

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Școala doctorală de Inginerie



TEZĂ DE DOCTORAT
-REZUMAT-
STĂRI DE SOLICITARE CE APAR ÎN
STRUCTURILE NECONVENȚIONALE
ALE NAVELOR CU DUBLU ÎNVELIȘ

Doctorand,
Adrian PRESURĂ

Conducător științific,
Prof. univ. dr. ing. Ionel CHIRICĂ

Seria I6 Inginerie mecanică Nr. 38

GALAȚI

2017

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Școala doctorală de Inginerie



TEZĂ DE DOCTORAT
-REZUMAT-
STĂRI DE SOLICITARE CE APAR ÎN
STRUCTURILE NECONVENȚIONALE
ALE NAVELOR CU DUBLU ÎNVELIȘ

Doctorand,
Adrian PRESURĂ

Conducător științific, Prof. univ.dr.ing. Ionel CHIRICĂ

Referenți științifici Prof. univ.dr.ing. Leonard DOMNIȘORU
Conf. univ.dr.ing. Ionel GAVRILESCU
Conf. univ.dr.ing. Elena-Felicia BEZNEA

Seria I6 Inginerie mecanică Nr. 38

GALAȚI

2017

CUPRINS

	Pag. Rezumat	Pag. Teză
INTRODUCERE	-	4
NOTAȚII ȘI ABREVIERI	-	8
LISTĂ FIGURI ȘI LISTĂ TABELE	-	9
CAP. 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIU	4	16
1.1 Necesitatea dublu învelișului		
1.2 Structuri de dublu înveliș tipice		
1.3 Structuri de dublu înveliș neconvenționale		
1.4 Cercetări actuale în domeniul structurilor neconvenționale de dublu înveliș		
1.5 Concluzii		
CAP. 2. REGULI ȘI REGLEMENTĂRI APLICABILE	13	35
CAP. 3. MODELE TEORETICE UTILIZATE LA ANALIZĂ	15	41
3.1 Teoria elasticității		
3.2 Teoria plasticității		
3.3 Mecanica ruperii materialelor		
3.4 Metode de calcul al stărilor de solicitare		
3.5 Concluzii		
CAP. 4. PRINCIPII ÎN UTILIZAREA SIMULĂRILOR NUMERICE	20	57
4.1 Metoda elementului		
4.2 Aspecte conform BV Rules, 2016 privind aplicarea metodei elementului finit		
4.3 Aspecte conform ADN, 2017 privind aplicarea metodei elementului finit		
4.4 Concluzii		
CAP. 5. TESTE EXPERIMENTALE ȘI SIMULĂRI NUMERICE PE MODELE	23	65
5.1 Formularea problemei		
5.2 Pregătirea experimentelor		
5.3 Realizarea experimentelor		
5.4 Aspecte privind simulările numerice		
5.5 Analiza comparativă experiment – simulare numerică		
5.6 Concluzii		
CAP. 6. ANALIZĂ STRUCTURĂ CONVENȚIONALĂ DE DUBLU BORD	32	94
6.1 Descriere structură convențională de dublu bord		
6.2 Analiza structurii convenționale în domeniul elastic		
6.3 Analiza structurii convenționale în domeniul plastic cu solicitare cvasi-statică		
6.4 Analiza structurii convenționale în domeniul plastic cu solicitare dinamică		
6.5 Analiza structurii convenționale în domeniul plastic cu solicitare dinamică-pescaj2		

	Pag. Rezumat	Pag. Teză
CAP. 7. INVESTIGAREA DE SOLUȚII PENTRU STRUCTURI NECONVENȚIONALE	41	119
7.1 Structura neconvențională „K” – TIP1		
7.2 Structura neconvențională „SANDWICH” – TIP2		
7.3 Structura neconvențională „SANDWICH” – TIP3		
7.4 Structura neconvențională „SANDWICH” – TIP4		
7.5 Structura neconvențională „ICE” – TIP5		
7.6 Structura neconvențională „DUCTIL” – TIP6		
7.7 Structura neconvențională „LIGHT” – TIP7		
7.8 Structura neconvențională „ARC” – TIP8		
7.9 Concluzii		
CAP. 8. PROPUNERI PENTRU MODERNIZAREA STRUCTURILOR ACTUALE	50	162
CAP. 9. PROPUNEREA UNEI STRUCTURI NECONVENȚIONALE NOI – TIP-X	51	164
9.1 Descriere structură neconvențională de dublu bord – TIP-X		
9.2 Analiza structurii neconvenționale TIP-X în domeniul elastic		
9.3 Analiza structurii neconvenționale TIP-X în domeniul plastic cu solicitare dinamică		
CAP. 10. CONCLUZII FINALE	55	173
CAP. 11. CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE	59	177
LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE ȘI PREZENTATE	-	179
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	61	180

CUVINTE CHEIE

CAP.1 – dublu înveliș, petroliere, vrachiere, LNG, LPG, nave cu propulsie nucleară, portcontainer, submarine, nave tehnice, dublu înveliș neconvențional, structură sandwich, rezistență la impact, coliziune de bordaj, eșuare.

CAP.2 – MARPOL, SOLAS, MSC.235(82), IBC Code, IGC Code, ADN, NMA 123/994.

CAP.3 – teoria elasticității, teoria plasticității, criteriu de cedare a materialului, întărirea oțelului, mecanica ruperii materialelor, energie de rupere, stări de solicitare, societăți de clasificare, metoda elementului finit.

CAP.4 – simulare numerică, discretizare, condiții la limită, încărcări locale, încărcări globale, idealizare material.

CAP.5 – deformare elasto-plastică, stand încercări, caracteristică material, epruvetă plată, încercare de tracțiune, caracteristică biliniară, energie internă, test de convergență.

CAP.6 – dublu înveliș convențional, navă fluvială, încovoiere longitudinală, solicitare cvasi-statică, forță de contact, solicitare dinamică, frecare dinamică, cedare structură, energie de deformație, deformată globală, deformată locale.

CAP.7 – distanță de penetrare, greutate structură, fezabilitate, materiale uzuale, grindă deformabilă, polistiren, coaste intermediare, ductil, arc.

CAP.8 – modernizare, avantaje, dezavantaje.

CAP.10 – grad de siguranță, poluarea mediului, analiză directă.

CAP.11 – proiectare concurențială.

CAPITOLUL 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIU

1.1 Necesitatea dublu învelișului

În timp datorită noilor reguli, dar și datorită noilor cerințe funcționale structurile de dublu înveliș au căpătat o largă utilizare în construcțiile de nave, ele fiind proiectate pentru a răspunde cerințelor tehnice specifice fiecărui tip de navă.

În principiu, funcțiile dublu învelișului pot fi clasificate în două categorii:

- a) funcții generale
 - utilizarea spațiilor din dublu fund și dublu bordaj ca tancuri de balast, apă potabilă, combustibil etc.
 - asigurarea unui nivel minim de flotabilitate și stabilitate în cazul avariilor de fund și/sau bordaj
- b) funcții specifice tipului de navă
 - nave petroliere pentru a asigura un anumit grad de protecție a tancurilor de marfă în cazul unui impact (eșuare sau coliziune cu altă navă), urmărindu-se astfel micșorarea riscului deversării de produse petroliere
 - nave tanc de produse chimice, nave tanc ADN și FPSO: pentru protecția tancurilor de marfă
 - nave cu propulsie nucleară: protejarea reactorului nuclear în cazul unei coliziuni
 - portcontainere: pentru a mări rezistența și rigiditatea la torsiune afectată de deschiderile mari ale gurilor de magazii
 - submarine: necesitatea unui înveliș interior rezistent la presiune
 - nave tehnice: asigurarea geometriei pereților de magazii.

1.2 Structuri de dublu înveliș tipice

1.2.1 Petroliere (CSR OT, 2012)

În CSR OT sunt prezentate structurile tipice ale petrolierelor cu dublu înveliș (figura 1.6). Acestea pot fi cu două sau trei tancuri de marfă, cu traverse în tancul central sau în tancurile laterale, cu peretele longitudinal din planul diametral simetric sau asimetric, cu osatură pe punte sau sub punte.

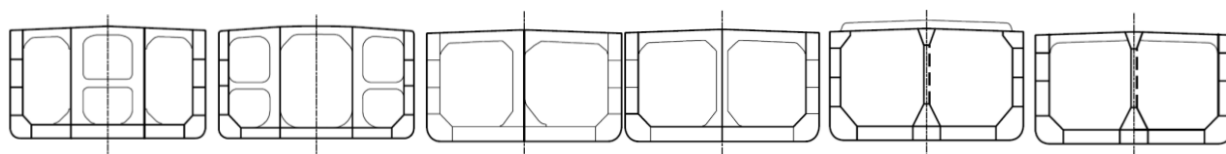


Fig.1.6 Secțiuni tipice de petroliere cu dublu înveliș – (CSR OT, 2012)

1.2.2 Vrachiere (CSR BC, 2012)

În figura 1.10 sunt prezentate geometriile diverselor tipuri de vrachiere întâlnite (ABS, 2015), de la stânga în ordine:

- prima secțiune - tipică de mineralier „Ore Carrier” destinat transportului de minereu numai în magazinele centrale – doi pereți longitudinali și dublu fund
- doua secțiune - tipică de navă de transport petrol sau vrac/minereu „Oil or Bulk/Ore OBO” – structura cu dublu bord și dublu fund și tancuri inferioare și superioare laterale (hopper și topside tanks)
- în dreapta secțiuni - tipice de navă de transport minereu în magazinele centrale sau petrol în magazinele centrale și tancurile laterale „Ore or Oil Carrier” – doi pereți longitudinali și dublu fund

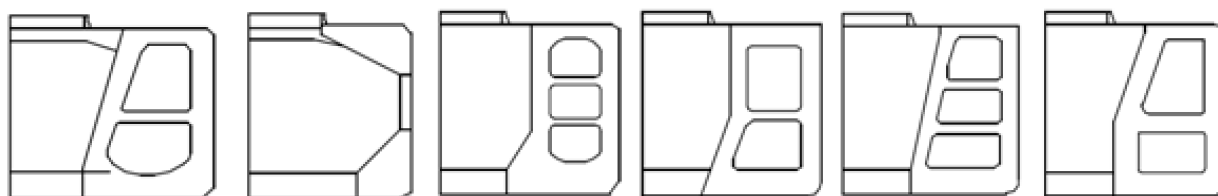


Fig. 1.10 Secțiuni transversale diverse tipuri de vrachiere (ABS, 2015)

1.2.3 LNG, LPG (ABS, 2015)

În figura 1.11 sunt prezentate secțiunile tipice ale navelor de transport gaze de la stânga în următoarea ordine:

- tanc independent prismatic
- tanc semi-membrană
- tanc membrană
- tanc sferic
- tanc sub presiune

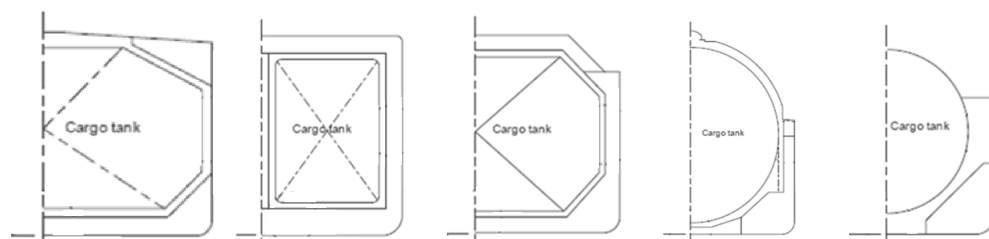


Fig. 1.11 Structuri tipice navelor de transport gaze lichefiate (ABS, 2015)

1.2.4 Tancuri ADN (ADN, 2017)

Tancurile de tip „G” destinate transportului de gaze pe căile navigabile interioare conform ADN pot avea următoarele configurații (figura 1.12):

- tancuri independente circulare cu dublu fund și simplu bordaj
- tancuri independente circulare cu dublu fund și dublu bordaj
- tancuri independente rectangulare cu dublu fund și dublu bordaj

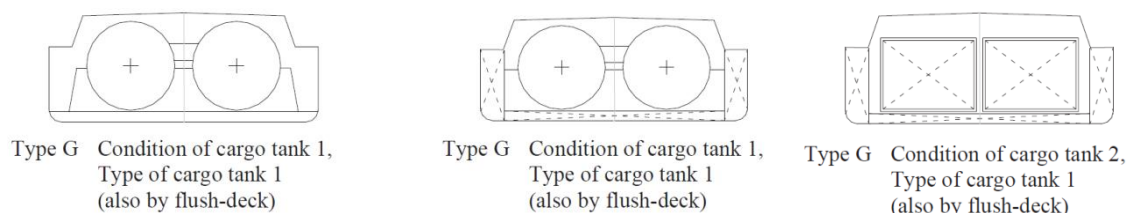


Fig. 1.12 Tancuri ADN Type G – pentru transport gaze (ADN, 2017)

1.3 Structuri de dublu înveliș neconvenționale

Structurile de dublu înveliș neconvenționale prezentate au apărut ca un răspuns mai eficient la cerințele de rezistență de impact, în cazul coliziunii cu altă navă sau eșuării.

În continuare sunt prezentate o serie de structuri neconvenționale de dublu înveliș ce au fost investigate din punct de vedere al rezistenței la impact.

1.3.1 PNTL – dublu înveliș (<http://www.pntl.co.uk>)

PNTL (Pacific Nuclear Transport Limited) este o companie de transport maritim a produselor de tip combustibili nucleari (MOX fuel) și reziduurile rezultate. Având în vedere gradul foarte ridicat de risc al acestui tip de marfă s-a adoptat o structură de dublu bordaj care se extinde pe 20% din lățimea navei în fiecare bord și având în interior o structură întărită suplimentar cu diafragme orizontale cu grosimea de 20 mm care să mărească rezistența în

cazul unei avarii. Structura adițională însumează aproximativ 400 t de oțel în plus față de structura convențională a navei, ceea ce reprezintă aproximativ 40% din masa structurii de oțel a unei nave convenționale similare.

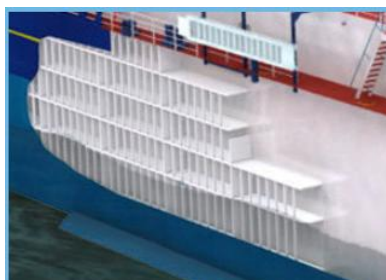


Fig.1.15 Dublu bordaj neconvențional – diafragme orizontale suplimentare grosime 20 mm
(<http://www.pntl.co.uk>)

1.3.2 Dublu înveliș cu structuri „Y” (MoVe IT!, 2014)

În cadrul proiectului de cercetare europeană MoVe IT! s-a analizat o structură de dublu înveliș de tip „Y”.

Conceptul se bazează pe folosirea unor elemente de structură de forma „Y” între învelișul exterior și învelișul interior. Spre deosebire de dublu învelișului clasic conceptul „Y” înlocuiește stringherii și cadrele transversale întărite ortogonale cu structura schițată în figura 1.16. Celula în formă de „Y” are flanșele direcționate către învelișul exterior. Geometria profilului „Y” este dată de înălțimea „h” a piciorului, mărimea „e” a inimii, unghiul de înclinare „ α ” a flanșelor, grosimea „t”, spațierea „L” și de lățimea totală „H” a structurii de dublu înveliș.

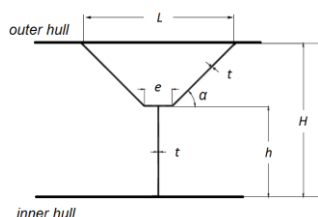


Fig.1.16 Structura unei celule de tip „Y” (MoVe IT!, 2014)

1.3.3 Dublu înveliș cu structuri „ λ ” (MoVe IT!, 2014)

Prin analogie cu structurile „Y”, caracteristicile structurii în formă de lambda sunt date de tablele laterale îndoite (flanșele). O celulă în formă de „ λ ” este schițată în figura 1.17.

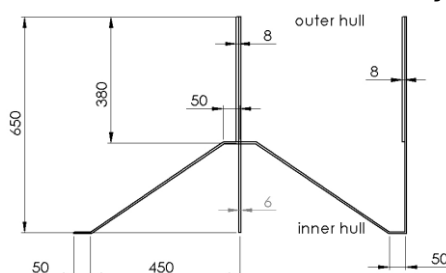


Fig.1.17 Structura unei celule de tip „ λ ” (MoVe IT!, 2014)

1.3.4 Dublu înveliș cu sandwich din oțel-polistiren-oțel (MoVe IT!, 2014)

Conceptul constă dintr-un dublu înveliș prevăzut la interior cu blocuri de spumă XPS.

