
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 1: Proiectare structuri re-centrabile contravântuite excentric și linkuri hibride

Etapa 2: Dezvoltare procedee de sudare, fabricare stand și specimene, și caracterizare oligociclică materiale

Rezumat

În raportul curent sunt sintetizate rezultatele activităților desfășurate în cadrul etapelor 1/2020 și 2/2021, ale proiectului „Linkuri demontabile hibride din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență (HYLINK)”. Obiectivele asumate în „Planul de realizare a proiectului pentru verificarea ajutorului de stat” au fost realizate, iar rezultatele activităților sunt descrise din punct de vedere științific și tehnic în prezentul raport. Activitatea 1.1 cuprinde procesul de proiectare a structurii prototip recentrabile, contravântuite excentric, cu înălțime medie ($P+2E$) cu linkuri demontabile cu placă de capăt extinsă, prin evaluarea încărcărilor ce acționează asupra structurii, modelarea acestora în programul de calcul (ETABS), precum și verificarea elementelor disipative și nedisipative ale structurii conform normelor în vigoare. În urma studiului efectuat în cadrul activității 1.2, în baza caracteristicilor de ductilitate, rezistență și tenacitate la temperaturile uzuale de lucru, au fost selectate trei tipuri de oțeluri: oțel moale S235 J2, oțel de înaltă rezistență S690 QL, precum și oțelul inoxidabil marca 1.4404. În cadrul activității 1.3 au fost pre-dimensionate linkurile cu placă de capăt extinsă, în baza eforturilor rezultate la calculul structurii-prototip. De asemenea, a fost propus un 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. În cadrul activității 1.4 au fost diseminate rezultatele prin intermediul unei pagini web dedicate proiectului. Prin simulările numerice cu elemente finite, realizate în cadrul activității 2.1, a fost investigat răspunsul diferitor tipuri de linkuri la solicitare monotonă la forță tăietoare. Această analiză numerică a permis identificarea a trei aspecte importante în programul experimental: dimensionarea finală a linkurilor în baza criteriului de încadrare în categoria „linkuri scurte”, adaptat pentru linkuri hibride și alte mărci de oțel; alegerea combinației de oțeluri pentru linkurile hibride în baza performanței acestora; și evaluarea necesității în rigidizări pe o singură parte/ambele părți ale inimii linkurilor. Ca urmare a investigațiilor teoretice în activitatea 2.2, din punct de vedere al materialelor de îmbinat, ținând cont de flexibilitatea procedeului de sudare, calitatea ridicată a materialului depus, controlul precis și rapid al mecanismului de transfer prin arc electric, s-a propus aplicarea procedeului de sudare MAG în atmosferă de gaze protectoare, sau a procedeului de sudare cu sârmă tubulară. În cadrul activității 2.3 au fost propuse și validate experimental tehnologiile pentru sudurile utilizate la fabricarea linkurilor. În activitatea 2.4 au fost proiectate speciile pentru încercări pe materiale de bază și îmbinări sudate, pentru cele 3 tipuri de oțeluri. Împreună cu desenele de execuție realizate pe parcursul activității 2.5, au fost procurate toate speciile experimentale, cu specificarea pieselor care trebuie debitate din aceeași șarjă de oțel. În cadrul activității 2.6, speciile de material au fost supuse unei serii de încercări, în cadrul laboratorului CEMSIG al Facultății de Construcții, UPT. Rezultate au fost diseminate printr-o lucrare de disertație elaborată și susținută în anul 2021, prin site-ul proiectului, precum și în cadrul unui workshop, desfășurat în data de 03.12.2021, la Università degli Studi di Salerno, Italia.

Cuprins

1	ACTIVITATEA 1.1 PROIECTAREA UNEI STRUCTURI PROTOTIP RE-CENTRABILE CONTRAVÂNTUITE EXCENTRIC	4
2	ACTIVITATEA 1.2 SELECTAREA MĂRCILOR DE OȚEL PENTRU SUDABILITATE ȘI DUCTILITATE	5
3	ACTIVITATEA 1.3 - PRE-DIMENSIONAREA LINKURILOR DIN OȚEL INOXIDABIL, OȚEL CARBON MOALE ȘI HIBRIDE	6
4	ACTIVITATEA 1.4 - DISEMINAREA REZULTATELOR 1: PUBLICARE SITE WEB	7
5	ACTIVITATEA 2.1 - SIMULĂRI NUMERICE PRE-TEST ȘI DIMENSIONAREA FINALĂ A LINKURILOR	7
6	ACTIVITATEA 2.2 - SELECTAREA PROCEDEELOR DE SUDARE COMPATIBILE CU GROSIMILE ȘI MATERIALELE DE SUDAT	10
7	ACTIVITATEA 2.3 - VALIDARE EXPERIMENTALĂ A PROCEDEELOR DE SUDARE	10
8	ACTIVITATEA 2.4 - PROIECTAREA ȘI FABRICAREA SPECIMENELOR PENTRU ÎNCERCĂRI PE MATERIALE DE BAZĂ ȘI ÎMBINĂRI SUDATE	11
9	ACTIVITATEA 2.5 - REALIZAREA DESENELOR DE EXECUȚIE ȘI FABRICAREA STANDULUI EXPERIMENTAL ȘI A LINKURILOR	12
10	ACTIVITATEA 2.6 - ÎNCERCĂRI LA TRACȚIUNE, CHARPY ȘI OLIGOCICLICE PE MATERIALE DE BAZĂ	12
11	ACTIVITATEA 2.7 - DISEMINAREA REZULTATELOR 2: PUBLICARE 2 ARTICOLE LA CONFERINȚE SAU ÎN REVISTE	14
12	CONCLUZII	14

1 Activitatea 1.1 Proiectarea unei structuri prototip re-centrabile contravântuite excentric

În ultimele decenii au fost dezvoltate mai multe sisteme structurale "tolerante la avarii", care limitează avarierea progresivă a structurilor la seism și permit o reparare facilă. Unul dintre conceptele larg abordate în ultimii ani este proiectarea sistemelor cu capacitate de recentrare sau auto-recentrare. Ideea structurilor duale recentrabile cu cadre contravântuite excentric cu linkuri demontabile (EBF - sub-structură rigidă) combinate cu cadre necontravântuite (MRF - sub-structură flexibilă) a fost propusă (Stratan 2003), investigată experimental (Stratan and Dubina 2004) și numeric (Dubina et al., 2008) în cadrul Universității Politehnica Timișoara. Această soluție inovativă, prin proiectarea capacității de rezistență, asigură concentrarea deformațiilor plastice în zona linkurilor detașabile. Astfel, lucrările de reparație post-cutremur se limitează la înlocuirea linkurilor, asigurând recentrarea structurii datorată forțelor elastice din cadrele necontravântuite aferente. Conjunctura economică din ultimul deceniu impune optimizarea acestei soluții, printr-un apel la beneficiile oțelurilor de înaltă performanță, datorită calităților superioare în materie de rezistență, ductilitate, sudabilitate, tenacitate, etc.

