al unor piese din materiale diferite este un caz particular. Obținerea unei îmbinări sudate cu caracteristici mecanice care să asigure o îmbinare corespunzătoare, este determinată de solubilitatea reciprocă a materialelor în stare lichidă.

Din acest punct de vedere putem întâlni trei situații:

- solubilitate totală în stare lichidă și solidă. În acest caz, ce este tipic sudării elementelor din același metal, precum și anumitor cupluri de metale (Fe-Ni, Ni-Mn etc.), la care legătura se realizează încă din faza lichidă. La solidificarea băii metalice se formează cristale constituite din atomii ambelor metale iar îmbinarea sudată va avea caracteristici mecanice foarte bune.
- solubilitate parțială în stare lichidă și insolubilitate în stare solidă. Aceasta situație este caracteristică cuplurilor: Fe-Cu, Cu-Zn, etc. După solidificarea băii metalice se constată cristalizarea separată a celor două metale și existența unei zone de interpătrundere de dimensiuni mici. Îmbinarea sudată va prezenta în acest caz, caracteristici mecanice scăzute
- insolubilitate totală în stare lichidă și solidă. Din aceasta categorie fac parte cuplurile Fe-Pb, Fe-Ag, etc. De obicei, în topitură sunt prezente două straturi suprapuse formate din cele două metale lichide, datorită diferențelor de densitate (segregare pe bază de densitate). La cristalizarea băii metalice se constată existența a două părți separate precis care nu au nici o legătură reciprocă. Forțele de legătură de la limitele celor două tipuri de cristale nu pot asigura de regulă caracteristici mecanice corespunzătoare îmbinării sudate.

Deci, pentru realizarea unor îmbinări sudate cu caracteristici mecanice corespunzătoare se pot utiliza doar unele elemente chimice corespunzătoare, în cadrul aliajelor care se intenționează să fie îmbinate. Acestea trebuie să fie corelate corespunzător cu materialul de adaos selectat.

Prin introducerea în materialul de bază, a unuia sau a mai multor elemente de aliere, compoziția chimică a acestuia se modifică în mod substanțial. Odată cu modificarea compoziției chimice, apar și modificări în structura metalografică a aliajului. Introducerea acestor elemente de aliere, determină apariția unor constituenți metalografici și procentul acestora.

Proprietățile unui anumit aliaj vor depinde de proprietățile constituenților metalografici care compun structura aliajului, precum și de forma, raporturile cantitative și distribuția acestor constituenți metalografici în aliajul respectiv. Din această cauză, cunoașterea constituenților metalografici ai unui aliaj ocupă o importanță deosebită pentru prevenirea, evaluarea și chiar stabilirea proprietăților unui aliaj.

În cursul executării unei îmbinări sudate prin topire, compoziția materialului de adaos se modifică prin amestecarea cu partea lichidă a metalelor de bază, de îmbinat. *Deci compoziția chimică a metalului acestei zone (metalul cusăturii sudate) se situează între cea a metalului de bază și a metalului de adaos și depinde de gradul de diluție cu metalul de bază.* Ca urmare a acestui fapt, comportarea zonei de trecere, la reactivi metalografici specifici, va fi diferită de regiunea limitrofă, fiind mai ușor de identificat limita cusăturii sudate prin atac metalografic. De însușirile mecanice ale acestei zone depind în mare măsură însușirile mecanice de rezistență ale îmbinării sudate. În această zonă au loc cele mai intense procese de difuzie.

În special în zona influențată termic, pe timpul procesului de sudare, se urmărește reducerea cât mai mult posibil, a constituenților structurali fragili (în afară de echilibru), evitându-se astfel ruperea fragilă, fără o deformare plastică a îmbinării, rupere care este considerată a fi unul din cele mai periculoase fenomene care pot apărea în cazul unor construcții realizate prin sudare.

Rezolvarea acestei probleme cuprinde două etape:

- stabilirea dimensiunii câmpului termic ce apare în piesele de sudat, în funcție de geometrie;
- alegerea corespunzătoare a parametrilor regimului de sudare
- stabilirea corectă a materialului de adaos, corespunzător pentru îmbinarea materialelor de bază.

În marea majoritate a cazurilor, aceste oțeluri conțin pe lângă Fe, Cr, Ni și alte elemente a căror prezență influențează în mare măsură proprietățile lor de utilizare. În funcție de acțiunea lor asupra structurii, aceste elemente se împart în două grupe:

- elemente austenitizante C, N, B, Co, Mn (grupate în ordinea descrescătoare a efectului lor) care contribuie la acțiunea nichelului de stabilizare a austenitei;
 - elemente feritizante Al, Ti, Si, Mo, Nb, W, Ta care împreună cu Cr au acțiune fertilizantă, promovând totodată formarea carburilor, cu excepția siliciului.
- 1) Carbonul are ca efect favorabil mărirea rezistenței mecanice, în schimb favorizează precipitarea unor carburi, fapt care înrăutățește proprietățile de rezistență la coroziune și sudabilitate.
 - 2) Manganul are efecte favorabile, micșorând susceptibilitatea fisurării la cald prin formarea sulfurii de mangan.
 - 3) Siliciul mărește rezistența față de oxidarea la cald, fiind folosit și ca dezoxidant. În cantitate prea mare mărește sensibilitatea la fisurare, recomandându-se ca raportul între concentrația în Si și concentrația în C să fie de 2/1, pentru a obține o bună tenacitate și o diminuare a susceptibilității față de fisurare.
 - 4) Molibdenul determină o mărire a rezistenței mecanice la temperaturi înalte și a rezistenței la coroziune în medii reducătoare. Micșorează tendința de fisurare la cald și în oarecare măsură ca și wolframul, rezistența față de oxidarea la cald.
 - 5) Cobaltul nu este prezent, în mod normal, în oțelul inoxidabil decât ca element rezidual. Cu toate acestea, este adăugat la câteva aliaje pentru a produce proprietăți de durificare prin precipitare sau pentru a spori rezistența la coroziune, în special în medii cu apă de mare și acid sulfuric. Cuprul poate îmbunătăți proprietățile chimice ale oțelului prin creșterea rezistenței sale la coroziune. O cantitate mare de cupru poate contribui la prevenirea și respectiv diminuarea procesului de formare a ruginii.
 - 6) Titanul și niobiul au efecte favorabile mărind rezistența la coroziune, în anumite condiții, și favorizează finisarea structurii.
 - 7) Cobaltul nu este prezent, în mod normal, în oțelul inoxidabil decât ca element rezidual. Cobaltul este adăugat la oțelurile rapide pentru a îmbunătăți duritatea la cald. Se găsește atât în oțelurile pentru scule, aliate cu Mo, cât și în cele cu wolfram (W). Oțelurile rapide cu conținut de cobalt au o tendință ceva mai mare la decarburare și sunt mai sensibile la fisurare atunci când sunt expuse la schimbări bruște de temperatură cum ar fi cazul sudării.

Existența unui procent de carbon peste valoarea de 0,05%, la oțelurile inoxidabile, determină apariția unor carburi de crom în structură, fapt care poate fi evitat prin adaos de titan sau de niobiu pe perioada elaborării oțelului sau prin introducerea unui procent mărit în materialul de adaos.

7 Activitatea 3.7 Diseminarea rezultatelor 3: publicare 2 articole la conferințe sau în reviste

Pentru coordonarea activităților desfășurate în cadrul proiectului au fost organizate numeroase ședințe de lucru la Timișoara, în sediul Departamentului Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor, UPT (CO), precum și în sediul Institutului de Sudură și Încercări pe Materiale, ISIM (P), în cadrul cărora au fost discutate sarcinile fiecărui partener, soluționarea problemelor apărute pe parcurs, coordonarea activităților, modalitățile de raportare și diseminare, și alte aspecte legate de activitatea de cercetare.

În activitatea de cercetare în cadrul proiectului au fost implicați studenți din ciclul doctorat. Proiectul susține derularea tezei de doctorat a studentei doctorandă Anna Prodan (căs. Ene), intitulată: „Comportarea seismică a linkurilor hibride din oțel de înaltă performanță”, sub coordonarea Directorului proiectului, Prof. Dr. Ing. Aurel Stratan.

Ca rezultat al activităților de cercetare din perioada raportată, rezultatele au fost diseminate prin publicarea unei serii de articole prezentate în cadrul unor manifestări științifice (conferințe):

- Ene, A.; Stratan, A., “Pre-test Numerical Modelling of Stainless Steel and Hybrid Links,” in Proceedings of the 10th International Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Romania, May 2022, vol. 262, pp. 125–132. doi: 10.1007/978-3-031-03811-2_8.
- Plaitano, F.; Stratan, A.; Nastri, E., “Simplified Modelling of Failure in High Strength Bolts under Combined Tension and Bending”. J. Compos. Sci., 2022, 6, 302. doi: 10.3390/jcs6100302.
- Ene, A.; Stratan, A. “Monotonic and cyclic modelling of structural steel for finite element analysis”, The 13th International Conference “Innovative Technologies for Joining Advanced Materials”, 2022. (în curs de publicare)
- Ene, A.; Both, I., Abrudan, O., Stratan, A., Dascau, H., Sirbu, N.A. “Experimental investigation of monotonic and cyclic behaviour of high-performance steels”, The 13th International Conference “Innovative Technologies for Joining Advanced Materials”, 2022. (în curs de publicare)
- Dașcău, H.; Duma, I.; Mnerie, G.V., “ Microstructural hardness evaluation in the HAZ of welded joints realised out of austenitic (316L) and carbon steel (S235)”, The 13th International Conference “Innovative Technologies for Joining Advanced Materials”, 2022. (în curs de publicare)

8 Concluzii

Pe durata celei de a treia etape a proiectului de cercetare „Linkuri demontabile hibride din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență (HYLINK)” s-au atins următoarele rezultate principale:

- realizarea încercărilor monotone și oligociclice pe îmbinări sudate, precum și prelucrarea rezultatelor acestora în scopul evaluării modurilor de cedare a sudurilor (Activitatea 3.1);
- realizarea încercărilor monotone și ciclice pe linkuri și interpretarea rezultatelor obținute pentru evaluarea comportării monotone și ciclice a linkurilor (Activitățile 3.2 și 3.3);
- simulările numerice și analiza cu elemente finite post-test a materialelor și linkurilor (Activitatea 3.4);
- elaborarea recomandărilor de proiectare a linkurilor (Activitatea 3.5);
- elaborarea unor recomandări pentru alegerea mărcilor de sudare a diferitor tipuri de oțel (Activitatea 3.6);
- diseminarea rezultatelor în conformitate cu planul de activitate (Activitatea 3.7).

Director proiect,
Prof.dr.ing. Aurel Stratan