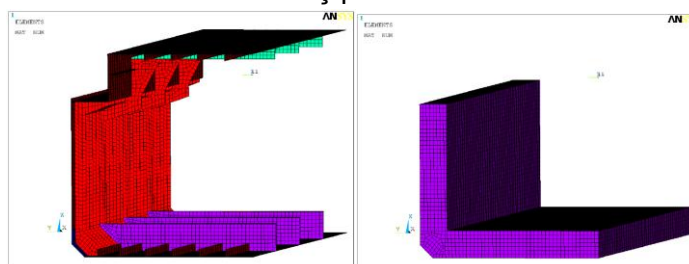


Fig.1.18 Elemente structură de oțel (stânga) elemente din spumă (dreapta) (MoVe IT!, 2014)

1.3.5 Dublu înveliș cu sistem SPS (<http://www.ie-sps.com>)

SPS este un material compozit ce constă din două învelișuri metalice fixate între ele cu un miez din elastomer poliuretanic. SPS este aprobat de autoritățile din domeniu și este folosit într-o gamă variată de aplicații civile, maritime și în aplicații speciale (militare).

Sistemul SPS este mult mai simplu și mai ușor decât panourile de tablă întărite cu osatură și mult mai ușoare și mai simple de manevrat decât structurile din beton armat (figura 1.19), datorită acestui concept de dublu înveliș prevăzut la interior cu blocuri de spumă XPS (figura 1.20).

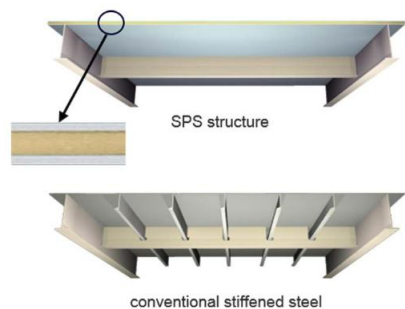


Fig.1.19 Panou cu SPS
(<http://www.ie-sps.com>)

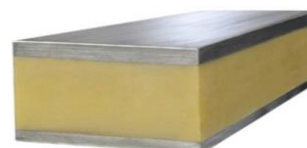


Fig.1.20 Element de SPS
(<http://www.ie-sps.com>)

1.4 Cercetări actuale în domeniul structurilor neconvenționale de dublu înveliș

Datorită cerințelor tot mai stricte legate de siguranța navelor în cazul unui impact, și de protecția mediului înconjurător, în cazul navelor ce transportă substanțe periculoase, s-a dezvoltat ideea unor structuri noi neconvenționale de dublu înveliș care să răspundă acestor cerințe.

1.4.1 Proiectul de cercetare europeană MoVe IT! (MoVe IT!, 2014)

Proiectul FP7 MoVe IT! (2011-2014) este un proiect de cercetare europeană care a dezvoltat o serie de opțiuni pentru modernizarea rentabilă a navelor pentru navigație interioară.

În cadrul pachetului de lucru WP5 Structures & Weight, Task 5.3 Crashworthiness atenția s-a îndreptat către selectarea unei structuri tipice pentru modernizare și către simularea rezistenței la impact prin metoda dinamică explicită pentru anumite scenarii de accident (impactul cu o altă navă și impactul cu fundul apei).

Au fost investigate un număr de scenarii de coliziune și eșuare în care s-au variat diverși factori precum: structura corpului lovit (structuri „Y”, „λ” sau sandwich din oțel-spumă), forma corpului care lovește, locația impactului și unghiul impactului.

Calculul a fost realizat cu ANSYS folosind solverul explicit LSDYNA, criteriul de comparație fiind absorbția de energie.

Modelul de structură al navei cu simplu înveliș de referință este prezentat în figura 1.21.

Modelul de structură al navei cu dublu înveliș analizat este prezentat în figura 1.22.

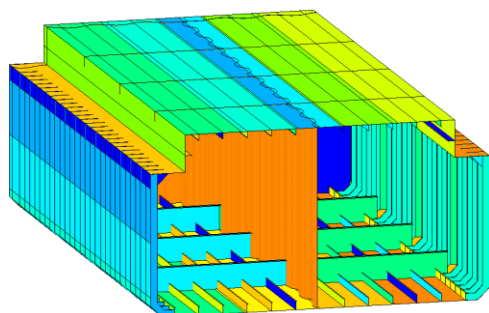


Fig.1.21 Structură cu simplu înveliș

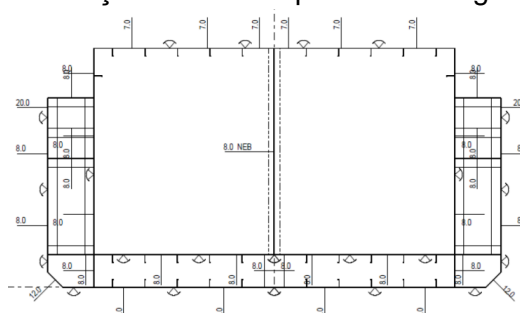


Fig.1.22 Structură de dublu înveliș (MoVe IT!, 2014)

1.4.1.1 Calculul de impact la eșuare a structurilor cu spumă

Geometriile tipice ale obiectului care lovește fundul navei (figura 1.24):

- roca (rock) – dimensiunile sunt mult mai mici decât nava, descrise de o curbă parabolică cu diametrul de $0,2 B$ (B lățimea navei)
- recif (reef) – cu dimensiuni intermediare
- banc de nisip (shoal) – cu dimensiunea egală cu jumătatea navei

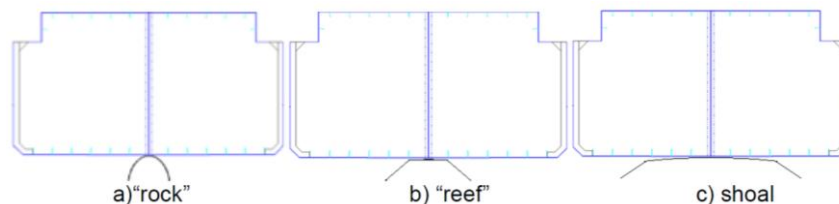


Fig.1.24 Geometriile obiectului la eșuare (MoVe IT!, 2014)

În cazul impactului fundului cu o rocă, în locația 6, s-au obținut următoarele rezultate (figura 1.26):

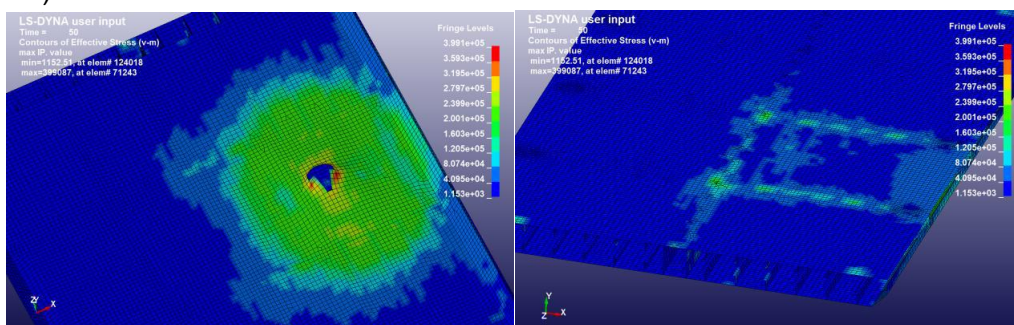


Fig.1.26 Ruperea tablei fundului și tensiunile echivalente în tabla dublu fundului (MoVe IT!, 2014)

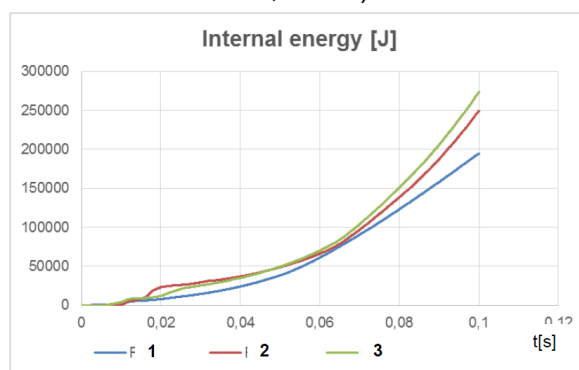


Fig.1.27 Variația energiei interne

1-simplu înveliș 2-dublu înveliș 3-dublu înveliș cu spumă (MoVe IT!, 2014)

Fundul interior și structura de spumă absorb considerabil mai multă energie în comparație cu structura clasică de dublu fund. În figura 1.27 se arată că energia internă a conceptului oțel-spumă-oțel este cu 10% mai mare decât energia internă a structurii tipice de dublu fund.

1.4.1.2 Calculul de impact la coliziune laterală a structurilor cu spumă

S-au considerat diferite scenarii de coliziune (figura 1.28):

- viteza de impact a navei care lovește variază între: 2m/s, 4m/s și 6m/s
- pescajul relativ între cele două nave -0,5 m, 0 m și 1 m
- unghiuri de coliziune 90° , 60° și 45°

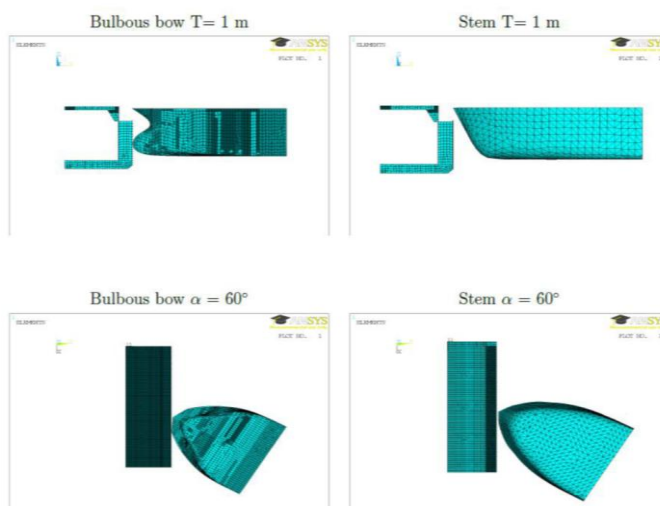


Fig.1.28 Poziționare pe înălțime și unghiuri relative ale corpurilor în coliziune (MoVe IT!, 2014)

În cazul impactului cu o provă clasică s-au obținut următoarele rezultate (figura 1.30):

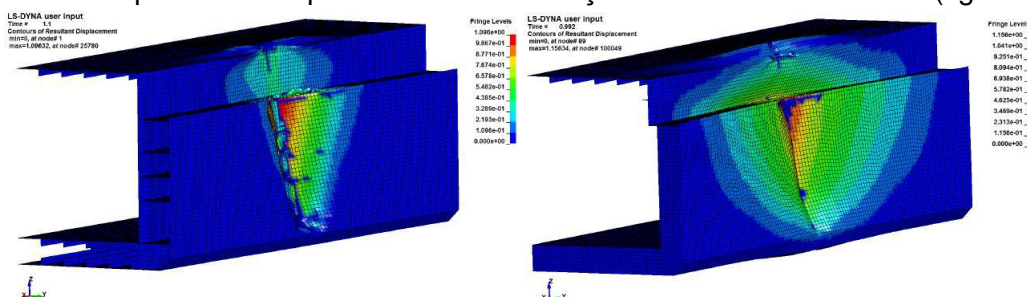


Fig.1.30 Deplasările pentru dublu înveliș clasic și dublu înveliș cu spumă (MoVe IT!, 2014)

În timp ce dublu învelișul clasic se deformează mai degrabă local cu apariția unei crăpături în tabla învelișului, care se propagă de la punte până aproape de fundul navei, structura întărită cu spumă se deformează mai amplu.

S-a investigat și care este influența variației grosimilor de oțel și spumă (figura 1.31).

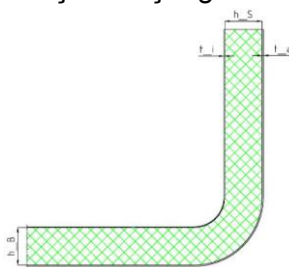


Fig.1.31 Variația grosimilor de oțel și de spumă (MoVe IT!, 2014)

În figura 1.32 se poate observă că pentru aceleași grosimi ale învelișurilor, dar pentru o grosime dublă a stratului de spumă, respectiv 400 mm (linia verde) și 800 mm (linia galbenă), se produce o deplasare cu 0,2 m mai mică.

Totodată prin compararea rezultatelor din figurile 1.32 și 1.33 se observă că pentru aceeași grosime a învelișului interior, $t_i = 3$ mm, și a lățimii dublu bordului, $h_s = 400$ mm, prin mărirea grosimii învelișului exterior, $t_a = 12$ mm în loc de 8 mm, se produce o micșorare a deplasării cu 0,4 m.

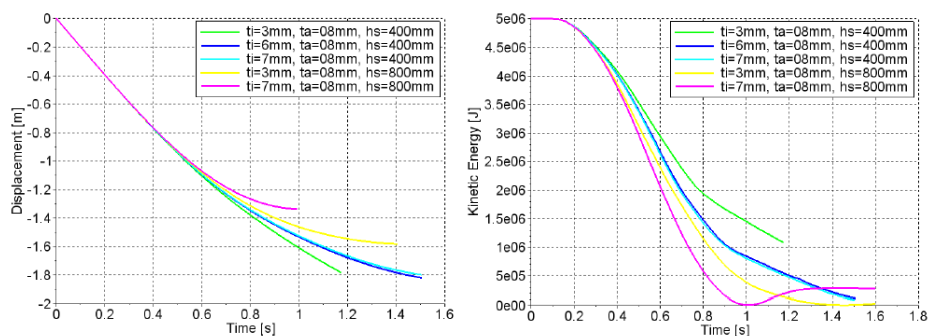


Fig.1.32 Influența variației grosimilor de oțel și de spumă pentru $t_a=8\text{mm}$ (MoVe IT!, 2014)

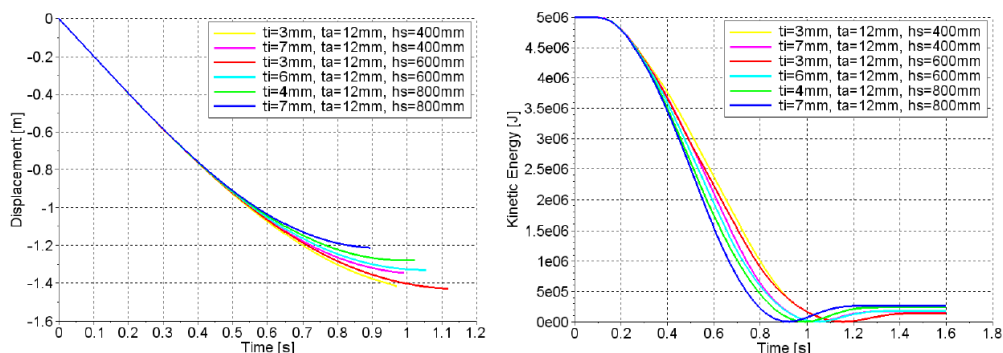


Fig.1.33 Influența variației grosimilor de oțel și de spumă pentru $t_a=12\text{mm}$ (MoVe IT!, 2014)

1.4.1.3 Calculul de impact la coliziunea laterală a structurilor „Y” și „λ”

În aceleași ipoteze s-au analizat și structurile neconvenționale „Y” și „λ”.

Se poate observa prin compararea figurilor 1.35 și 1.36 că dublu bordajul prevăzut cu structuri „Y” și „λ” prezintă un comportament mai bun din punct de vedere al rezistenței prin comparație cu structura clasică de dublu bord datorită unui timp mai lung de penetrare necesar absorbției aceleiași energii cinetice.

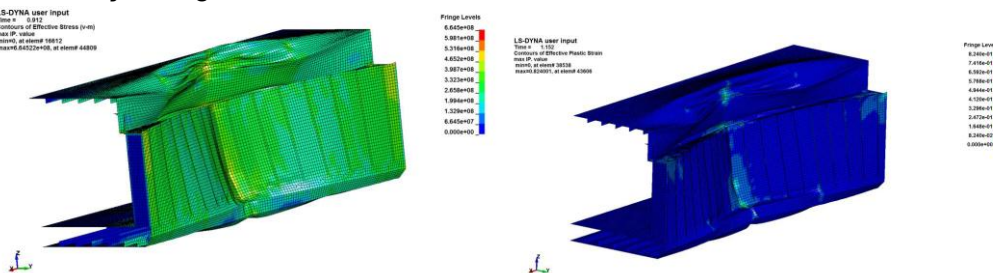


Fig.1.35 Tensiune von Mises maximă 577,2 MPa la 0,912s și deformată plastică la 1,152 s pentru structura de dublu înveliș „Y” (MoVe IT!, 2014)

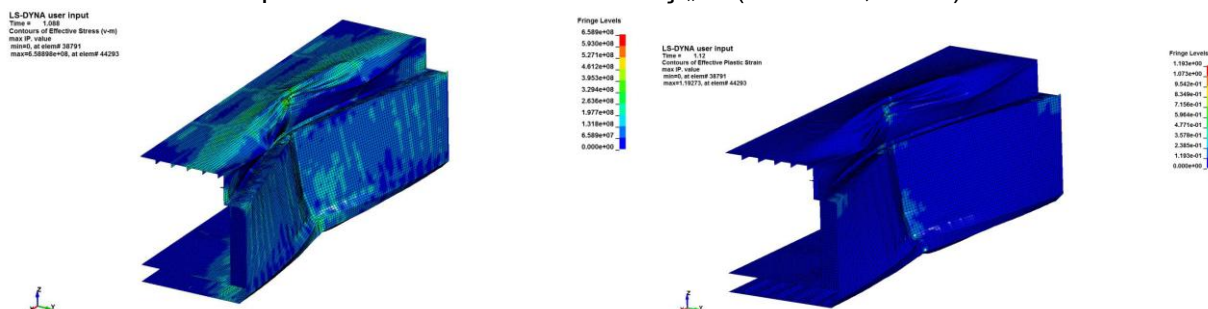


Fig.1.36 Tensiune von Mises maxima 658,9 MPa la 1,088s și deformată plastică la 1,12 s pentru structura de dublu înveliș „λ” (MoVe IT!, 2014)

În figura 1.37 sunt prezentate variațiile de absorbție a energiei interne și de deplasare de

rigid, prin comparație pentru cele trei situații: dublu bordul clasic, cu structura „Y” și „λ”. Frânarea corpului rigid care lovește este cea mai mare în cazul structurii clasice și cea mai mică pentru structura „Y”. Între cele două structuri neconvenționale „Y” și „λ” sunt diferențe moderate, dar ambele prezintă o rezistență mai bună decât structura clasică.