În cadrul activității 1.1 au fost selectate pentru analiză 4 structuri prototip duale recentrabile, regulate în plan și pe verticală (Figura 1), în care sistemul de preluare al forțelor gravitaționale îl reprezintă cadrele interioare și cele marginale cu grinzi articulate, iar sistemul de preluare al forțelor gravitaționale – sistemul dual recentrabil, compus din cadre necontravântuite (MRF) și cadre contravântuite excentric (EBF) cu următoarele tipologii de linkuri demontabile cu placă de capăt extinsă:

- MCS – linkuri confecționate integral din oțel moale marca S235;
- MCS+HSS – linkuri hibride cu inima din oțel moale S235 și cu tălpile din oțel de înaltă rezistență S690QL;
- SS – linkuri confecționate integral din oțel inoxidabil marca 1.4404;
- SS+HSS - linkuri hibride cu inima din oțel inoxidabil 1.4404 și tălpile din oțel de înaltă rezistență S690QL.

Modelul structural a fost realizat în programul de calcul structural ETABS (Figura 2).

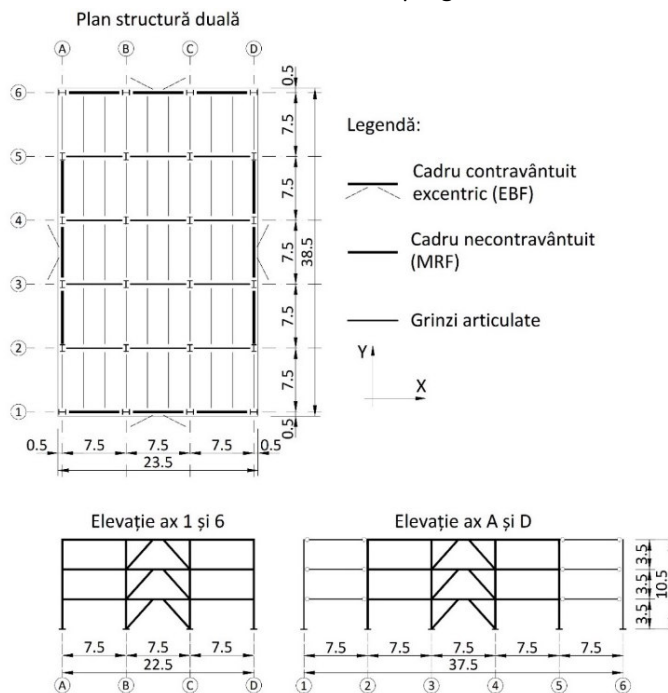


Figura 1. Configurarea în plan și elevație a structurilor prototip

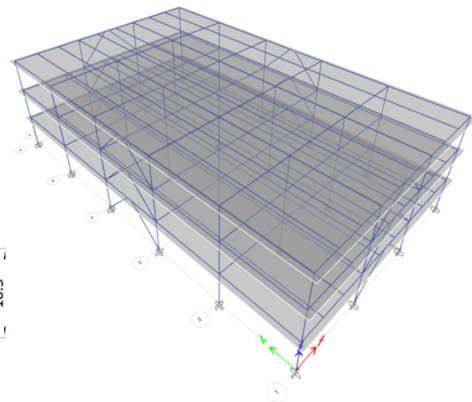


Figura 2. Modelul tridimensional liniar-elastic al structurii în programul ETABS

Cele 4 structuri prototip analizate au următoarele caracteristici:

- Regimul de înălțime: P+2E;
- Înălțime de nivel: $h = 3,5 \text{ m}$;
- Categoria de utilizare: B - Zone pentru birouri;
- Elementele structurii de rezistență (cu excepția linkurilor) sunt confecționate din profile laminate dublu T din oțel marca S355;
- Componentele nestructurale ale anvelopei structurii sunt realizate din materiale cu capacitate mare de deformare, fiind verificate la o valoare admisibilă a deplasării relative de nivel la starea limită de serviciu de $0.0075 h$ (h - înălțimea de nivel);
- Planșeele din b.a. pe cofraj pierdut din tablă cutată asigură efectul de șaibă rigidă în planul lor;
- Accelerația de vârf a terenului în amplasament: $a_g = 0,25g$;
- Perioada de colț: $T_B = 0,15$; $T_C = 0,50$; $T_D = 2,0$;
- S-a adoptat conceptul de comportare disipativă, clasa de ductilitate înaltă a structurii DCH, cu un factor de comportare pentru cadre contravântuite excentric: $q = 5\alpha_u / \alpha_1 = 5 \cdot 1,2 = 6$.

Pe structurile analizate au fost aplicate următoarele încărcări: încărcarea permanentă, încărcarea utilă și acțiunea seismică de proiectare. Structurile au fost verificate la combinațiile fundamentale de încărcări (la starea limită ultimă și starea limită de serviciu) și combinațiile seismice (pentru verificarea elementelor disipative și nedisipative la starea limită ultimă, și la starea limită de limitare a degradărilor). Secțiunile elementelor structurale rezultate în urma calculului sunt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1. Secțiunile elementelor structurilor prototip

Nivel	Grinzi secundare	Grinzi principale	Grinzi cadru EBF	Grinzi cadru MRF	Stâlpi centrali	Stâlpi perimetrali	Stâlpi cadru EBF	Contravântuiri
3	IPE 240	IPE 400	450x200x12x8	IPE 360	HE 200 B	HE 220 B	HE 260 B	HE 200 A
2	IPE 240	IPE 400	500x240x12x8	IPE 360	HE 200 B	HE 220 B	HE 260 B	HE 240 A
1	IPE 240	IPE 400	550x260x12x8	IPE 360	HE 200 B	HE 220 B	HE 260 B	HE 260 A

2 Activitatea 1.2 Selectarea mărcilor de oțel pentru sudabilitate și ductilitate

În urma unei analize aprofundate ale oțelurilor aliate și nealiate din considerente de sudabilitate (metalurgică, constructivă și tehnologică) și ductilitate, au fost propuse următoarele mărci de oțel:

- oțelul nealiat S235 J2 (limita de curgere $f_y = 235 \text{ MPa}$, J2 - energia de impact Charpy V longitudinal 27J la -20°C). Oțelurile din clasa de calitate J2 (energia de impact Charpy V longitudinal 27J la -20°C) au cel mai bun raport între caracteristicile de rezistență, cele de ductilitate și cele de tenacitate la temperaturile uzuale de lucru. Alegerea acestui tip de oțel cu o limită de curgere minimă ($R_{eH} < 275 \text{ N/mm}^2$) este argumentată și de necesitatea de a folosi oțeluri cu caracteristici apropiate pentru tipologiile de linkuri confecționate din oțel moale și oțel inoxidabil, pentru a asigura comparabilitatea și o interpretare facilă a rezultatelor;
- oțelul nealiat de înaltă rezistență, marca S690, clasa de calitate QL (tenacitate la -40°C). Avantajul acestei game de oțeluri cu granulație fină îl constituie faptul că domeniul de lucru al parametrilor de sudare este mai mare decât cel al unor grupe uzuale de oțeluri cu granulație fină uzuale sau laminate termomecanic (S460 etc.), prezentând și un raport avantajos dintre tenacitate și ductilitate.
- oțelul austenitic inoxidabil de tipul X2CrNiMo17-12-2 (1.4404), care prezintă un raport adecvat dintre valorile de tenacitate și cele de ductilitate, și satisfac cerințele de rezistență la coroziune. Alegerea acestui tip de oțel inoxidabil este condiționată și de accesibilitatea produsului pe piață, totodată fiind aleasă marca de oțel cu cea mai înaltă limită de curgere dintre oțelurile inoxidabile disponibile.

O imagine de ansamblu asupra mărcilor de oțel și caracteristicilor generale ale acestora este prezentată în Tabelul 2.

Tabelul 2. Caracteristicile oțelurilor selectate

Marcă oțel	E (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	alungirea la rupere (%)	Standard
S355J2*	210000	355	470	20	EN 10025-2:2004, EN 1993-1-1:2005
S235J2*	210000	235	360	24	EN 10025-2:2004, EN 1993-1-1:2005
X2CrNiMo17-12-2 (1.4404)**	200000	220	520	45	EN 10088-4:2009, EN 1993-1-4:2006
S690QL***	210000	690	770	14	EN 10025-6:2004, EN 1993-1-12:2007
* - pentru oțel structural laminat la cald, cu grosimi de până la 16 mm. ** - pentru table laminate la cald, cu grosimi de până la 75 mm; *** - pentru oțel structural laminat la cald, cu grosimi de la 3 până la 50 mm.					

3 Activitatea 1.3 - Pre-dimensionarea linkurilor din oțel inoxidabil, oțel carbon moale și hibride

Ca etapă de lucru, pre-dimensionarea linkurilor a fost corelată cu analiza celor 4 structuri-prototip în programul de calcul ETABS (Activitatea 1.1), precum și cu simulările numerice pre-test (Activitatea 2.1).

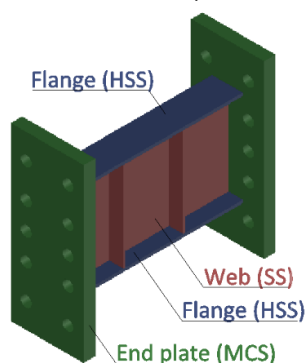


Figura 3. Principiul constructiv al linkurilor hibride demontabile
(SS – Stainless Steel, HSS – High Strength Steel, MCS – Mild Carbon Steel)

Pe baza simulărilor numerice efectuate pe linkuri s-a constatat că relația pentru încadrarea linkurilor în categoria de linkuri „scurte”, stipulată în §6.8.2 din EN 1998-1:2004, nu este una universală, fiind valabilă doar pentru linkurile omogene, fabricate integral din oțel obișnuit. În cazul linkurilor hibride și ale celor confecționate din alte mărci de oțel decât cel obișnuit, proiectate conform acestei prevederi, s-a obținut un răspuns structural nefavorabil la acțiunea forței tăietoare (flambajul tălpilor și o distribuție neuniformă a deformațiilor plastice în inima linkului - vezi Activitatea 2.1 - Simulări numerice pre-test și dimensionarea finală a linkurilor).

În acest context, s-a propus îmbunătățirea acestei prevederi, prin adaptarea parametrului p – lungime normalizată, astfel încât relația să devină aplicabilă și în cazul linkurilor hibride, cu tălpi și inimi fabricate din diferite mărci de oțel. Următoarea etapă în procedura de pre-dimensionare a fost reproiectarea linkurilor SS și hibride cu aplicarea criteriului îmbunătățit, susmenționat. Secțiunile rezultate în urma calculului sunt prezentate în Tabelul 3.

Tabelul 3. Secțiunile linkurilor structurilor prototip

Tipologie link		MCS	MCS+HSS	SS	SS+HSS
Nivel	3	240x140x10x8	240x80x10x8	250x140x12x8	250x80x10x8
	2	300x150x12x10	300x100x10x10	310x160x12x10	310x100x10x10
	1	330x150x12x10	330x100x10x10	360x160x12x10	360x100x10x10

La baza procedurii de predimensionare a linkurilor au stat câteva criterii importante, după cum urmează:

- pentru a asigura o comparare facilă a rezultatelor, au fost adoptate linkuri cu aceeași lungime ($e=0,45m$);
- element de referință a fost considerat linkul confecționat integral din oțel moale MCS, proiectat astfel, încât dimensiunile secțiunii transversale de tip dublu T să fie similare proprietăților profilurilor europene IPE;
- secțiunile celorlalte linkuri au fost ajustate, valori similare ale forței tăietoare capabile și ale momentului plastic, păstrând concomitent și o configurație asemănătoare, pentru a permite o comparație facilă a rezultatelor;
- la pre-dimensionarea linkurilor cu inima din oțel inoxidabil, pentru a asigura forța tăietoare capabilă necesară, a fost mărită înălțimea secțiunii comparativ cu secțiunea linkului MCS, deoarece limita de curgere a oțelului inoxidabil este mai mică decât cea a oțelului obișnuit ($f_y=220 \text{ N/mm}^2$ pentru oțelul inoxidabil marca 1.4404, spre deosebire de $f_y=235 \text{ N/mm}^2$ pentru oțelul moale S235).
- la pre-dimensionarea linkurilor hibride, cu tălpile confecționate din oțel de înaltă rezistență, au fost micșorate grosimile și lățimile tălpilor comparativ cu secțiunea linkului MCS, cu scopul de a respecta condiția de zveltețe a tălpilor.

Îmbinările cu placă de capăt extinsă dintre link și grinzile cadrului contravântuit excentric au fost verificate prin metoda componentelor, conform prevederilor EN 1993-1-8:2005. Calculul prin metoda componentelor constă în identificarea componentelor active ale îmbinării, evaluarea rigidității și a rezistenței fiecărei componente, și asamblarea acestora pentru a obține caracteristicile finale ale îmbinării. Ținând cont că procedura de verificare a îmbinărilor este una complexă, aceasta a fost implementată într-un program automat realizat în limbajul de programare Julia.