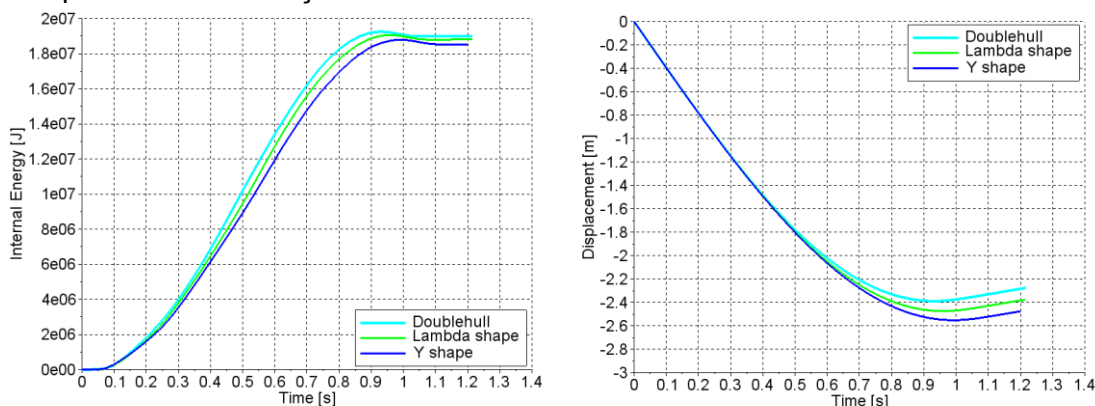


Fig.1.37 Energie internă și deplasare-dublu bord clasică, cu „Y” și cu „λ” (MoVe IT!, 2014)

Concluziile investigațiilor au relevat următoarele avantaje:

- spuma din interiorul dublu învelișului poate ajuta dublu învelișul să lucreze ca un element unitar
- structura de tip sandwich oțel-spumă-oțel are capacitate mare de a absorbi energie
- flotabilitate mărită în cazul unei avarii
- creșterea rezistenței globale a dublu învelișului.

1.4.2 Sistemul de sandwich SPS (IE, 2016)

Sistemul SPS este folosit în aplicații militare și civile pentru a reduce vulnerabilitatea și pentru a mări gradul de supraviețuire și de siguranță. În figura 1.38 sunt arătate rezultatele unui test de explozie realizat de NSWC (US Navy's Naval Surface Warfare Center) care demonstrează cum panoul SPS absoarbe mai multă energie din explozie, reduce riscul ruperii premature și limitează penetrarea fragmentelor. Panoul convențional de oțel (stânga) se rupe în urma exploziei în timp ce panoul SPS (dreapta) absoarbe energia și se deformează fără rupere.



Fig.1.38 Testare la explozie (IE, 2016)



Fig.1.39 Testare la impact cu o rocă (IE, 2016)

În figura 1.39 este prezentat testul la impactul cu o rocă având masa de 2 t care este aruncată de la o distanță de 3 m deasupra unei secțiuni de punte realizată cu sistemul SPS. Sistemul SPS rezistă fără avarie în timp ce sistemul echivalent clasic realizat din oțel este distrus.

Referințe (IE, 2016)

Sistemul SPS de dublu înveliș compact CDH (compact double hull) a fost deja folosit în cadrul unui proiect desfășurat în 2014, în care au fost implicate trei nave FPSO ale companiei Petrobras (figura 1.40). Structura SPS a fost utilizată pentru a asigura protecția la impact a bordajului celor trei nave FPSO în zona cea mai expusă și anume zona de acostare a navelor de aprovizionare/transport.



Owner:
Petrobras
Repair
Location:
China and Brazil
Class:
DNV-GL



Fig.1.40 Protecția la impact a bordajului cu sistemul SPS (IE, 2016)

Compania de proiectare IE (Intelligent Engineering) a proiectat o navă cisternă Type C pentru râul Rin care să îndeplinească cerințele ADN și GL. S-a fabricat și o machetă a structurii în Hanover, Germania (figura 1.41). Cu ajutorul machetei s-a verificat procesul de construcție și asamblare, s-a confirmat standardul de calitate a construcției și s-a demonstrat simplificarea rezultată din folosirea panourilor SPS.



Fig.1.41 Macheta unei nave cisternă Type C cu structura SPS (IE, 2016)

1.5 Concluzii

Necesitatea structurii de dublu înveliș are la bază două justificări :

- îndeplinirea unor funcții generale (tancuri de balast și rezerve, stabilitatea de avarie)
- îndeplinirea funcțiilor specifice tipului de navă (protecția tancurilor de marfă, asigurarea unor suprafețe netede la navele tehnice etc.).

În funcție de particularitățile constructive și de funcțiile fiecărui tip de navă s-au dezvoltat o serie de structuri tipice de dublu înveliș, proiectate să răspundă în general cerințelor legate de rezistența în domeniul elastic.

În ultima perioadă s-a dezvoltat și analiza structurilor în domeniul deformațiilor plastice, mai precis comportarea structurilor la impactul de fund și coliziunea de bordaj. În acest sens au apărut o serie de reguli care precizează modul de analiză a structurilor și cerințele minime de îndeplinit.

De aceea a luat amploare cercetarea unor structuri neconvenționale care să răspundă atât solicitărilor în domeniul elastic cât și cerințelor legate de rezistența structurilor la impact.

CAPITOLUL 2

REGULI ȘI REGLEMENTĂRI APLICABILE

În continuare sunt prezentate principalele Reguli și reglementări întâlnite în proiectarea navală, care impun utilizarea structurilor de dublu înveliș.

MARPOL (MARPOL, 2006)

IMO (International Maritime Organization) a introdus în 1992, prin Convenția MARPOL, standardele privind obligativitatea existenței structurii de dublu înveliș la navele petroliere construite după 6 iulie 1996 (Michael G. Faure, 2006).

Astfel conform MARPOL – Regulation 19, petrolierele trebuie să fie prevăzute cu dublu înveliș după cum urmează:

- dacă $DW < 5000$ t atunci
 - dublu fund cu înălțimea $h = B/15$ m, dar nu mai puțin de 0,76 m și
 - dublu bordaj cu lățimea $w = (0,4 + 2,4 DW/20000)$ m, dar nu mai puțin de 0,76 m
- dacă $DW \geq 5000$ t atunci
 - dublu fund cu înălțimea $h = B/15$ m, dar nu mai puțin de 1m și nu mai mult de 2m
 - dublu bordaj cu lățimea $w = (0,5 + DW/20000)$ m, dar nu mai < 1 m și nu mai > 2 m

SOLAS (SOLAS, 2014)

Conform SOLAS, Chapter II-1, Part B-2, Regulation 9 Double bottoms in passenger ships and cargo ships other than tankers (SOLAS, 2014) – se impune în mod direct ca toate navele de pasageri și de marfă să fie prevăzute cu dublu fund.

MSC.235(82) - Guidelines for the design and construction of offshore supply vessels

Conform MSC 235(82) – Subdivision and damage stability – o navă de aprovizionare platforme trebuie să respecte criteriile de stabilitate de avarie în condițiile unei avarii de bordaj având o extindere transversală de 760 mm. În practică îndeplinirea criteriilor de stabilitate este de multe ori condiționată de utilizarea unei structurii de dublu bordaj.

IBC Code-International Code for Ships Carrying Dangerous Chemical in Bulk (IBC, 2007)

Conform IBC Code navele pentru transportul substanțelor chimice periculoase se clasifică astfel:

- Type 1 – învelișul exterior, la plutirea de plină încărcare, trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/5, 11,5)$ m față de pereții tancurilor și învelișul fundului în planul diametral trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/15, 2)$ m față de fundul tancurilor și nicăieri învelișul navei nu trebuie să fie mai aproape de tancuri decât 760 mm
- Type 2 – învelișul fundului în planul diametral trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/15, 2)$ m față de fundul tancurilor și nicăieri învelișul navei nu trebuie să fie mai aproape de tancuri decât 760 mm
- Type 3 – fără impunerea unor distanțe minime.

IGC Code - International Code for Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC, 2016)

În IGC Code se precizează un scop important în realizarea structurii unei astfel de nave „să se asigure că tancurile de marfă sunt într-o poziție protejată în cazul unei avarii minore a corpului navei și că nava poate supraviețui condițiilor de avarie luate în calcul”.

Conform IGC Code navele pentru transportul gazelor lichefiate se clasifică astfel:

- Type 1G – pentru substanțe care necesită măsuri preventive maxime împotriva pierderilor de marfă - învelișul exterior, la plutirea de plină încărcare, trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/5, 11,5 \text{ m})$ față de pereții tancurilor și învelișul fundului în planul diametral trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/15, 2 \text{ m})$ față de fundul tancurilor și nicăieri învelișul navei nu trebuie să fie mai aproape de tancuri decât distanța „d” (funcție de V_c volumul fiecărui tanc)
- Type 2G/2PG - pentru substanțe care necesită măsuri preventive semnificative împotriva pierderilor de marfă - învelișul fundului în planul diametral trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/15, 2 \text{ m})$ față de fundul tancurilor și nicăieri învelișul navei nu trebuie să fie mai aproape de tancuri decât distanța „d”
- Type 3G - pentru substanțe care necesită măsuri preventive moderate împotriva pierderilor de marfă - învelișul fundului în planul diametral trebuie să fie la o distanță de cel puțin $\min(B/15, 2 \text{ m})$ față de fundul tancurilor și nicăieri învelișul navei nu trebuie să fie mai aproape de tancuri decât distanța „d = 0,8 m”

ADN 2017

Regulile ADN, privind transportul mărfurilor periculoase pe căile navigabile interioare, obligă la utilizarea structurilor de dublu bord și dublu fund în zona spațiilor de marfă, astfel:

- nave pentru transportul mărfurilor uscate – distanța între bordajul exterior și cel interior să fie de minim 0,8 m, iar înălțimea dublu fundului să fie minim 0,5 m
- nave cisternă, care se împart în
 - Type G – pentru transportul gazelor – distanța între bordajul exterior și cel interior să fie de minim 0,8 m, iar înălțimea dublu fundului să fie de minim 0,6 m
 - Type C – pentru transportul substanțelor lichide – distanța între bordajul exterior și cel interior să fie de minim 1,0 m pentru tancurile structurale și 0,8 m pentru tancurile independente, iar înălțimea dublu fundului să fie de minim 0,6 m
 - Type N – pentru transportul substanțelor lichide – distanța între bordajul exterior și cel interior să fie de minim 0,6 m, iar înălțimea dublu fundului de minim 0,5 m.

Totodată se permite utilizarea unor „construcții alternative” dacă se demonstrează prin calcul direct că soluțiile alternative prezintă cel puțin același grad de siguranță la impactul cu o altă navă precum structura standard realizată conform cerințelor ADN. Criteriul de apreciere a siguranței la impact are la bază o analiză de risc la ruperea tancurilor de marfă.

NMA 123/1994

Referitor la unitățile FPSO se cere în „Section 17 – Stability” ca în cazul unei coliziuni cu o navă de aprovizionare, având deplasamentul de 5000 t și viteza de 2 m/s, să nu se producă deversări de petrol din tancurile de stocare sau din echipamentele de prelucrare de pe punte.

Concluzii

Ca urmare a unor evenimente grave, soldate cu poluarea mediului, pierderi materiale importante și chiar pierderea de vieți omenești, IMO, IACS și celelalte autorități din domeniu au adoptat reguli privind obligativitatea și măsurile constructive ale structurilor de dublu înveliș.

Măsurile constructive impuse structurilor de dublu înveliș, privesc comportarea la solicitări în domeniul elastic. În ce privește comportarea structurilor navale la impact, acest lucru este posibil doar printr-o analiză directă cu element finit, cu ajutorul căreia se poate demonstra eficiența unei structuri în cazul unor scenarii de impact impuse de o serie de reguli specifice (ADN, NMA 123/1994).

c) Ecuații fizice

- Legea generalizată a lui Hooke

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)];$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]; \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

Energia potențială de deformare (Ionel Chirica, 1997)

Energia de deformare acumulată de corp „U” are, în general, două efecte: o variație a volumului și o variație a formei:

$$U = U_v + U_f$$

Energia potențială specifică pentru modificarea volumului

$$U_v = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2$$

Cum energia potențială pentru modificarea volumului este pozitivă, rezultă că $\nu < 0,5$.

Energia potențială specifică pentru modificarea formei

$$U_f = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

Concluzie

Limitele în teoria elasticității:

- curgerea materialului – depășirea σ_c tensiunea de curgere a materialului
- flambajul – poate apărea într-un element structural supus la compresiune, încovoiere, forfecare sau combinații de astfel de solicitări, la un nivel de tensiune mult mai mic decât σ_c . Flambajul depinde de geometria și de modul de încărcare a elementului de structură și modulul de elasticitate a materialului.

Pentru analiza comportării structurilor dincolo de aceste limite se utilizează „Teoria plasticității”.

3.2 Teoria plasticității

Criteriul de cedare a materialului Tresca și Mises (Jacob Lubliner, 2006)

Criteriul de cedare este acea lege care definește limita comportamentului elastic sub acțiunea oricărei combinații posibile de tensiuni.

Dintr-o serie de experimente de extrudare a metalelor, Tresca a concluzionat că cedarea a apărut atunci când tensiunea maximă de forfecare a atins o valoare critică. Dacă vectorul tensiune se menține în sectorul $-\pi/6 \leq \theta \leq \pi/6$, criteriul de cedare Tresca poate fi scris sub forma

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2k \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Este evident că $Y = 2k$ conform criteriului de cedare Tresca.

în care: k tensiune de cedare la forfecare pură
 Y tensiune (sau compresiune) uniaxială

Von Mises a sugerat, din considerații pur teoretice, că cedarea apare când J_2 atinge o valoare critică. Rezultă imediat că locul geometric al cedării Mises este un cerc cu raza $\sqrt{2k}$ sau

$\sqrt{\frac{2}{3}}Y$, iar criteriul de cedare este $J_2 = k^2$. Evident $Y = \sqrt{3}k$ conform criteriului von Mises.

Cele două criterii de cedare au aceleași valori Y , dar valoarea k în criteriul Mises este $2/\sqrt{3}$ înmulțit cu valoarea din criteriul Tresca (figura 3.4).

Așadar cele două locuri geometrice diferă cel mai mult în starea de forfecare pură. Pentru cele mai multe metale criteriul de cedare von Mises este preferat deoarece este bazat pe o

corelare mai bună cu datele din testele reale.

Criteriul de cedare Tresca este puțin mai conservator în estimarea cedării, deoarece prezice tensiuni de cedare mai mici pentru cele mai multe stări de tensiune.

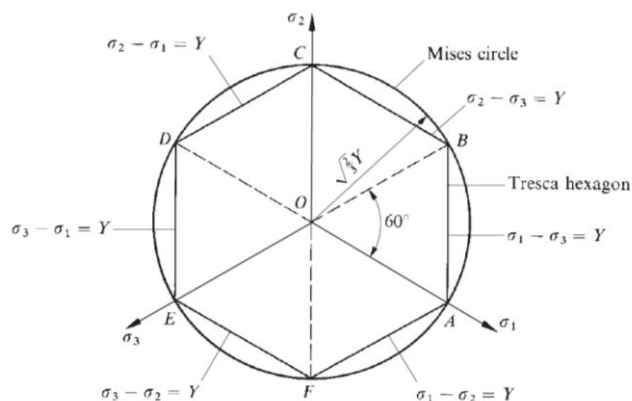


Fig.3.4 Reprezentare grafică a criteriilor de cedare Tresca și von Mises (Chakrabarty J., 2006)

În realitate, datorită fenomenului de întărire (ecruisare) a materialului, această suprafață de cedare descrisă mai sus se modifică (în mărime, centru, forma).

Reguli de întărire în funcție de deformația specifică (Chen W.F., 1988)

Întărire izotropă

Se presupune că materialul este izotrop în starea normalizată și că anizotropia și efectul Bauschinger dezvoltat în timpul deformării la rece sunt neglijate.

O formulare convenabilă din punct de vedere matematic pentru întărire este obținută presupunând că suprafața de curgere se extinde uniform fără schimbarea în formă, pe măsură ce starea de tensiune se schimbă de-a lungul unei traiectorii P_0P în spațiul tensiunilor.

Întărire cinematică

Se vor considera de această dată reguli de întărire care țin cont de anizotropie și de efectul Bauschinger întâlnit la materialele reale.

Un material care este inițial izotrop după cedare și întărire cinematică nu mai este izotrop.

Se poate modela efectul Bauschinger folosind întărirea mixtă, care este o combinație între întărirea izotropă și întărirea cinematică.

Întărirea cinematică este cunoscută prin faptul că cedarea ulterioară în compresiune este diminuată cu aceeași valoare de creștere a tensiunii de curgere la întindere, astfel că se menține tot timpul o diferență de $2\sigma_y$ între tensiunile de curgere.

Pentru analiza comportării structurilor dincolo de rezistența la rupere a materialului se apelează la „Mecanica ruperii materialelor”.

3.3 Mecanica ruperii materialelor

În principiu, în mecanica ruperii materialelor interesează următoarele aspecte:

- energia de rupere
- ruperea macroscopică – traiectorie și textură
- mecanismele ruperii microscopice.

Rezistența unui material dat este măsurată prin energia absorbită înainte și în timpul procesului de rupere. Aria de sub curba tensiune-deformație la întindere uniaxială oferă o măsură a rezistenței. Tenacitatea maximă la rupere este așadar obținută cu o combinație optimă dintre rezistență și ductilitate, nici rezistența mare (de exemplu sticla) și nici ductilitatea excepțională în parte nu oferă o absorbție mare a energiei la rupere.

$$\text{energie} / \text{volum} = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma d\varepsilon$$

Mecanismele ruperii și dezvoltării fisurilor la metale (E. J. Hearn, 1997)

O fisură poate fi solicitată în trei moduri diferite în interiorul unui solid (David Broek, 1984) (figura 3.12):

- modul I – modul deschidere – apar tensiuni normale. Suprafețele fisurii se deplasează perpendicular pe planul fisurii
- modul II – modul alunecare – apare forfecarea în plan. Suprafețele fisurii se deplasează în planul fisurii și perpendicular pe muchia principală
- modul III - modul rupere – apare forfecarea în afara planului. Suprafețele fisurii se deplasează în planul fisurii și paralel cu muchia principală.

Suprapunerea celor trei moduri descrie cazul general de fisurare.

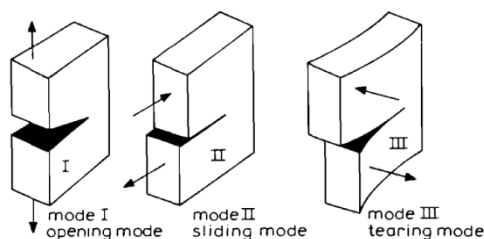


Fig.3.12 Moduri de solicitare a fisurilor într-un solid (David Broek, 1984)

Criteriul energiei (T.L. Anderson, 1995)

Pentru o fisură cu lungimea $2a$ într-o placă infinită supusă unei tensiuni de întindere îndepărtate (figura 14) rata eliberării energiei este:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E}$$

în care: E modulul lui Young
 σ tensiunea aplicată departe
 a jumătate din lungimea fisurii

La rupere $G=G_C$ și ecuația de mai sus descrie combinația critică de tensiune și dimensiune a fisurii pentru cedare:

$$G_C = \frac{\pi \sigma_f^2 a_c}{E}$$

Abordarea bazată pe intensitatea tensiunii

Dacă se presupune că materialul cedează local la o combinație critică de tensiune și deformație, atunci rezultă că ruperea trebuie să apară la o intensitate critică a tensiunii K_{Ic} .

Pentru o placă, factorul de intensitate a tensiunii este dat de relația:

$$G = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Cedarea apare atunci când $K_I=K_{Ic}$. În acest caz K_I este forța motrice pentru rupere și K_{Ic} este o măsură a rezistenței materialelor.

3.4 Metode de calcul al stărilor de solicitare

În practica proiectării navelor sunt utilizate în general trei metode pentru calculul stărilor de solicitare în elementele structurilor:

a) calculul conform normelor din societățile de clasificare – se determină tensiunile și deformațiile în elementele de structură calculând pe baza unor formule solicitările locale și globale care produc și se verifică la oboseală anumite detalii structurale

b) calculul combinat – se determină tensiunile din sarcinile locale cu ajutorul FEM, iar tensiunile din sarcinile globale și verificarea la oboseală se calculează conform regulilor societăților de clasificare. Această metodă se poate aplica în cazul modelelor de element finit care se extind pe o zonă limitată din navă, de exemplu pe lungimea unui tanc/magazii de marfă.

c) calculul direct – se determină tensiunile atât din sarcinile locale cât și din sarcinile globale cu ajutorul FEM, iar apoi se face verificarea la oboseală conform regulilor. Această metodă se aplică în cazul în care modelele de element finit se extind pe toată lungimea navei (global) sau pe cel puțin trei lungimi de tancuri/magazii.

Metodologie de abordare (Philippe Rigo, 2003)

În etapa proiectului inițial se execută activități de proiectare înainte de primirea comenzii. Această etapă este foarte scurtă și reprezintă baza tehnică a contractului.

Sunt întâlnite trei tipuri de analize preliminare:

- 1) metode principale – cu ajutorul unor reprezentări foarte simplificate ale geometriei
- 2) metode bazate pe geometrii bi-dimensionale - cu ajutorul a una sau mai multe secțiuni 2D ale navei
- 3) modele tri-dimensionale cu un nivel mai grosier de discretizare – aceste modele se folosesc atunci când este nevoie de un răspuns mai detaliat. Ideea este de a include suprafețele principale și eșantionajul actual într-un model 3D care se poate obține într-o săptămână sau două. Această abordare este dedicată conceptelor noi de nave pentru care nu există experiență.

În etapa de proiect de execuție cea mai des utilizată metodă de analiză structurală este Metoda Elementului Finit (FEM). Această metodă este foarte utilă și poate fi aplicată unei game variate de analize: rezistența globală și locală, analiza globală și locală la vibrații, rezistența ultimă, tensiuni detaliate pentru estimarea oboselii locale, estimarea ciclurilor de viață la oboseală, analiza diverselor neliniarități, studiul la coliziune și eșuare.

Dintre programele de calcul cu element finit sunt amintite:

- ANSYS – Ansys Inc.
- Femap – Siemens PLM Software
- Abaqus – Dassault Systemes
- CosmosWorks – SolidWorks

CAPITOLUL 4 PRINCIPII ÎN UTILIZAREA SIMULĂRII NUMERICE

4.1 Metoda elementului finit (FEM)

Procedura de calcul FEM conform normelor societăților de clasificare

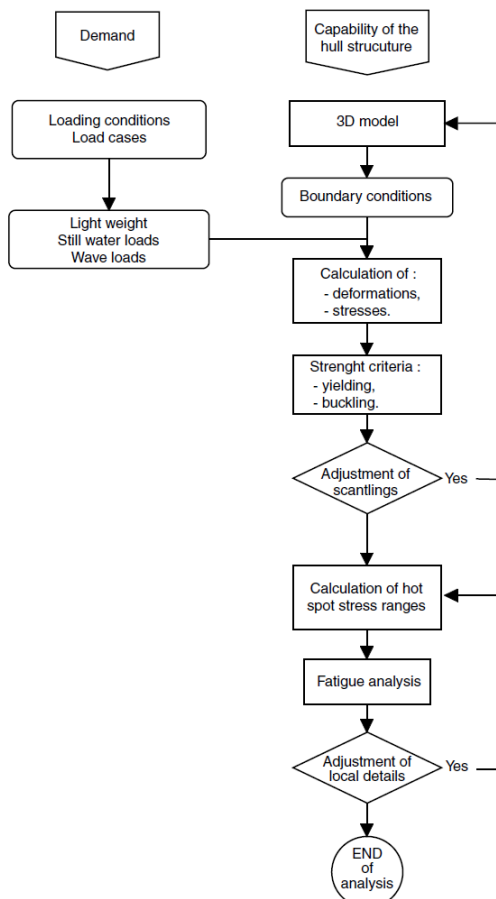


Fig.4.1 Aplicarea analizei FEM bazată pe modele tridimensionale (BV Rules, 2016)

4.2 Aspecte conform BV Rules, 2016 privind aplicarea metodei elementului finit

Calculul cu element finit al structurilor navale trebuie să respecte o serie de cerințe impuse de regulile societăților de clasificare, care se referă în general la analiza cu elemente de tip membrană sau placă.

Grosimi nete – toate elementele se vor modela cu grosimile nete (fără adaosuri de coroziune, etc.), în consecință rezistența și rigiditatea vor fi reproduse în concordanță cu aceste grosimi.

Extinderea modelului pe lungime va ține cont de următoarele:

- tensiunile din grinda navă în zona analizată sunt luate în considerare în mod corespunzător
- rezultatele în zonele analizate nu sunt influențate de condițiile la limită

În cazul simetriei structurii față de planul diametral modelul structurii poate fi realizat doar pe jumătate din lățimea navei.

Discretizarea modelului

a) discretizare grosieră (coarse mesh)

b) discretizare standard (standard mesh)

c) discretizare fină (fine mesh) pentru analiza detaliilor structurale:

Condiții la limită

Modele care se extind pe cel puțin trei lungimi de tancuri/magazii

Tabel 4.1 Condiții de simetrie și anti-simetrie în planul diametral (BV Rules, 2016)

Conditii la limita	DEPLASARI pe directia		
	X	Y	Z
Simetrie	liber	fix	liber
Anti-simetrie	fix	liber	fix

Conditii la limita	ROTIRI in jurul axelor		
	X	Y	Z
Simetrie	fix	liber	fix
Anti-simetrie	liber	fix	liber

Atunci când structura corpului este modelată pe jumătate din lățimea navei, în planul diametral se vor aplica condiții la limită de simetrie sau anti-simetrie așa cum este specificat în tabelul 4.1, în funcție de încărcările aplicate modelului (simetrice sau anti-simetrice).

Se vor prevedea suporturi verticale la nodurile poziționate la conexiunea pereților transversali cu pereții longitudinali, dacă există, sau cu bordajele.

Modele care se extind pe toată lungimea navei

Tabel 4.3 Condiții la limită pentru a preveni mișcarea de rigid a modelului (BV Rules, 2016)

Conditii la limita	DEPLASARI pe directia		
	X	Y	Z
Un nod la extremitatea prova a navei	liber	fix	fix
Un nod pe invelisul din babord la extremitatea pupa	fix	liber	fix
Un nod pe invelisul din tribord la extremitatea pupa	liber	fix	fix

Conditii la limita	ROTIRI in jurul axelor		
	X	Y	Z
Un nod la extremitatea prova a navei	liber	liber	liber
Un nod pe invelisul din babord la extremitatea pupa	liber	liber	liber
Un nod pe invelisul din tribord la extremitatea pupa	liber	liber	liber

Atunci când structura corpului este modelată pe jumătate din lățimea navei, în planul diametral se vor aplica condiții la limită de simetrie sau anti-simetrie așa cum este specificat în tabelul 4.1 în funcție de încărcările aplicate modelului (simetrice sau anti-simetrice).

Aplicarea încărcărilor pentru modeleÎncărcări locale

- încărcări în apă calmă, care includ:
 - presiunea apei de mare
 - încărcări interne pentru diferite tipuri de marfă și pentru balast
- încărcări din valuri, care includ:
 - presiunea valurilor
 - încărcări inerțiale pentru diferite tipuri de marfă și pentru balast

Încărcări din grinda navă

Pentru modelele care se extind pe cel puțin trei lungimi de tancuri/magazii:

- momente încovoietoare în apă calmă și din val
- moment de încovoiere orizontal din val
- forțe tăietoare în apă calmă și din val

Pentru modele care se extind pe o lungime de tanc/magazie se vor adăuga la tensiunile obținute din sarcinile locale și tensiunile normale și tangențiale induse de încărcările din grinda navă.

Masa navei goale – se va distribui pe toată lungimea modelului, astfel încât să se obțină distribuția longitudinală reală de momente încovoietoare în apă calmă.

Calculul tensiunilor

Se vor calcula următoarele componente ale tensiunilor în centroidul fiecărui element:

- tensiuni normale σ_1 și σ_2 în direcțiile axelor sistemului de coordonate ale elementului
- tensiunea tangențială τ_{12} în raport cu axele sistemului de coordonate ale elementului
- tensiunea echivalentă von Mises

4.3 Aspecte conform ADN, 2017 privind aplicarea metodei elementului finit

Condiții la limită

La ambele capete ale modelului se vor bloca cele trei grade de libertate de translație. Este suficientă considerarea unui model pe jumătate din lățimea navei, în această situație se vor bloca deplasările transversale în planul diametral.

Discretizare

Zonele structurii afectate în timpul coliziunii trebuie să fie discretizate suficient de fin, în timp ce celelalte zone pot fi modelate mai grosier. Gradul de finețe al discretizării trebuie să fie potrivit pentru o descriere adecvată a deformărilor locale cu îndoire și pentru determinarea realistă a ruperii elementelor. Calculul de inițiere a ruperii trebuie să se bazeze pe criteriile de rupere potrivite pentru tipul de elemente folosite. Raportul dintre latura mai lungă și cea mai scurtă trebuie să nu depășească valoarea de 3. Raportul dintre lungimea elementului și grosimea elementului trebuie să fie mai mare decât 5.

Proprietăți de material

Datorită comportamentului extrem al materialului și structurii în timpul coliziunii, având efecte neliniare atât de geometrie cât și de material, trebuie folosită caracteristica reală tensiune-deformată:

$$\sigma = C * \varepsilon^n$$

în care: $n = \ln(1 + A_g)$

$$C = R_m \left(\frac{e}{n}\right)^n$$

A_g alungirea maximă raportată la tensiunea de rupere la întindere R_m

e constanta de logaritm natural

Criteriul de rupere

Ruperea unui element în analiza FE este definită de valoarea de cedare a alungirii. Dacă valoarea calculată a deformației specifice, cum ar fi alungirea plastică efectivă, alungirea principală sau, pentru elemente de tip shell, alungirea în direcția grosimii elementului, depășește valoarea de cedare definită, elementul trebuie șters din model și energia de deformație în acest element nu se va mai modifica în următorii pași de calcul.

CAPITOLUL 5

TESTE EXPERIMENTALE ȘI SIMULĂRI NUMERICE PE MODELE

5.1 Formularea problemei

S-au realizat o serie de teste experimentale cu scopul de a valida metoda utilizată la simularea numerică a comportării structurilor de dublu înveliș în domeniul deformațiilor plastice. Astfel în acest capitol se prezintă o comparație între experimentele de deformare plastică cvasi-statică a trei tipuri de structuri și simularea numerică a acestor experimente, cu scopul de a aprecia în final nivelul de aproximare a metodei numerice utilizate.

Prin realizarea încercărilor s-au obținut o serie de informații experimentale utilizate la verificarea/calibrarea unor parametri ai metodei FEM, precum:

- nivelul de discretizare a structurii raportat la grosimea elementelor
- tipul de contact între corpul de lovire (bulbul) și corpul lovit (bordajul exterior)
- condiții la limită
- criteriile de comparație: deformații plastice și energie absorbită.

5.2 Pregătirea experimentelor

5.2.1 Proiectarea și realizarea modelelor

Pentru realizarea diferitelor modele s-a folosit tablă din oțel laminată la rece (LBR) având grosimea de 1,5 mm. În vederea testării prin apăsarea cvasi-statică cu bulbul sferic s-au realizat 3 modele cu dimensiunile 450 mm x 450 mm:

- modelul 1 - panou simplu din oțel fără osatură, grosime de 1,5 mm (figura 5.3)
- modelul 2 - panou din oțel cu osatură, grosime tablă și osatură 1,5 mm și înălțime osatură de 15 mm (figura 5.4)
- modelul 3 - panou sandwich realizat din oțel-polistiren XPS-oțel, grosimii de 1,5 mm x 20 mm x 1,5 mm (figura 5.5).

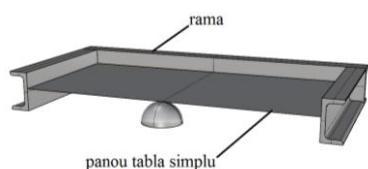


Fig.5.3– Model1

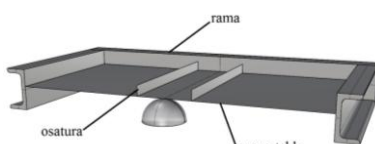


Fig.5.4– Model2

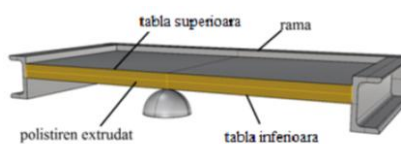


Fig.5.5– Model3

Fixarea panourilor de tablă de ramă s-a realizat prin sudură continuă de colț pe tot conturul.