4 Activitatea 1.4 - Diseminarea rezultatelor 1: publicare site web

În cadrul Activității 1.4 au fost diseminate rezultatele prin intermediul paginii web dedicate proiectului: <https://www.ct.upt.ro/centre/cemsig/hylink.htm>. Acesta cuprinde informații generale despre sursa de finanțare, obiectivul, rezumatul și perioada de desfășurare a proiectului de cercetare, descrierea partenerilor implicați în proiect, precum și principalele rezultate preconizate/obținute.

5 Activitatea 2.1 - Simulări numerice pre-test și dimensionarea finală a linkurilor

Simulările numerice pre-test au fost realizate în programul de calcul cu elemente finite Abaqus CAE. Pentru a stabili caracteristicile efort unitar real – deformare specifică reală ale oțelurilor analizate, au fost modelate și calibrate 3 modele de material: S235, S690 și 1.4404 (Figura 4). Modele corespunzătoare oțelurilor 1.4404 și S690 au fost construite cu aplicarea relațiilor Ramberg-Osgood.

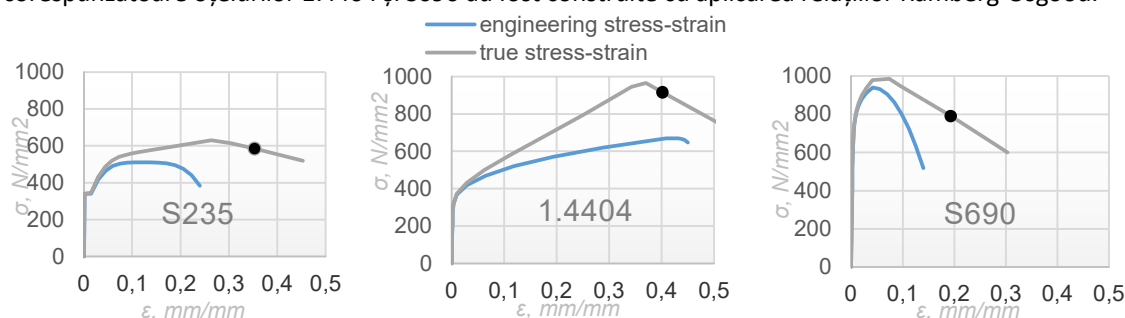
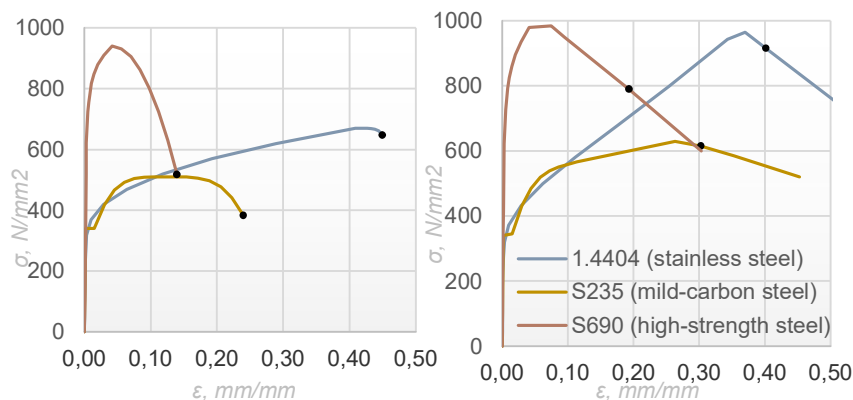


Figura 4. Modelele numerice de material, realizate pe baza proprietăților nominale ale oțelurilor

Întrucât modelarea explicită a cedării materialului este o etapă ulterioară a programului de cercetare, la etapa curentă cedarea a fost modelată conceptual, pe baza alungirii la rupere, corespunzătoare inițierii cedării (punctele marcate în Figura 4). S-a constatat că ductilitatea reală a oțelului inoxidabil la solicitări monotone nu este proporțională ductilității mari obținute din curba inginerescă, raportată la ductilitatea oțelului obișnuit. Acest fenomen poate fi observat în Figura 5 și Tabelul 4.



Tabelul 4.
Caracteristicile de
ductilitate ale oțelurilor
(alungirea la rupere –
nominală și reală)

	ϵ_r	ϵ_r^T
S235	0,24	0,353
1.4404	0,45	0,402
S690	0,14	0,193

Figura 5. Diagramele de material: inginerească (stânga) și reală (dreapta)

Linkurile au fost modelate cu elemente tridimensionale „shell”, deformabile, și discretizate în elemente finite de tip S4R: „4-node general-purpose shell, reduced integration with hourglass control” (Figura 6). Analiza numerică a rulat prin protocolul de calcul Abaqus/Implicit.

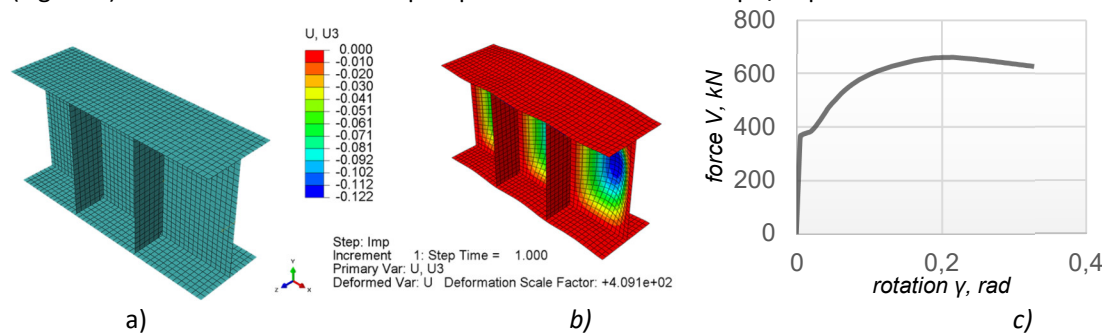


Figura 6. Cele 3 etape ale analizei cu element finit: a) initial; b) modelarea imperfecțiunilor; c) solicitare monotonă prin impunerea unei deplasări

Conform aspectelor de proiectare expuse în Capitolul 3, simulările numerice au demonstrat ineficiența criteriului stipulat în EN 1998-1:2004 pentru încadrarea linkurilor hibride sau ale celor confecționate din alte mărci de oțel decât oțelul obișnuit, la categoria linkurilor „scurte”: $e \leq e_s = 1,6 M_p/V_p = \rho M_p/V_p$. Conform criteriului îmbunătățit, parametrul ρ nu este egal cu 1,6 în toate cazurile, ci depinde de caracteristicile individuale ale materialelor din care sunt confecționate inima și tălpile linkului. Linkurile re-dimensionate în concordanță cu această condiție dezvoltă un mecanism favorabil de cedare la forță tăietoare, prezentând o distribuție uniformă a deformațiilor plastice în inima linkului, fapt ilustrat în Figura 7 și Figura 8.

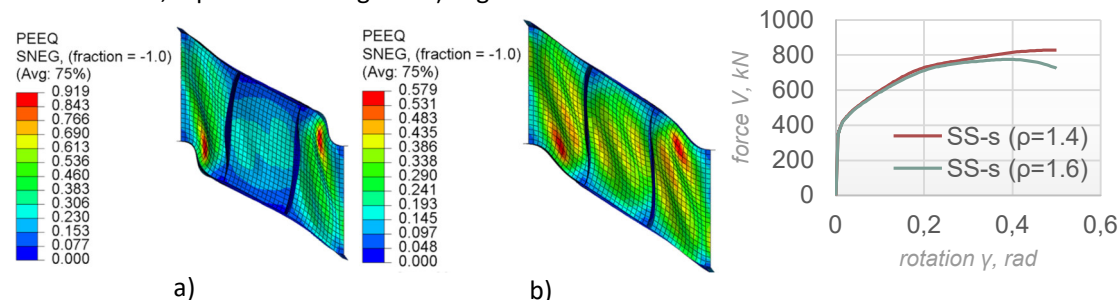


Figura 7. Linkul din oțel inoxidabil 1.4404 la o rotire convențională de $\gamma = 0,5$ rad.

a) pre-dimensionat conform criteriului din EN 1998-1:2004 ($\rho = 1,6$). Secțiune inițială: 250x130x10x8;
b) re-proiectat conform criteriului îmbunătățit ($\rho = 1,4$). Secțiune finală: 250x140x12x8

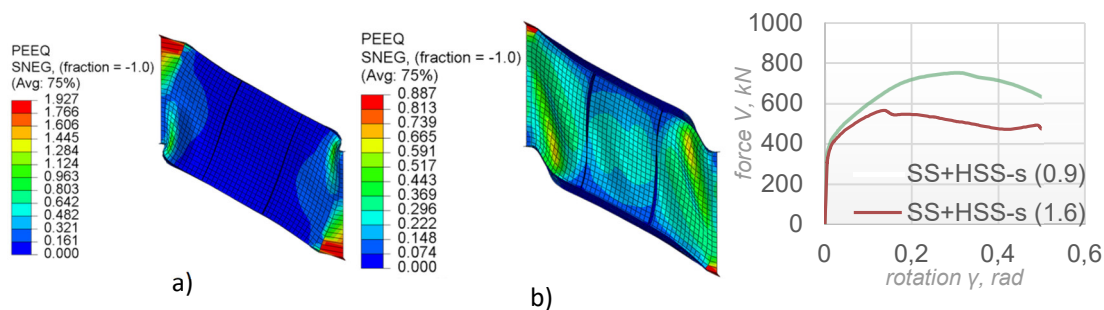


Figura 8. Linkul hibrid 1.4404+S690 la o rotire convențională de $\gamma=0,5$ rad.

- a) pre-dimensionat conform criteriului din EN 1998-1:2004 ($p=1,6$). Secțiune inițială: 240x70x6x8;
b) re-proiectat conform criteriului îmbunătățit ($p=0,9$). Secțiune finală: 250x80x10x8

O alt investigație numerică a vizat influența rigidizărilor asupra modului de plasticizare a elementului. În urma simulărilor am constatat că pentru linkurile hibride rigidizările amplasate pe o singură parte a inimii nu sunt suficiente (Figura 9), motiv pentru care s-a decis introducerea rigidizărilor pe ambele părți ale inimii unei serii de linkuri.

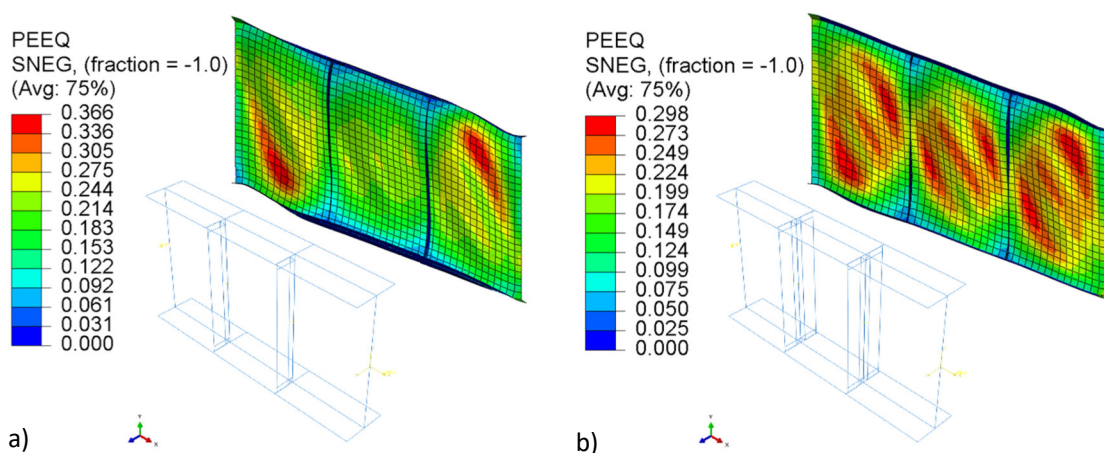


Figura 9. Evoluția deformațiilor plastice în inima linkului la o rotire de $\gamma=0,5$ rad:
a) link cu rigidizări pe o singură parte a inimii; b) link cu rigidizări pe ambele părți ale inimii

În urma unei analize comparative a răspunsului linkurilor analizate până la o rotire corespunzătoare alungirii la rupere (Tabelul 4), s-a constatat că linkul din oțel inoxidabil e mai ductil, oferind o creștere a ductilității de cca 12% în comparație cu linkul din oțel moale (Figura 10), care, însă, nu este proporțională cu raportul ductilității la nivel de material.

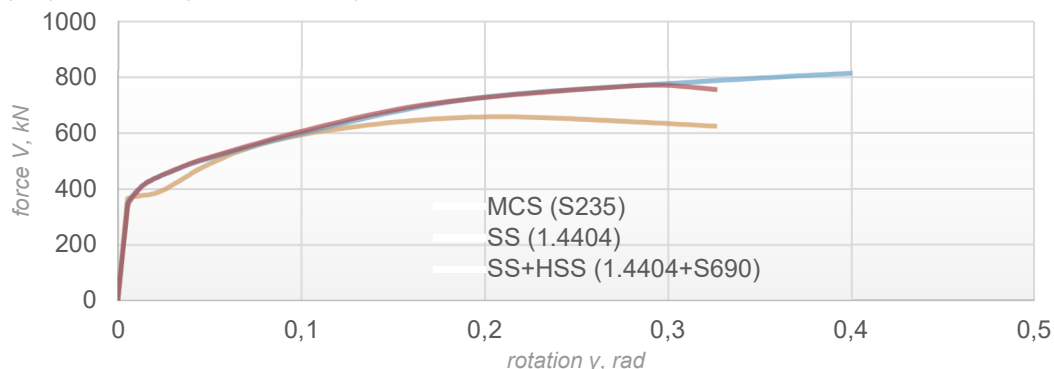


Figura 10. Performanța linkurilor solicate la încercări monotone

6 Activitatea 2.2 - Selectarea procedeelor de sudare compatibile cu grosimile și materialele de sudat

În cadrul activității 2.2 au fost analizate următoarele procedee de sudare și principalele lor avantaje și dezavantaje:

- Sudarea cu electrod învelit (cu arc electric fără gaz de protecție). Pe lângă avantajele, cum ar fi flexibilitatea ridicată, costul redus, calitatea înaltă a sudurii și mânuirea relativ ușoară, acest procedeu e tot mai puțin utilizat, din cauza productivității reduse și sensibilitatea de fisurare la rece.
- Sudarea sub strat de flux (cu electrod de sârmă sau sub formă de bandă). Avantajul de a obține o sudură foarte calitativă, cu degajări reduse de fum și cu un grad înalt de utilizare al materialului de adaos este depășit de dezavantajelor de limitare a sudurii în poziție orizontală, de limitare datorată introducerii unei cantități prea mari de căldură la sudarea oțelurilor cu granulație fină, etc.
- Sudarea WIG. Deși permite sudarea cu sau fără material de adaos, în curent alternativ sau continuu, limitările de utilizare, cum ar fi productivitatea redusă, radiația UV mai intensă și rata mică de depunere, determină acest procedeu ca fiind unul nepotrivit pentru aplicația curentă.
- Sudarea cu fascicul de electroni. Este un procedeu care are multe avantaje, oferă o calitate superioară a îmbinării sudate, fapt pentru care domeniul său de aplicație include industria aerospațială, instrumente de precizie, etc. Totuși, nu este recomandat pentru realizarea linkurilor, dată fiind complexitatea procesului tehnologic, producerea de radiații X, costul ridicat al echipamentului de sudare, etc.
- Sudarea cu radiație laser (sudare cu radiație luminoasă). Oferă o controlabilitate foarte bună, sursa laser având posibilitatea de a fi izolată într-o încăpere îndepărtată, și implică niște costuri scăzute, însă prezintă dezavantajul unei viteze moderate de sudare.

Ținând cont de avantajele și dezavantajele procedeelor de sudare, pentru realizarea îmbinărilor linkurilor se recomandă utilizarea următoarelor tipuri de procedee:

- Sudarea MAG (Metal Active Gas) în atmosferă de gaze protectoare, utilizată cu precădere, la sudarea oțelurilor nealiate, cu granulație fină, slab aliate, și aliate. Acest procedeu, datorită controlului precis și rapid al curentului de sudare, permite sudarea unor materiale de la grosimi foarte reduse până la grosimi foarte mari.
- Sudarea cu sârmă tubulară. Acest procedeu asigură o stabilitate ridicată a arcului electric, sensibilitate redusă la sudare în curenți de aer, fiind dezvoltate inițial pentru sudarea oțelurilor slab aliate și a celor inoxidabile, iar în prezent devenind cel mai frecvent utilizate la sudarea oțelurilor structurale.

7 Activitatea 2.3 - Validare experimentală a procedeelor de sudare

Sudurile folosite la fabricarea linkurilor sunt cu pătrundere completă (între inima și talpa linkului, inimă și placa de capăt, talpă-placa de capăt) și suduri de colț (între rigidizări și link). Noutatea științifică a fost reprezentată de îmbinarea prin sudură a unor materiale eterogene (disimilare).

Tabelul 5. Combinații de materiale pentru care au fost elaborate proceduri de sudare

	Tip sudură		
	cu pătrundere completă în K	cu pătrundere completă în 1/2V	de colț
Combinații de oțel	- S235 J2 / S235 J2 - 1.4404 / 1.4404 - 1.4404 / S235 J2 - 1.4404 / S690 QL - S355 J2 / S355 J2 - S235 J2 / S355 J2 - 1.4404 / S355 J2	- S235 J2 / S355 J2 - 1.4404 / S355 J2 - S690 QL / S355 J2 - S355 J2 / S355 J2	- S235 J2 / S235 J2 - 1.4404 / 1.4404 - 1.4404 / S235 J2 - 1.4404 / S690 QL - S355 J2 / S355 J2

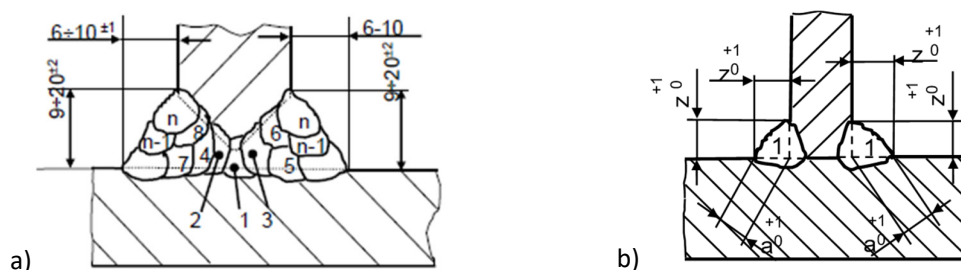


Figura 11. Ordinea de sudare a îmbinărilor cu: a) sudură cu pătrundere completă în K: 1.4404+S235J2
b) sudură de colț: S235J2+S355J2

Tehnologia de sudare pentru situațiile investigate a fost validată prin încercări cu lichide penetrante, încercări de duritate, investigații cu ultrasunete și examinare macroscopică. Pe baza acestora au fost întocmite variantele finale ale specificațiilor tehnologiei de sudare (WPS – Welding Procedure Specification).

8 Activitatea 2.4 - Proiectarea și fabricarea specimenelor pentru încercări pe materiale de bază și îmbinări sudate

Specimenele pentru încercări pe materiale de bază au fost proiectate pe baza prevederilor standardului ISO 6892-1:2016 „Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare la temperatura ambiantă”, SR EN ISO 148-1:2017 "Materiale metalice. Încercarea de încovoiere prin șoc pe epruveta Charpy. Partea 1: Metodă de încercare" și ASTM E606/E606M "Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing". Specimenele sunt debitate din tablele de oțel prezentate în Figura 12, conform schemei de debitare din Figura 14. Specimenele pentru încercări pe îmbinări sudate au fost concepute astfel încât să reproducă solicitarea sudurilor dintre inima și talpa linkului, și vor permite evaluare performanței oligociclice a sudurilor cu pătrundere completă și a acelor de colț. Nomenclatorul specimenelor pentru încercări pe materiale de bază și îmbinări sudate este prezentat în Tabelul 7, Tabelul 9, Tabelul 8 și Tabelul 10.