5.2.2 Determinarea caracteristicilor mecanice ale materialului din care s-au realizat modelele.

Pentru a determina caracteristica de material au fost supuse testului de tracțiune 3 epruvete. Încercările de tracțiune a epruvetelor s-au realizat pe mașina de încercat la tracțiune din incinta Laboratorului de cercetări materiale avansate, al Facultății de Inginerie din Universitatea Dunărea de Jos din Galați (figura 5.8).



Fig.5.8 – Proba de tracțiune

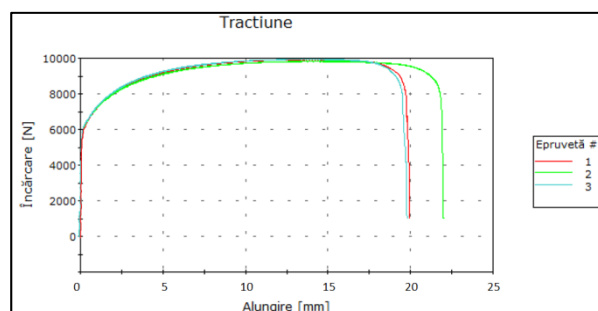


Fig.5.9 – Diagrama forță-alungire epruvetelor

În diagrama din figura 5.9 sunt reprezentate curbele forță de tracțiune-alungire pentru cele 3 epruvete încercate.

Pe baza valorilor determinate în urma încercărilor de tracțiune a epruvetelor s-a putut stabili caracteristica bilinară a materialului folosită la simularea numerică a experimentelor cu modele, având următoarele caracteristici (ANSYS Release 17 January 2016 – Engineering Data User's Guide):

- modulul de elasticitate longitudinal $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa
- limita de curgere a materialului $\sigma_c = 200$ MPa
- limita de rupere a materialului $\sigma_r = 335$ MPa
- alungirea la rupere $\epsilon_r = 0,182$
- modul tangent 745 MPa

5.2.3 Proiectarea și realizarea standului de încercări

În figura 5.11 este prezentat desenul de ansamblu al standului, având componentele:

- cadru de susținere – dimensiuni de gabarit 1400mmx720mmx540mm realizat din profil UNP80
- mecanism de realizare a mișcării de translație cu șurub – șurub M24x3

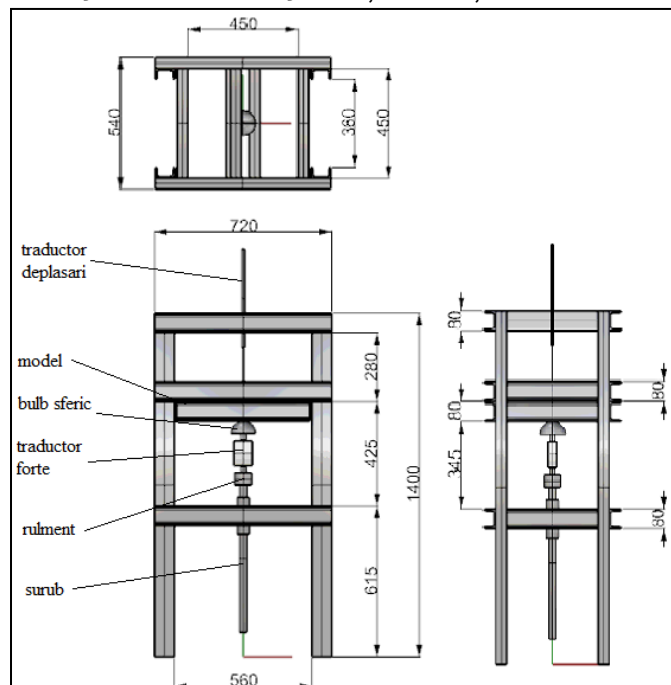


Fig.5.11 – Desen de ansamblu – stand de încercări

- rulment pentru eliminarea rotirii subansamblului traductor forțe+bulb sferic
- traductor de forță tip PCL500 , forța maximă măsurată 5 kN, precizia de măsurare $\pm 0.5\%$
- traductor de deplasări tip „inductive displacement transducer” HBM WA/300, deplasare maximă măsurată 300 mm, toleranță dată 0.5%
- bulb sferic diametru $\phi 60$ mm.

Modul de funcționare a standului constă în deplasarea bulbului sferic pe direcție verticală, perpendicular pe planul panoului de tablă (modelul), măsurându-se la intervale prestabilite forța ce acționează asupra modelului și deformată corespunzătoare în punctul de aplicare a forței.

Verificarea rigidității standului

Pentru a verifica ce influență are rigiditatea standului asupra preciziei de măsurare a deformatelor modelelor, s-a făcut o analiză FEM a standului în care s-au considerat: aplicarea încărcărilor pe direcție verticală (forța de reacțiune din axul șurubului și forța de reacțiune de pe conturul de așezare a ramei = 50 kN), blocarea deplasărilor în două dintre picioarele standului, discretizarea structurii în elemente patrulate având dimensiunea medie de 10 mm.

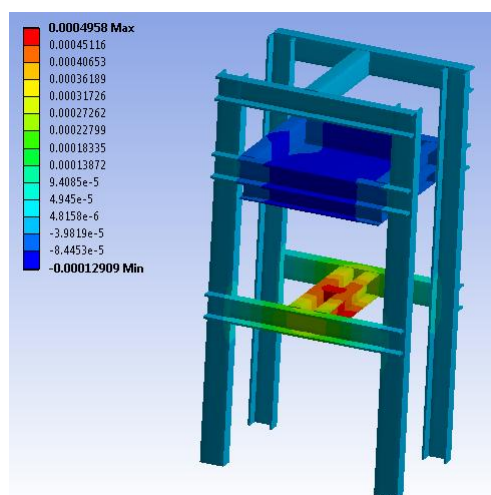


Fig.5.15 – Deplasări ale standului pe direcție verticală

În urma calculului a rezultat că deplasarea verticală maximă în mijlocul modelului (figura 5.15) este de 0,013 mm și deplasarea verticală maximă a punctului de sprijin al șurubului este de 0,5 mm.

Concluzie: În ceea ce privește deformata elastică de 0,5 mm a standului pe zona de sprijin a șurubului, întrucât măsurarea deformatei tablei inferioare a panoului sandwich s-a făcut pe baza deplasării șurubului, s-a aplicat o corecție a deformatei măsurate a tablei. Această corecție este direct proporțională cu forța aplicată și are valoarea maximă de 0,5 mm la forța maximă de 50 kN (vezi capitolul 5.3 – 5.3.3 Experiment 3 – panou sandwich oțel-polistiren XPS-oțel).

5.3 Realizarea experimentelor

5.3.1 Experiment 1 – panou simplu din oțel

Practic s-a măsurat forța verticală de contact între bulb și model la fiecare 2,5 mm deplasare verticală a bulbului.

Tabel 5.1 – Forțe și deplasări măsurate – model 1

Deplasare [mm]	Forța [kN]
0.000	0.000
1.216	0.151
2.830	0.436
5.007	0.999
7.507	1.956
10.010	3.240
12.680	4.861
15.030	6.420
17.500	8.222
20.000	10.150
22.510	12.220
25.090	14.290
27.510	16.310
30.060	18.620
32.550	21.000
35.000	23.200
37.520	25.680
40.040	28.110
42.500	30.720
45.030	33.220
42.510	12.890
40.040	1.408
39.540	0.000

Tabelul 5.2 – Energie internă - model 1

Deplasare [mm]	Forța [kN]	Energie [J]
0.000	0.000	0.000
1.216	0.151	0.092
2.830	0.436	0.566
5.007	0.999	2.128
7.507	1.956	5.822
10.010	3.240	12.324
12.680	4.861	23.139
15.030	6.420	36.394
17.500	8.222	54.477
20.000	10.150	77.442
22.510	12.220	105.517
25.090	14.290	139.715
27.510	16.310	176.741
30.060	18.620	221.276
32.550	21.000	270.603
35.000	23.200	324.748
37.520	25.680	386.337
40.040	28.110	454.112
42.500	30.720	526.473
45.030	33.220	607.357

Datele înregistrate în timpul încercării sunt prezentate numeric în tabelul 5.1 și grafic în diagrama din figura 5.19 de mai jos.

Integrând forța funcție de deplasare se obține curba energiei interne de deformație a modelului funcție de deplasare (tabelul 5.2 și figura 5.20).

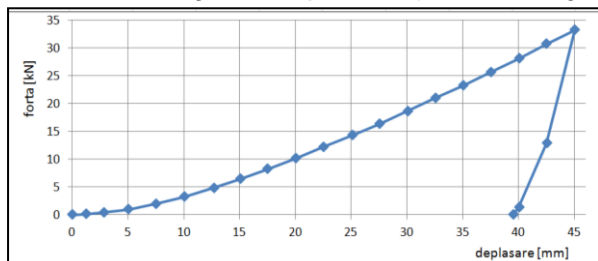


Fig.5.19–Forță – deplasare – model 1

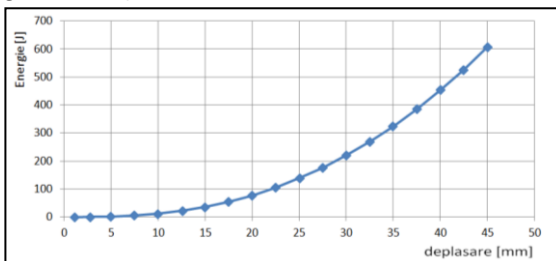


Fig.5.20–Energie internă – deplasare – model 1

Forma deformată remanentă a modelului 1 este prezentată în figura 5.21 de mai jos, imaginea din stânga arătând partea de jos a panoului de tablă, cea pe care a acționat bulbul sferic, iar imaginea din dreapta arătând partea de sus a panoului.

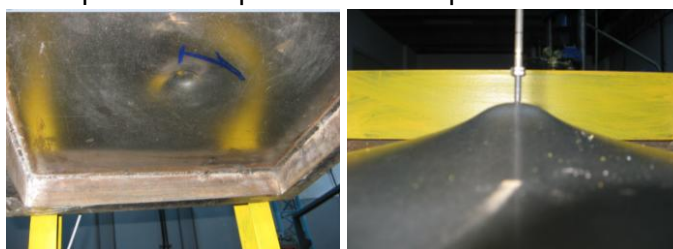


Fig.5.21 – Deformată remanentă – model 1

5.3.2 Experiment 2 – panou din oțel cu osatură

Practic s-a măsurat forța verticală de contact între bulb și model la fiecare 3 mm deplasare verticală a bulbului.

Tabel 5.3 – Forțe și deplasări măsurate – model 2

Deplasare [mm]	Forța [kN]
0.000	0.000
2.841	1.615
5.768	3.410
8.666	5.440
11.570	7.600
14.460	9.817
17.370	12.230
20.270	14.700
23.190	17.330
26.080	20.010
28.990	22.700
31.890	25.500
34.810	28.500
37.680	31.370
40.530	34.600
43.460	37.700
46.350	40.640
49.220	44.000
52.140	47.000
53.970	50.950
49.550	0.000

Tabelul 5.4 – Energie internă – model 2

Deplasare [mm]	Forța [kN]	Energie [J]
0.000	0.000	0.000
2.841	1.615	2.294
5.768	3.410	9.648
8.666	5.440	22.472
11.570	7.600	41.406
14.460	9.817	66.573
17.370	12.230	98.652
20.270	14.700	137.700
23.190	17.330	184.464
26.080	20.010	238.420
28.990	22.700	300.564
31.890	25.500	370.454
34.810	28.500	449.294
37.680	31.370	535.207
40.530	34.600	629.214
43.460	37.700	735.134
46.350	40.640	848.335
49.220	44.000	969.793
52.140	47.000	1102.653
53.970	50.950	1192.278

Datele înregistrate în timpul încercării sunt prezentate numeric în tabelul 5.3 și grafic în diagrama din figura 5.23 de mai jos.

Integrând forța funcție de deplasare se obține curba energiei interne de deformație a modelului funcție de deplasare (tabelul 5.4 și figura 5.24).

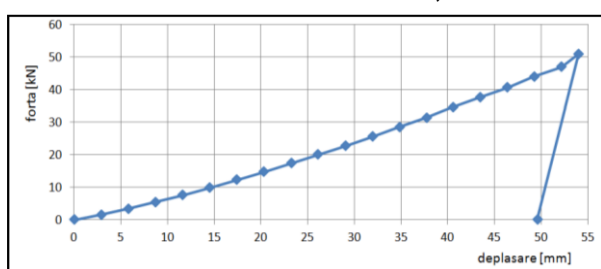


Fig.5.23–Forță – deplasare – model 2

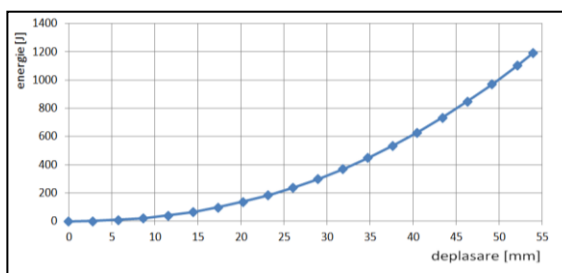


Fig.5.24–Energie internă – deplasare – model 2

Forma deformată remanentă a modelului 2 este prezentată în figura 5.25 de mai jos, imaginea din stânga arătând partea de jos a panoului de tablă, cea pe care a acționat bulbul sferic, iar imaginea din dreapta și cea de jos arătând partea de sus a panoului.



Fig.5.25 – Deformată remanentă – model 2

5.3.3 Experiment 3 – panou sandwich oțel-polistiren XPS-oțel

Practic s-a măsurat forța verticală de contact între bulb și model la fiecare 3 mm deplasare verticală a bulbului.

Tabel 5.5–Forțe și deplasări–model 3

Deplasare inferioara masurata	Corectie def. int.	Deplasare inferioara corectata	Deplasare superioara	Forța	Distanța între tabla inferioara și superioara
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[mm]
0	0.000	0.000	0	0	23.000
3.000	0.011	2.989	0.178	0.779	20.189
6.000	0.036	5.964	1.645	2.678	18.681
9.000	0.061	8.939	2.881	4.515	16.942
12.000	0.091	11.909	3.920	6.700	15.011
15.000	0.123	14.877	4.860	9.060	12.983
18.000	0.158	17.842	5.740	11.640	10.898
21.000	0.196	20.804	6.560	14.400	8.756
24.000	0.235	23.765	7.370	17.300	6.605
27.000	0.275	26.725	8.130	20.250	4.405
30.000	0.320	29.680	9.100	23.520	2.420
33.000	0.370	32.630	10.880	27.200	1.250
36.000	0.425	35.575	13.530	31.230	0.955
39.000	0.482	38.518	16.340	35.460	0.822
42.000	0.540	41.460	19.110	39.700	0.650
45.000	0.597	44.403	21.910	43.870	0.507
42.000	0.283	41.717	19.650	20.800	0.933
39.000	0.070	38.930	17.440	5.120	1.510
37.251	0.000	37.251	16.600	0.000	2.349

Tabelul 5.6–Energie internă–model3

Deplasare inferioara corectata	Forța	Energie
[mm]	[kN]	[J]
0.000	0	0.000
2.989	0.779	1.164
5.964	2.678	13.152
8.939	4.515	46.794
11.909	6.700	116.633
14.877	9.060	237.972
17.842	11.640	428.394
20.804	14.400	706.644
23.765	17.300	1092.165
26.725	20.250	1603.369
29.680	23.520	2266.689
32.630	27.200	3114.108
35.575	31.230	4179.134
38.518	35.460	5492.803
41.460	39.700	7080.363
44.403	43.870	8963.778

În cazul panoului sandwich s-au măsurat două deplasări:

- deplasarea verticală a tablei aflată în contact cu bulbul – cu ajutorul filetelui șurubului (pasul filetelui 3 mm)
- deplasarea verticală a tablei exterioare, cea care nu a fost în contact direct cu bulbul – cu ajutorul traductorului de deplasări.

Datele înregistrate în timpul încercării sunt prezentate numeric în tabelul 5.5 și grafic în diagrama din figura 5.27 de mai jos.

Integrând forța funcție de deplasare se obține curba energiei interne de deformare a modelului funcție de deplasare (tabelul 5.6 și figura 5.28).

Întrucât măsurarea deformatiei tablei inferioare a panoului sandwich s-a făcut pe baza deplasării șurubului, s-a aplicat o corecție a deplasării tablei inferioare, direct proporțională cu forța aplicată și având valoarea maximă de $0,68 = 0,5 + 0,18$ mm la forța maximă 50 kN, astfel:

- 0,5 mm deformată maximă a standului la forța maximă de 50 kN (a se vedea 5.2.3)
- 0,18 mm deformată maximă a șurubului la forța maximă de 50 kN.