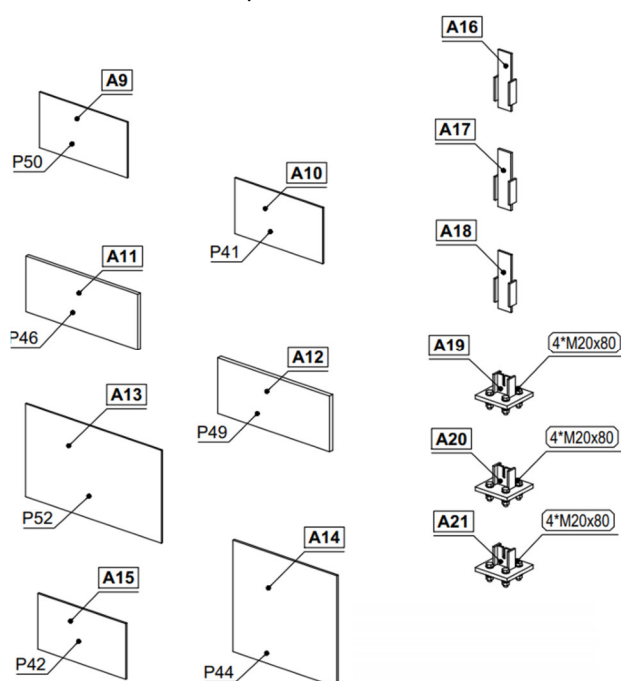


Figura 12. Table din cele 4 mărci de oțel utilizate în programul experimental

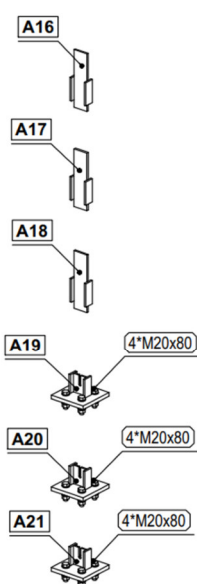


Figura 13. Specimene pentru încercări pe îmbinări sudate

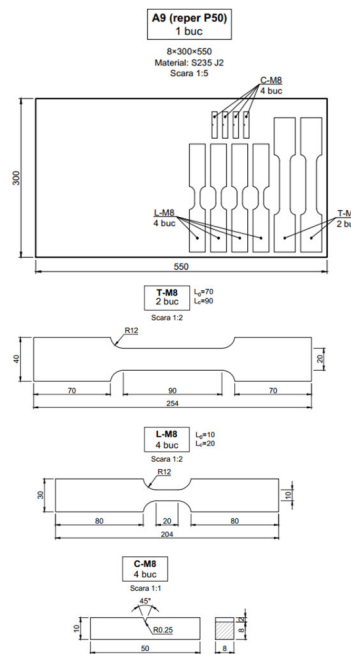


Figura 14. Schema de debitare a specimenelor pentru încercări pe materiale de bază (fragment)

9 Activitatea 2.5 - Realizarea deseneilor de execuție și fabricarea standului experimental și a linkurilor

Ținând cont de baza materială existentă în Laboratorul CMMC din cadrul Facultății de Construcții, pentru a putea derula programul experimental din cadrul proiectului HYLINK, au fost fabricate două elemente din standul experimental (ansamblul grindă-contravântuire), elementele existente fiind hașurate în

Figura 15. Au fost realizate desenele de execuție, caietul de sarcini și au fost fabricate 12 linkuri, prezentate în Tabelul 6.

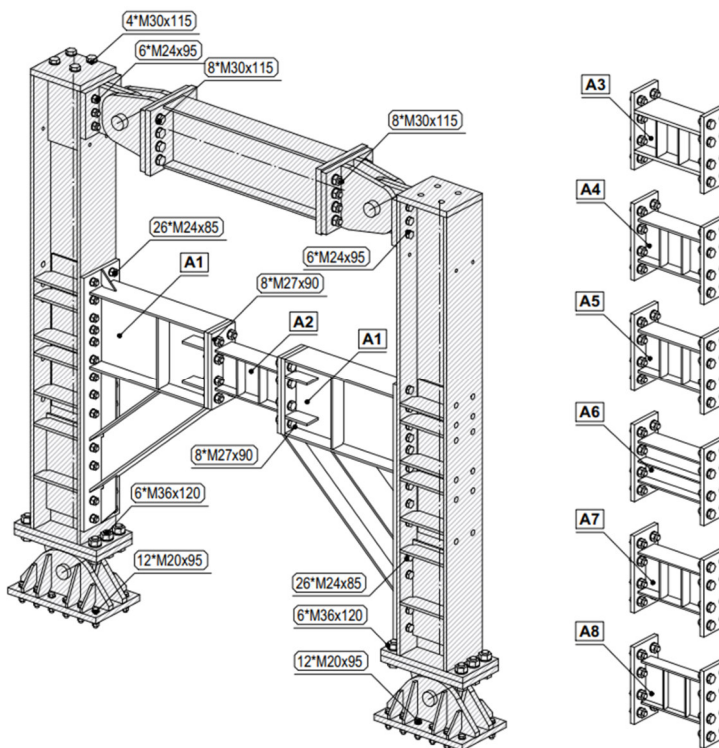


Figura 15. Ansamblu spațial și specimele experimentale – linkuri

Tabelul 6. Nomenclatorul linkurilor pentru programul experimental

LINKURI					
tipologie	părți rigidizate	marcă oțel	dimensiuni	protocol de încărcare	nr. de spec.
MCS-S235J2	1	S235	240x140x10x8	M,C	2
MCS-connection	1	S355	255x200x20x25	M,C	2
SS+2 stiff	2	1.4404	250x140x12x8	M,C	3
SS+MCS+1 horiz.double stiff	2	1.4404+S235	240x140x10x8	C	1
SS+MCS+2 double stiff	2	1.4404+S235	240x140x10x8	C	2
SS+HSS	2	1.4404+S690	250x80x10x8	C	2
Nr. total de specimele					12

10 Activitatea 2.6 - Încercări la tracțiune, Charpy și oligociclice pe materiale de bază

Pentru caracterizarea materialului de bază au fost efectuate încercări la tracțiune, Charpy și oligociclice. Programul experimental cuprinde specimele fabricate din cele 4 tipuri de oțeluri: oțeluri obișnuite S235J2 și S355J2, oțel de înaltă rezistență S690QL, și oțelul inoxidabil 1.4404. Nomenclatorul specimenelor pentru încercări pe materiale de bază și îmbinări sudate este prezentat în Tabelul 7.