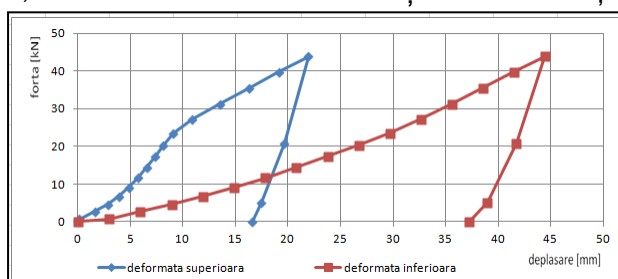


Fig.5.27–Fortă – deplasare – model 3

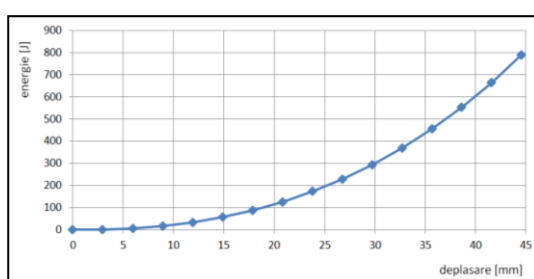


Fig.5.28–Energie internă–deplasare–model 3

Deformata remanentă a modelului 3 este prezentată în figura 5.29 de mai jos, imaginea din stânga arătând partea de jos a panoului sandwich, cea pe care a acționat bulbul sferic, iar imaginea din dreapta arătând partea de sus a panoului.



Fig.5.29 – Deformată remanentă – model 3

5.4 Aspecte privind simulările numerice

Calcululele prezentate au fost realizate cu programul ANSYS, modulul Static structural.

5.4.1 Idealizare material

Materialul are definită o lege de întărire biliniară izotropă având modulul lui Young $E=2.1 \cdot 10^5$ MPa , tensiunea de curgere $R_Y=200$ MPa și modulul tangent de 745 MPa (capitolul 5.2.2).

5.4.2 Mod de aplicare a solicitării

Încărcarea aplicată modelului constă în deplasarea impusă bulbului sferic de aproximativ 45 mm, în direcția perpendiculară pe suprafața învelișului.

Timpul de analiză conține doi pași:

- pasul 1: deplasarea bulbului cu 45 mm
- pasul 2: retragerea bulbului în poziția inițială.

5.4.3 Tipuri de element finit

S-a realizat o comparație între analiza cu elemente de tip „shell” versus analiza cu elemente de tip „solid” pentru modelul 1 – panou simplu din oțel, considerând următoarele aspecte:

- valoarea maximă a deformatei remanente
- valoarea maximă a tensiunilor echivalente
- valoarea maximă a forței în bulbul sferic
- timp total de calcul.

În urma calculelor au rezultat următoarele valori prezentate numeric în tabelul 5.7 de mai jos și grafic în figurile 5.31 și 5.32 de mai jos:

Tabelul 5.7 – Valori comparative elemente „shell” versus elemente „solid”

Criteriu de comparatie	Elemente „shell”	Elemente „solid”	Diferenta [%]
deformata remanentă maxima [mm]	42,84	42,56	0,6
tensiune echivalentă maximă [MPa]	262,32	219,97	16,1
forța maximă în bulbul sferic [kN]	39,393	33,630	14.6
timp total de calcul [secunde]	217	841	287

Diferențele de deformată dintre rezultatele obținute în urma analizei cu elemente „shell” și elemente „solid” sunt neglijabile, iar timpul de calcul în cazul elementelor „solid” este de aproape 3 ori mai mare.

Concluzie: Pentru studiul structurilor neconvenționale ale navelor cu dublu înveliș se va utiliza discretizarea cu elemente de tip „shell”.

5.4.4 Condiții la limită

Condițiile la limită testate pe panoul simplu fără osatură, au fost următoarele:

- încăstrarea pe contur a panoului de tablă
- articulare pe contur a panoului de tablă
- modelarea cu elemente de volum a panoului și a cordonului de sudură și încăstrarea pe latura verticală a cordonului
- modelarea panoului cu tot cu ramă și rezemarea simplă pe verticală a ramei – figura 5.35

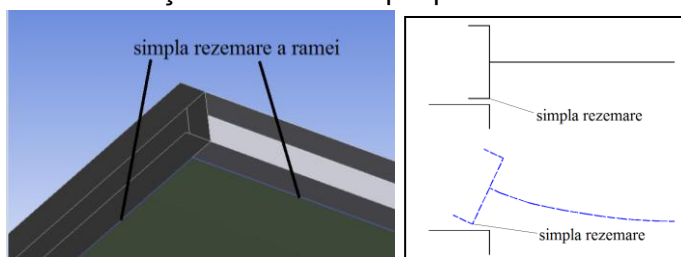


Fig.5.35 – Condiție la limita d)

Tabel 5.8 – rezultate pentru diferite condiții la limită

Nr.	Situație	Deformată plastică [mm]	Eroare deformată[%]	Forță de contact [kN]	Eroare forță[%]	Timp de calcul [s]
0	Experiment	39.54		33.22		-
1	a	42.836	8.3	39.393	18.6	217
2	b	42.602	7.7	39.235	18.1	251
3	c	42.560	7.6	33.630	1.2	841
4	d	40.634	2.8	25.900	-22.0	342

Analizând rezultatele obținute pentru cele patru tipuri de condiții la limită prezentate în tabelul de mai sus se pot rezuma următoarele idei:

- valoarea maximă a erorii pentru deformată plastică și forța de contact s-a obținut pentru condiția la limită a) încăstrare pe contur a panoului
- valoarea minimă a erorii pentru deformată plastică și forța de contact s-a obținut pentru condiția la limită d) simpla rezemare a ramei
- timpul minim de calcul s-a obținut pentru condiția la limita a) și timpul maxim de calcul pentru condiția c).

Concluzie: Pentru studiul structurilor neconvenționale ale navelor cu dublu înveliș se va alege o extindere a modelului suficient de mare astfel încât influența condițiilor la limită sa fie minimă.

5.4.5 Test de convergență

S-a realizat un test de convergență pe 16 discretizări diferite:

- e) 8 modele cu rețea uniformă și discretizări diferite de la 2mm la 35 mm (figura 5.36 și 5.37)
- f) 8 modele cu rețea neuniformă și discretizări diferite de la 2mm la 35 mm (figura 5.38 și 5.39).

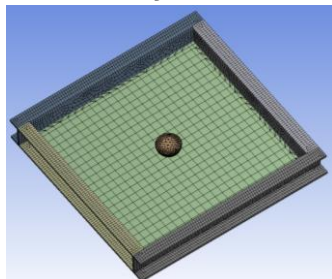


Fig.5.37 – Discretizare uniformă 20mm

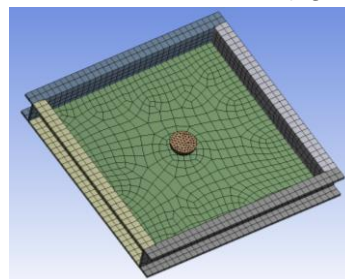


Fig.5.39 –Discretizare neuniformă 20mm

Tabel 5.9 – discretizare rețea uniformă

Nr.	Mărime element [mm]	Deformată plastică [mm]	Eroare deformată[%]	Forță de contact[kN]	Eroare forță[%]	Timp de calcul [s]
0	Experiment	39.54		33.22		-
1	2	40.667	2.9	25.669	-22.7	2385
2	5	40.634	2.8	25.900	-22.0	342
3	10	40.538	2.5	26.916	-19.0	113
4	15	42.857	8.4	27.989	-15.7	110
5	20	40.691	2.9	29.202	-12.1	97
6	25	43.328	9.6	29.448	-11.4	73
7	30	41.081	3.9	33.265	0.1	98
8	35	41.243	4.3	35.008	5.4	79

Tabel 5.10 – discretizare rețea neuniformă

Nr.	Mărime element[mm]	Deformată plastică[mm]	Eroare deformată[%]	Forță de contact[kN]	Eroare forță[%]	Timp de calcul[s]
0	experiment	39.54		33.22		-
1	2	40.703	2.9	26.455	-20.4	176
2	5	41.114	4.0	26.692	-19.7	97
3	10	41.108	4.0	27.069	-18.5	58
4	15	42.107	6.5	27.209	-18.1	67
5	20	41.772	5.6	27.952	-15.9	55
6	25	41.986	6.2	29.500	-11.2	48
7	30	42.754	8.1	28.670	-13.7	60
8	35	41.902	6.0	31.481	-5.2	71

Din rezultatele prezentate în tabelul 5.9 și tabelul 5.10 reiese că pentru:

- g) rețeaua uniformă discretizarea de 10mm asigură o eroare de 2,5% pentru deformată, 19,0% pentru forța de contact și un timp de calcul de 113 s.
- h) rețea neuniformă discretizarea de 10mm asigură o eroare de 4,0% pentru deformată, 18,5% pentru forța de contact și un timp de calcul de 58 s.

Diferențele pentru forța de contact sunt mai mari, lucru ce se datorează în parte și aproximării caracteristicii de material printr-o curbă biliniară.

Concluzie: Pentru studiul structurilor neconvenționale ale navelor cu dublu înveliș se va utiliza o discretizare cu rețea neuniformă, pentru reducerea timpului de calcul, respectând valoarea raportului lungime element/grosime element= 7 în zona de interes.

5.5 Analiza comparativă experiment – simulare numerică

5.5.1 Exemplu 1 – panou simplu din oțel

În figurile 5.44 și 5.45 de mai jos sunt prezentate comparativ diagramele forță-deplasare și energie internă-deplasare pentru simularea numerică și experiment.

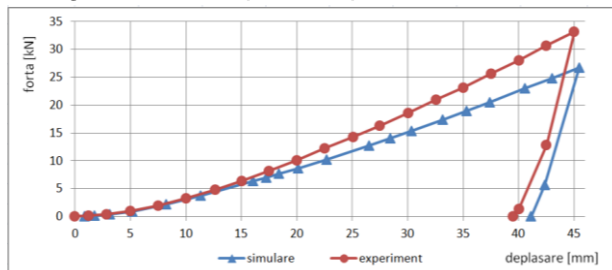


Fig.5.44–Forță – deplasare model 1

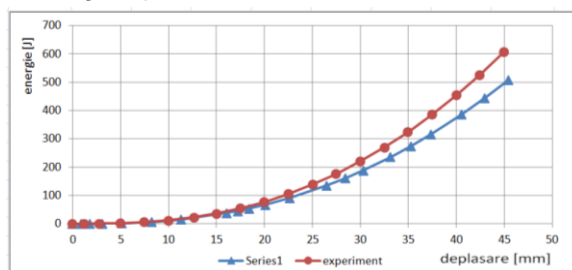


Fig.5.45–Energie internă – deplasare model 1

5.5.2 Exemplu 2 – panou din oțel cu osatură

În figurile 5.51 și 5.52 de mai jos sunt prezentate comparativ diagramele forță-deplasare și energie internă-deplasare pentru simularea numerică și experiment.

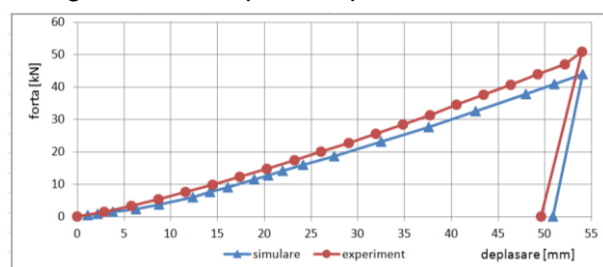


Fig.5.51–Forță – deplasare model 2

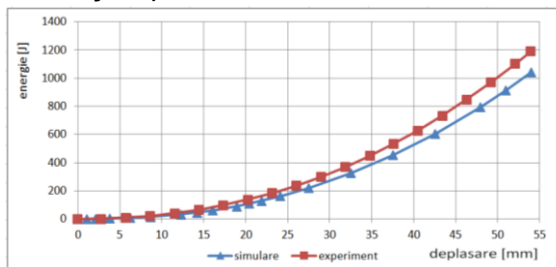


Fig.5.52–Energie internă – deplasare model 2

5.5.3 Exemplu 3 – panou sandwich oțel-polistiren XPS-oțel

În figurile 5.57 și 5.58 de mai jos sunt prezentate comparativ diagramele forță-deplasare și energie internă-deplasare pentru simularea numerică și experiment.

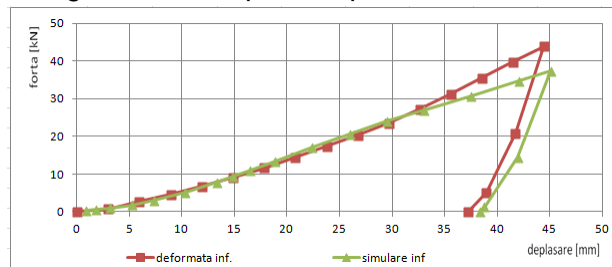


Fig.5.57–Forță – deplasare model 3

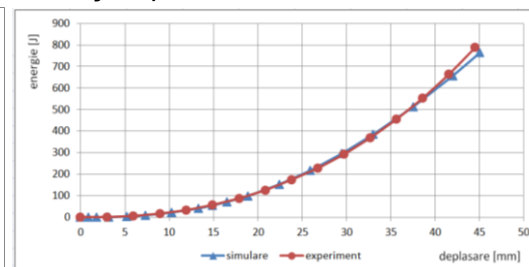


Fig.5.58–Energie Internă – deplasare model 3

5.6 Concluzii

Rezultatele analizei comparative sunt prezentate în tabelul 5.11 de mai jos:

Tabel 5.11 – centralizator comparativ experimente-simulări

Nr.	Experiment	Diferențe [%]		
		Deformată plastică	Forță de contact maximă	Energie internă
1	Experiment 1	4.0	-18.5	16.43
2	Experiment 2	2.70	13.79	12.51
3	Experiment 3	2.86	14.93	3.13

Se observă că diferența maximă pentru deformată plastică între experimente și simulările numerice este de maxim 4%.

Ținând cont de marja de siguranță folosită în domeniul structurilor navale, în general cuprinsă între 5% și 10%, se poate concluziona că nivelul de eroare între experimentele realizate și simulările numerice aferente se încadrează în marja de eroare acceptată.

CAPITOLUL 6

ANALIZĂ STRUCTURĂ CONVENȚIONALĂ DE DUBLU BORD

6.1 Descriere structură convențională de dublu bord

Structura convențională analizată, în vederea comparației cu structurile neconvenționale, este o magazie din zona centrală a unei nave fluviiale prevăzută cu dublu bord și dublu fund.

Nava considerată este o navă cisternă („tanker”) autopropulsată cu tancuri structurale, pentru transportul pe căile navigabile interioare a mărfurilor periculoase precum: benzină, produse petroliere cu >10% benzen, clorbenzen, heptani, octani etc.

Nava are următoarele caracteristici principale:

Lungime maximă	99,90 m
Lățime de construcție	9,45 m
Înălțime de construcție	4,75 m
Pescaj de eșantionaj	3,20 m
C_B	0,9
Distanță intercostală	625 mm
Distanță cadre întarite	1875 mm

Structura convențională analizată este prevăzută cu un dublu bord de 0,8m și un dublu fund înclinat, având 0,7m în planul diametral și 0,9 m în dreptul dublu bordului, asigurând practic pentru zona de marfă un raport volum tancuri de marfă / volum total = 70%.

Structura considerată pentru analiză este formată dintr-un tanc central, amplasat între coastele C93-C111, jumătate de tanc spre pupa, de la C85 la C93, și jumătate de tanc spre prova de la C111 la C119 (figura 6.1).

Structurile punții, fundului și dublu fundului, bordajului și dublu bordajului sunt în sistem longitudinal, în rest sunt prevăzute coaste simple pe bordaj la fiecare 625 mm și cadre întărite pe toată structura la fiecare 1875 mm.

În figurile 6.2 - 6.6 sunt prezentate o vedere de ansamblu a structurii precum și fiecare tip de coastă din componența structurii.

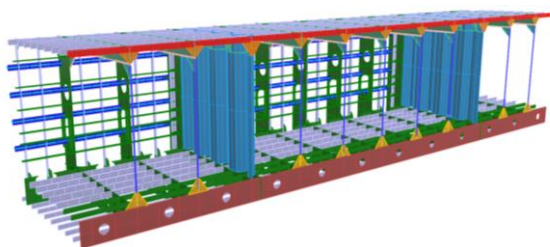


Fig.6.3 –Model 3D – fără înveliș fund, dublu fund, bordaj și dublu bordaj

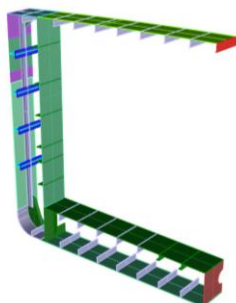


Fig.6.4–Coastă simplă

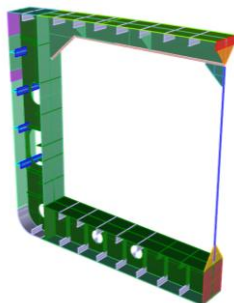


Fig.6.5–Coastă întărită

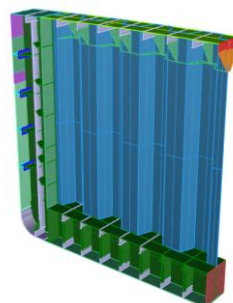


Fig.6.6–Coastă etanșă

În calcul s-au folosit grosimile nete ale elementelor structurii.

Pentru a verifica rezistența structurii în domeniul elastic s-a făcut o analiză cu element finit a zonei centrale în capitolul 6.2 de mai jos.

Pentru a compara capacitatea de absorbție a energiei de impact, în cazul unei coliziuni, a structurii convenționale față de diverse structuri neconvenționale, s-a efectuat o analiză cu element finit în domeniul deformațiilor plastice cu o solicitare cvasi-statică în capitolul 6.3 și cu o solicitare dinamică în capitolul 6.4 a structurii convenționale.

6.2 Analiză structură convențională în domeniul elastic

Structura considerată pentru analiza în domeniul elastic este reprezentată de zona tancurilor centrale cuprinsă între coastele C85-C119, având componența descrisă în Tabelul 6.1. Analiza s-a făcut în ANSYS cu ajutorul modulului Static Structural.

6.2.1 Discretizare model

Modelul a fost discretizat cu elemente patrulatere de tip „quad4”, având dimensiunea medie de 50 mm.

În figura 6.7 este reprezentată discretizarea elementelor structurii.

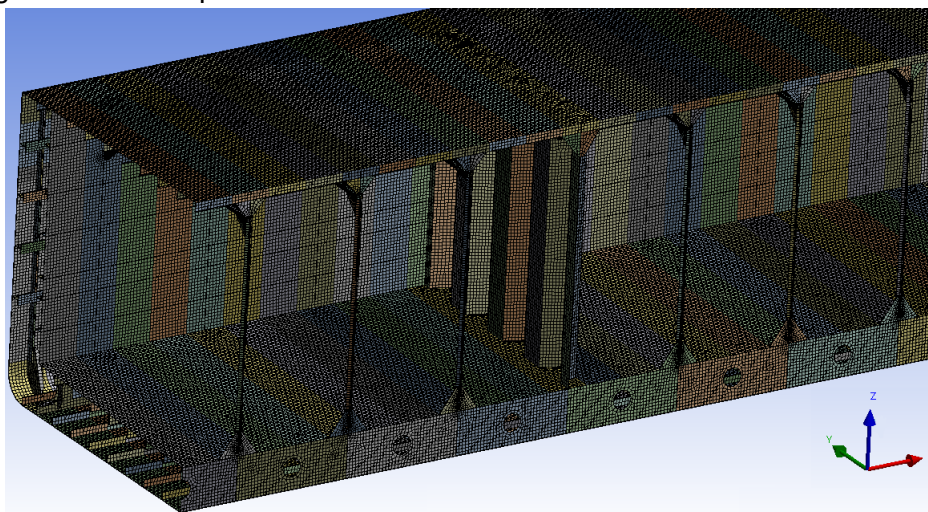


Fig.6.7 – Discretizare structură convențională

6.2.2 Material

Materialul folosit pentru analiză este oțel S235, cu valoarea admisibilă a tensiunilor echivalente:

$$\sigma_{VM} = \frac{0.98 \cdot R_Y}{\gamma_R} = \frac{0.98 \cdot 235}{1.05} = 219.3 MPa$$

6.2.3 Condiții la limită

Conform BV Rules, 2014 s-au folosit următoarele condiții la limită:

- condiții de simetrie la extremitățile pupa și prova ale modelului
- s-au blocat deplasările pe verticală în nodurile de îmbinare între pereții transversali C93 și C111 cu dublu bordajul situat la $Y = 3,925$ m față de planul diametral
- condiții de simetrie în planul diametral

6.2.4 Încărcări aplicate modelului

6.2.4.1 Încărcări locale-S-au analizat următoarele cazuri de încărcare:

A) Plină încărcare cu următoarele sarcini:

- greutatea proprie a structurii
- presiunea exterioară a apei pe înveliș în cele două situații:
 - A1 - pescaj maxim 3,2 m plus creastă de val 0,6 m = 3,8 m înălțime suprafață liberă
 - A2 - pescaj maxim 3,2 m minus gol de val -0,6 m = 2,6 m înălțime suprafață liberă
- presiunea internă din încărcătura lichidă pe dublu bord și dublu fund - s-a considerat nivelul maxim de umplere al tancurilor de marfă 4,7 m față de linia de bază și o densitate de 0,89 t/m³ a încărcăturii lichide.

B) Balast cu următoarele sarcini:

- greutatea proprie a structurii
- presiunea exterioară a apei pe înveliș în cele două situații:
 - B1 - pescaj minim 2,0 m plus creastă de val 0,6 m = 2,6 m înălțime suprafață liberă
 - B2 - pescaj minim 2,0 m minus gol de val -0,6 m = 1,4 m înălțime suprafață liberă
- presiunea internă din balast pe bord și dublu bord, fund și dublu fund - s-a considerat nivelul maxim de umplere al tancurilor de balast 4,7m față de linia de bază și o densitate de 1,0 t/m³ a apei de balast (figura 6.11).

6.2.4.2 Tensiuni din încovoierea longitudinală a grinzii navă

Tensiunile din încovoierea longitudinală s-au determinat astfel:

$$\sigma_{HGL} = \frac{MAX(|M_H|, |M_S|) + |M_{AD}|}{Z} \cdot 10^3 \text{ [MPa]}$$

M_H, M_S = moment de încovoiere admisibil în arc și contraarc în apă calmă

M_{AD} = moment de încovoiere adițional în funcție de zona de navigație

Z = modul net de rezistență al secțiunii navei [cm³]

6.2.5 Rezultate calcul

Calculul tensiunii totale din elementele structurii de dublu bordaj s-a realizat prin însumarea valorilor maxime a tensiunilor din încărcările locale σ_{FEM} (6.2.4.1) și din rezistența grinzii navă σ_{HGL} (6.2.4.2): $\sigma_{TOTAL} = |\sigma_{FEM}| + |\sigma_{HGL}|$.

În tabelul 6.4 de mai jos s-a considerat valoarea maximă a tensiunii σ_{FEM} rezultată din cele patru cazuri de încărcare analizate (A1, A2, B1 și B2) pentru fiecare element de structură.

Tabel 6.4 – nivel tensiuni în structura convențională de dublu bord

Nr.	Denumire element	z	Z	σ_{HGL}	σ_{FEM}	σ_{total}
		[m]	[cm ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
2	Tablă lacrimară	4.79	659714	54	12	66
3	Centură	4.758	667970	53	12	65
4	Tablă bordaj 1	4.2	854427	41	11	52
5	Tablă bordaj 2	3.57	1247626	28	38	66
6	Tablă bordaj 3	3.3	1554140	23	83	106
7	Tablă gurnă	0	776011	45	48	93
9	Tablă dublu bord	4.79	659714	54	79	133
12	Diafragmă bordaj etanșă				24	24
14	Diafragmă bordaj				112	112
17	Coastă simplă bordaj HP160x7				45	45
18	Brachet gurnă				37	37
19	Longitudinale punte HP140x7	4.79	659714	54	17	71
21	Stringheri bordaj inimă 160x10	3.97	965517	37	39	76
22	Stringheri bordaj platbandă	4.04	928766	38	37	75
23	Longitudinale fund HP 120x7	0	776011	45	37	82
24	Longitudinale dublu bord HP	4.2	854427	41	117	158
29	Curent lateral Y3925	0	776011	45	36	81
31	Nervuri diafragmă bordaj 100x8				69	69
40	Bracheți diafragmă bordaj etanșă				85	85

Concluzie: Din tabelul 6.4 de mai sus reiese că valorile tensiunilor sunt sub limita valorii admisibile a tensiunii $\sigma_{VM} = 219,3$ MPa.

În figurile 6.12...6.15 sunt reprezentate distribuția de tensiuni și deformată structurii sub acțiunea sarcinilor locale.

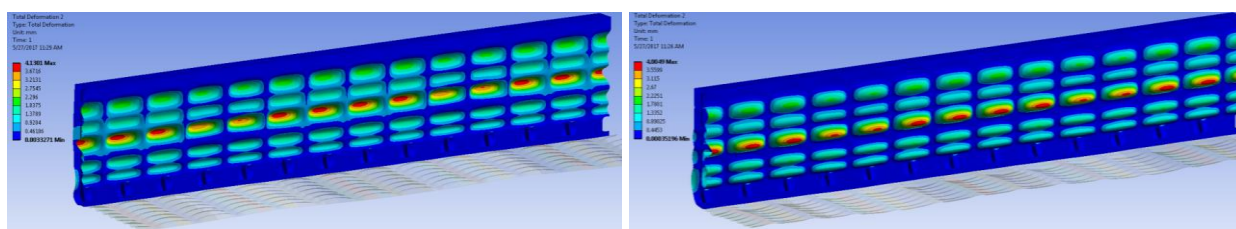


Fig.6.14 – Deformată dublu bord convențional - caz de încărcare A2 și B1

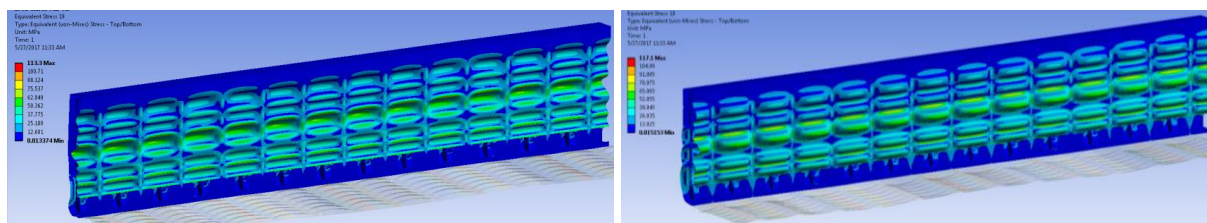


Fig.6.15 – Distribuție tensiuni în dublu bord convențional - caz de încărcare A2 și B1

6.3 Analiză structură convențională în domeniul plastic cu solicitare cvasi-statică

Pentru a evalua comportamentul structurii convenționale de dublu bordaj în situația unei coliziuni, s-a făcut o analiză preliminară cu element finit în domeniul deformațiilor plastice, considerând o solicitare cvasi-statică cu un model prova de barjă fluvială, conform ADN, 2017 (figura 6.16).

Calculul s-a realizat în modulul ANSYS-Static Structural.

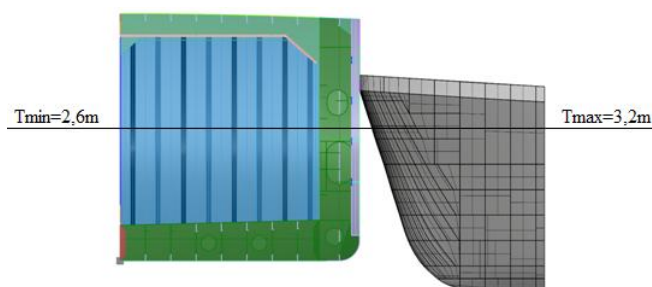


Fig.6.16–Poziție relativă

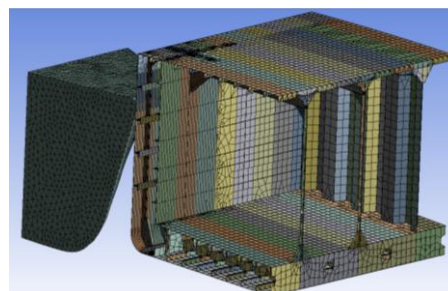


Fig.6.17–Discretizare structură

Pentru analiza în domeniul plastic s-a folosit condiția de simetrie față de planul diametral al modelului prova, astfel că s-a modelat doar jumătate din prova navei care lovește și din zona centrală a structurii convenționale.

6.3.1 Discretizare model

Modelul a fost discretizat cu elemente patrulatere de tip „quad4”, având dimensiunea medie de 25 mm în zona de contact între prova și bordaj și 200 mm pentru restul structurii. În figura 6.17 este reprezentată discretizarea elementelor structurii.

6.3.2 Material

Pentru analiza în domeniul deformațiilor plastice s-a folosit ca material pentru structura convențională oțel S235, având următoarele caracteristici conform DNV RP-C208, 2013: modul lui Young $E = 2,1 \times 10^5$ MPa, tensiunea de curgere $R_Y = 236.2$ MPa, modul tangent 1105 MPa, coeficientul lui Poisson 0,3.

6.3.3 Condiții la limită

Conform BV Rules, 2014 și ADN, 2017 s-au folosit următoarele condiții la limită:

- s-au blocat toate cele trei deplasări pe capătul prova al modelului structurii
- condiții de simetrie în plan transversal la C103+312.5
- condiții de simetrie în planul diametral

S-a considerat frecarea dintre prova și bordaj, utilizând un coeficient de frecare constant $\mu=0,3$.

6.3.4 Încărcarea modelului

Pentru analiza structurii convenționale în domeniul deformațiilor plastice s-a impus o deplasare cvasi-statică transversală a modelului prova, perpendicular pe planul diametral al modelului structurii.

Timpul de analiză conține doi pași:

- pasul 1: deplasarea maximă transversală de 0,79 m
- pasul 2: retragerea probei în poziția inițială.

S-a considerat deplasarea transversală maximă de 0,79 m conform ADN, 2017.

6.3.5 Rezultate calcul

În figura 6.19 este reprezentată deformată remanentă a modelului structurii convenționale.

În figura 6.20 este reprezentată distribuția tensiunilor în structura convențională la final.

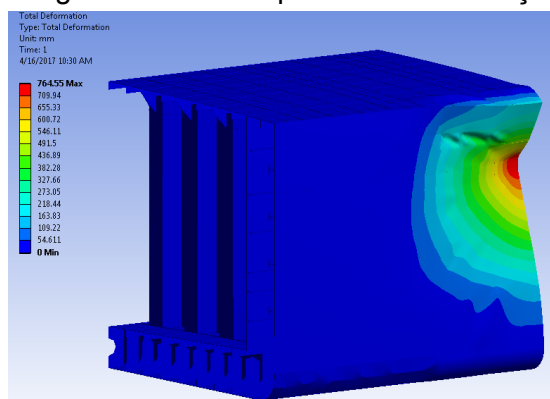


Fig.6.19–Deformată remanentă

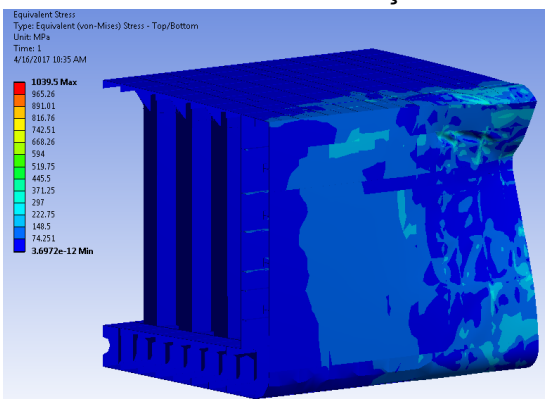


Fig.6.20–Distribuție tensiuni solicitare cvasi-statică

În figura 6.21 este reprezentată diagrama forță de contact, exprimată în kN, în funcție de deplasarea modelului prova, exprimată în m.

În figura 6.22 este reprezentată diagrama energie internă, exprimată în J, în funcție de deplasarea modelului prova, exprimată în m.

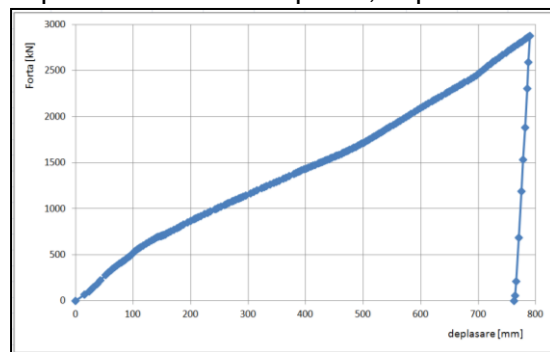


Fig.6.21–Forță de contact-deplasare

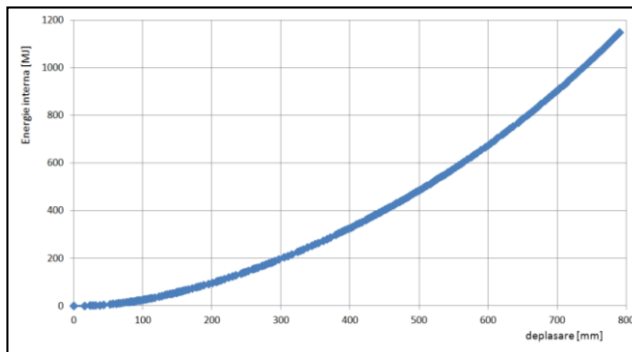


Fig.6.22–Energie internă-deplasare

6.4 Analiză structură convențională în domeniul plastic cu solicitare dinamică

Pentru a aprecia comportamentul structurii de dublu bordaj în situația unei coliziuni ținând cont și de cedarea materialului, s-a făcut o analiză cu element finit a structurii convenționale în domeniul deformațiilor plastice în modul ANSYS-Explicit Dynamics (ANSYS Release 17 January 2016 – ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide).