Tabelul 7. Nomenclatorul specimenelor pentru încercări la tracțiune pe materiale de bază

grup oțel	marcă oțel	grosime	direcția de încercare*	nr. de specimen
MCS	S235J2	8	T	2
	S235J2	10	T	2
	S355J2	20	T	2
	S355J2	25	T	2
SS	1.4404	8	L,T	6
	1.4404	12	L,T	6
HSS	S690QL	10	T	2
Nr. total de specimen				22

Tabelul 8. Nomenclatorul specimenelor pentru încercări oligociclice pe materiale de bază

LCF					
grup oțel	marcă oțel	grosime	direcția de încercare	protocol de încercare**	nr. de specimen
MCS	S235J2	8		M, Cc, Cv	4
	S235J2	10		M, Cc, Cv	4
SS	1.4404	8	L	M, Cc, Cv	4
			T	M, Cc, Cv	4
	1.4404	12	L	M, Cc, Cv	4
			T	M, Cc, Cv	4
HSS	S690QL	10		M, Cc, Cv	4
Nr. total de specimen					28

* L – longitudinal, T – transversal;

** M – monoton, Cc – ciclic amplitudine constantă, Cv – ciclic amplitudine variabilă;

Tabelul 9. Nomenclatorul specimenelor pentru încercări de reziliență (Charpy) pe materiale de bază

grup oțel	marcă oțel	grosime	direcția de încercare	nr. de spec.
MCS	S235J2	8		5
SS	1.4404	8	L,T	10
Nr. total de specimen				15

Tabelul 10. Nomenclatorul specimenelor pentru încercări oligociclice pe îmbinări sudate

LCF ON WELDS				
mărci oțel		tipul sudurii	protocol de încărcare	nr. de spec.
MCS	MCS	de colț	M,C	3
		pătrundere completă	M,C	3
SS	SS	de colț	M,C	3
		pătrundere completă	M,C	3
SS	HSS	de colț	M,C	3
		pătrundere completă	M,C	3
SS	MCS	de colț	M,C	3
		pătrundere completă	M,C	3
Nr. total de specimene				24

Principalele rezultate cuantificate în cadrul activității 2.6 sunt diagramele de material obținute în urma încercărilor. În Figura 16 se prezintă curba inginerescă tensiune-deformație, obținută în urma unei încercări la tracțiune (Figura 17) realizată pe specimenul TM8 (S235), cu grosimea de 8 mm.

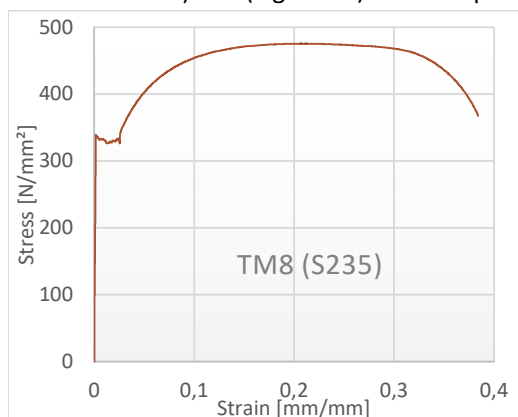


Figura 16. Curba forță-deformație pentru specimenul TM8, supus la încercarea monotonă de tracțiune

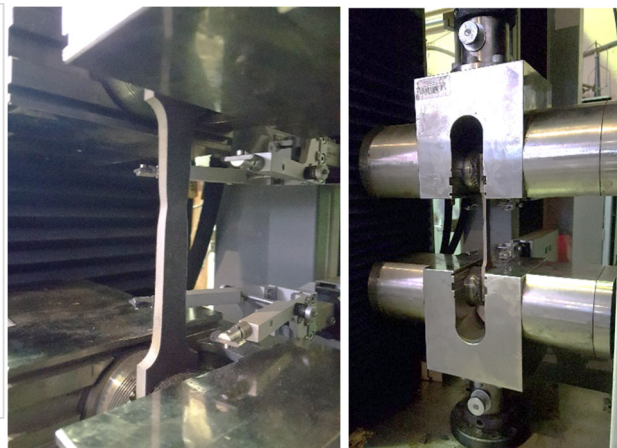


Figura 17. Specimenul TM8 fixat în mașina de încercări la tracțiune

11 Activitatea 2.7 - Diseminarea rezultatelor 2: publicare 2 articole la conferințe sau în reviste

Pentru coordonarea activităților desfășurate în cadrul proiectului au fost organizate două ședințe de lucru la Timișoara, în sediul Departamentului Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor, UPT (CO), în cadrul cărora au fost stabilite sarcinile fiecărui partener, modului de elaborare a rapoartelor tehnice și financiare, și alte aspecte legate de activitatea de cercetare. Concomitent, a fost creat și configurat un sistem de schimb de date online, pentru a permite stocarea centralizată a fișierelor de lucru și rapoartelor.

În activitatea de cercetare în cadrul proiectului au fost implicați studenți din ciclul masterat și doctorat. Ca rezultat al unui set de investigații și simulări numerice pe linkuri, studentul masterand Ion Prodan a elaborat o lucrare de disertație intitulată: „Numerical simulation of stainless steel, hybrid and mild carbon steel links”, coordonată de Directorul proiectului, Prof. Dr. Ing. Aurel Stratan.

Proiectul susține derularea tezei de doctorat a studentei doctorandă Anna Prodan, intitulată: „Comportarea seismică a linkurilor hibride din oțel de înaltă performanță”, sub coordonarea Directorului proiectului, Prof. Dr. Ing. Aurel Stratan.

O altă activitate de diseminare o constituie prezentarea unei părți din rezultatele obținute pe parcursul etapei a 2-a, în cadrul Workshop FreeDAM+, desfășurat în data de 03.12.2021, la Universitățile degli Studi di Salerno, Italia. Prezentarea „Hybrid replaceable links” a fost elaborată de doctoranda Anna Prodan și coordonată de Directorul proiectului, Prof. Dr. Ing. Aurel Stratan.

12 Concluzii

Pe durata primelor 2 etape ale proiectului de cercetare „Linkuri demontabile hibride din oțel inoxidabil și oțel de înaltă rezistență (HYLINK)” s-au atins următoarele rezultate principale:

- calculul structurilor prototip, și predimensionarea linkurilor (Activitățile 1.1, 1.3);
- simulările numerice și analiza cu elemente finite pre-test a materialelor și linkurilor (Activitatea 2.1);
- elaborarea proiectelor de execuție și a planului programului experimental (Activitățile 2.4, 2.5);
- analiza tipurilor de oțel, selectarea procedeelor de sudură compatibile, precum și validarea experimentală a procedeelor de sudare (Activitățile 1.2, 2.2, 2.3);
- execuția specimenelor experimentale și realizarea încercărilor pe specimene de materiale de bază (Activitățile 2.4, 2.5 și 2.6);
- diseminarea rezultatelor în conformitate cu planul de activitate (Activitățile 1.4, 2.7).

Director proiect,

Prof.dr.ing. Aurel Stratan