Remarcă: Conform cerințelor ADN, 2017 criteriul de apreciere a rezistenței structurii unei nave la impactul cu o altă navă este dat de energia absorbită de structură până la momentul ruperii pereților tancurilor de marfă.

6.4.1 Discretizare model

Pentru un timp de calcul rezonabil, s-a utilizat o discretizare în elemente patrulate de tip „quad4”, având dimensiunea medie de 50 mm în zona de contact între prova și bordaj și 200

mm pentru restul structurii.

6.4.2 Material

Pentru analiza în domeniul deformațiilor plastice cu solicitare dinamică s-a utilizat același material ca în 6.3.2.

Suplimentar, s-a utilizat drept criteriu de cedare a materialului deformația specifică $\epsilon_k = 0,171$, determinată conform (Peschmann, 2000).

6.4.3 Condiții la limită

S-au aplicat condițiile la limită din capitolul 6.3.3.

S-a considerat frecarea dintre prova și bordaj, utilizând un coeficient dinamic de frecare conform (ADN, 2017).

6.4.4 Încărcarea modelului

Pentru analiza structurii în domeniul plastic-dinamic s-a impus o energie cinetică inițială a modelului prova definită prin:

- viteza inițială 4 m/s pe direcție transversală, direcție Oy
- masă model prova 750 t

6.4.5 Rezultate calcul

6.4.5.1 Deformată globală

În figurile 6.24 și 6.25 este reprezentată deformată remanentă a structurii convenționale la scară 1:1.

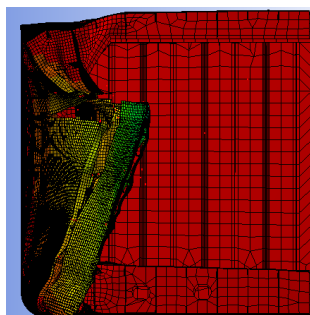


Fig.6.24 – Deformată remanentă-transversal

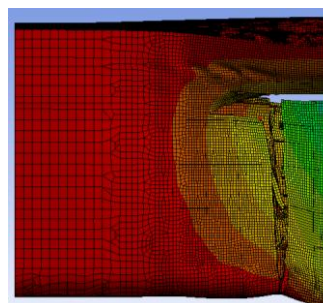


Fig.6.25–Deformată remanentă-longitudinal

6.4.5.2 Cedarea dublu bordajului

În timpul calculului, programul înregistrează gradul de deteriorare al elementelor de discretizare a structurii în funcție de timp, afișând rezultatele pe o scară de la 1 la 4 astfel: 1 – elastic, 2-plastic, 3-cedare parțială și 4-cedare finală conform criteriului introdus. Astfel, pe baza acestui rezultat se poate determina când și unde a apărut cedarea elementelor structurii.

În figura 6.26 de mai jos este prezentată în stânga starea la momentul $t = 0,43$ s în care au cedat primele elemente ale peretelui tancului și în dreapta situația la momentul $t = 1$ s la finalul impactului.

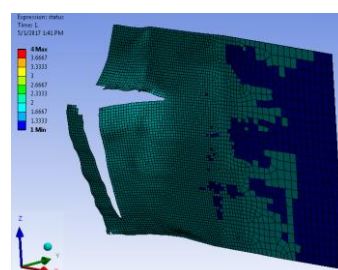
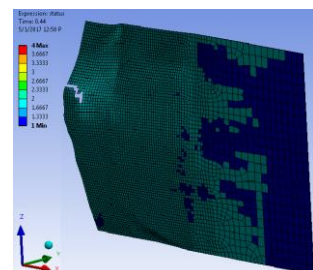


Fig.6.26 –Cedarea peretelui tancului - structură convențională

S-au identificat următoarele cauze ale ruperii bordajului interior:

- cedarea elementelor într-un plan orizontal corespunzător punții modelului prova și situat în imediata vecinătate a unei longitudinale de dublu bord, la momentul $t = 0,43$ s

- cedarea elementelor pe o direcție verticală datorată zonei de contact între coasta simplă de bordaj, profil HP 160 x 7, și tabla dublu bordajului, la momentul $t = 0,45$ s.

În figurile 6.27 și 6,28 este prezentată evoluția celor două rupturi, orizontală și verticală, într-o vedere din interiorul tancului asupra dublu bordajului, respectiv într-o vedere din exteriorul tancului asupra bordajului. Se observă zonele locale puternic tensionate care cedază la un pas de timp ulterior.

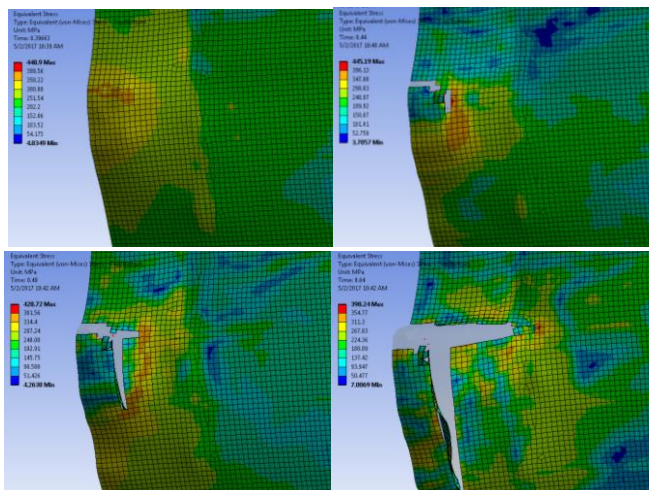


Fig.6.27 – Cedarea peretelui tancului – structură convențională

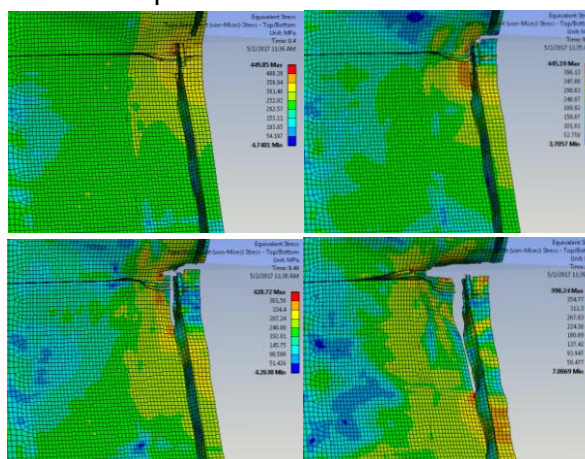


Fig.6.28 – Zonă de contact coastă bordaj cu înveliș dublu bordaj– structură convențională

6.4.5.3 Energia de deformare în elementele structurii

În figura 6.29 se observă că traversa punții, varanga din dublu fund și curentul lateral din dublu fund, aflat în prelungirea dublu bordajului, prezintă cele mai mici energii de deformare, ele având deci o contribuție minimă la absorbția de energie în cadrul fenomenului de impact.

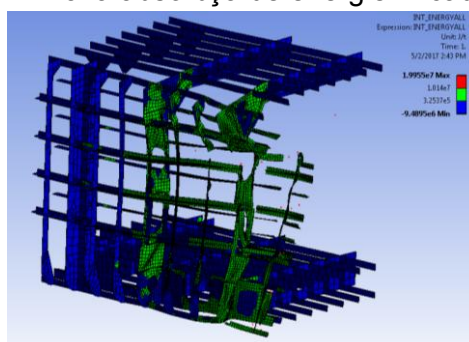


Fig.6.29 – Energia de deformare în elementele de osatură– structură convențională

6.4.5.4 Deformate locale

Analizând harta deformațiilor structurii s-a constatat apariția următoarelor tendințe de deformare a structurii convenționale în timpul impactului:

- îndoire punte și rotire ansamblu punte-bordaj și punte-dublu bordaj – figura 6.30

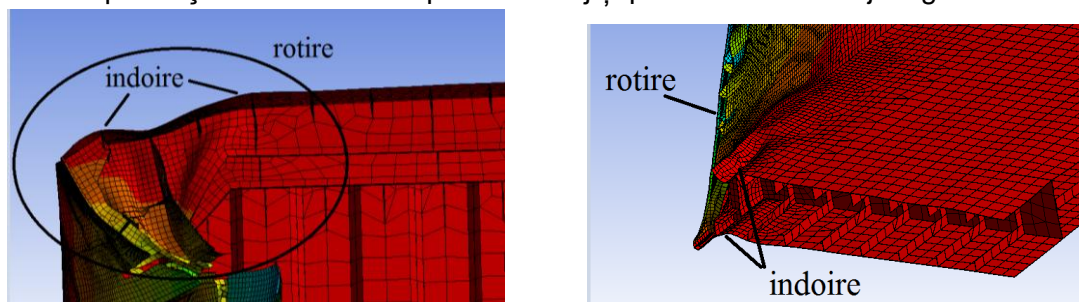


Fig.6.30–Îndoire punte și rotire punte-bordaj Fig.6.31–Îndoire fund și dublu fund și rotire bordaj

- îndoire fund și dublu fund și rotire structură de bordaj și dublu bordaj – figura 6.31
- îndoire și rupere diafragma bordaj și elemente de osatură bordaj exterior – figura 6.32

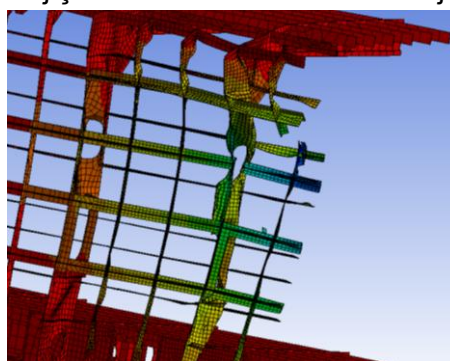


Fig.6.32 – Îndoire și rupere diafragmă și osatură bordaj

6.4.5.5 Energii și deplasări funcție de timp

În figura 6.33 este prezentată diagrama de energie cinetică [MJ] a modelului prova funcție de timp.

Se observă că energia cinetică a modelului prova de la începutul simulării $(m \cdot v^2)/2 = (750 \text{ t} \cdot (4 \text{ m/s})^2)/2 = 6 \text{ [MJ]}$, este transferată modelului structurii în două etape:

- prima etapă, în intervalul de timp 0 – 0,5 s, când gradientul de scădere a energiei este foarte mare
- a doua etapă, în intervalul 0,5 – 1 s, cu un gradient mai mic de scădere a energiei, când practic se consumă doar aproximativ 25% din energia totală.

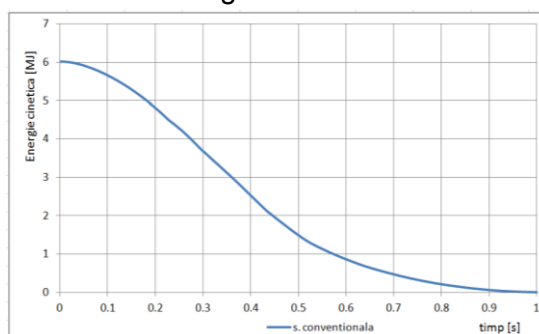


Fig.6.33 – Diagramă Energie cinetică – structura convențională

În figura 6.34 este prezentată diagrama de energie internă [MJ] a modelului de structură funcție de timp.

Și în cazul diagramei de energie internă se observă aceeași diferențiere în două etape: prima etapă (0 – 0,5 s) în care se dezvoltă cea mai mare parte a energiei de deformare și a doua etapă (0,5 – 1 s) când variația energiei în timp este mai lentă.

În figura 6.35 este prezentată diagrama de Deplasare a modelului prova [m] pe direcția Oy a modelului structurii funcție de timp.

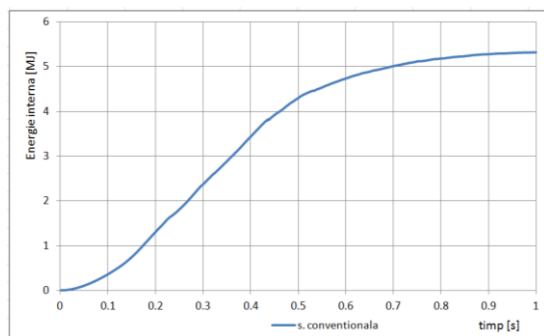


Fig.6.34–Energie internă

Se observă o decelerare puternică în prima fază (0 – 0,5 s) a impactului, corespunzătoare creșterii rapide a energiei de deformație, urmată de o frânare mai lentă a modelului prova în cea de-a doua fază.

Concluzii În tabelul 6.7 sunt prezentate valorile energiei interne totale absorbite de structură în timpul impactului, momentul de timp la care a survenit cedarea peretelui dublu bordajului, energia de deformație înregistrată până în momentul cedării peretelui tancului și deplasarea totală a modelului prova până la finalul impactului (momentul în care energia cinetică devine zero).

Tabel 6.7 – centralizator rezultate structură convențională

Structură	Energie internă totală [MJ]	Moment cedare dublu bordaj [s]	Energie internă la cedare dublu bordaj [MJ]	Deplasare maximă prova [m]
Structură conv.	5.318	0.44	3.830	-2.100

Analizând rezultatele obținute în cazul structurii convenționale s-au tras următoarele concluzii:

- este de evitat folosirea elementelor de osatură pe bordajul exterior care pot deveni concentratori de tensiune la contactul cu învelișul bordajului interior, conducând astfel la cedarea acestuia din urmă (a se vedea 6.4.5.2),
- este de evitat folosirea la bordajul interior a elementelor cu diferențe mari de rigidități în direcția OY, direcția de deformare impusă de modelul prova (a se vedea 6.4.5.2),
- ținând cont de energia de deformație se poate aprecia nivelul de participare al fiecărui element de structură în timpul impactului și se poate reproiecta structura convențională astfel încât să rezulte o reducere a greutateii structurii simultan cu o capacitate de absorbție a energiei de impact similară (a se vedea 6.4.5.3),
- analizând comportarea locală a elementelor de structură se pot identifica diverse soluții pentru a mări nivelul de energie total absorbit de structură în timpul impactului (6.4.5.4)
- corelând diagramele de energie cinetică/internă și deplasare funcție de timp cu hărțile de deformație se poate stabili eficiența diverselor soluții utilizate în cadrul structurilor neconvenționale (a se vedea 6.4.5.5).

Remarcă În continuare se vor investiga diverse tipuri de structuri neconvenționale pentru a obține un răspuns la problemele identificate la structura convențională, având drept scop final o energie de deformație cât mai mare până în momentul ruperii dublu bordajului cu o greutate cât mai redusă a structurii.

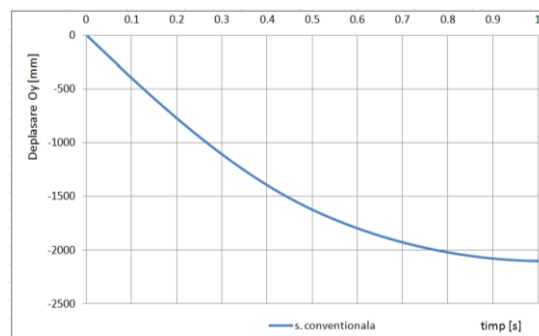


Fig.6.35–Deplasare prova

CAPITOLUL 7

INVESTIGAREA DE SOLUȚII PENTRU STRUCTURI NECONVENȚIONALE

Strategie

Analizând modul de deformare a structurii convenționale la impact, zonele în care apar concentratorii de tensiuni, modul de cedare a peretelui tancului s-au identificat următoarele soluții spre a fi investigate:

- utilizarea unor elemente de structură care să transmită energia din zonele puternic solicitate către cele mai puțin solicitate – **structura „K”** (TIP1)
- utilizarea unor elemente care să disipeze concentratorii de tensiuni care duc la cedarea materialului – **structura „SANDWICH”** (TIP2, TIP3, TIP4)
- întărirea structurii bordajului exterior – **structura „ICE”** (TIP5)
- utilizarea unui material mai ductil la învelișul bordajului interior – **structura „DUCTIL”** (TIP6)
- ușurarea elementelor de osatură care au o participare mică la energia de deformație – **structura „LIGHT”** (TIP7)
- întărirea bordajului interior – **structura „ARC”** (TIP8).

Pentru fiecare tip de soluție s-a analizat fezabilitatea și s-au identificat principalele aspecte legate de implementarea lor în construcțiile navale. Astfel, s-au avut în vedere:

- variația greutatei structurii propuse față de structura convențională
- accesibilitatea materialelor propuse pentru industria navală
- tehnologia de realizare a structurii
- cerința ADN 2017 legată de spațiile adiacente tancurilor de marfă care trebuie să poată fi inspectate și curățate, astfel practic spațiile de dublu bord și dublu fund trebuie prevăzute cu decupări de trecere de cel puțin $0,36\text{m}^2$ și cu o lățime minimă de 0,5 m.

Pentru a realiza analiza comparativă a structurilor neconvenționale investigate s-au considerat următoarele criterii de apreciere:

- performanțe până la finalul impactului
 - energia internă totală
 - distanța de penetrare totală
- performanțe până la momentul cedării peretelui tancului
 - energia internă parțială
 - distanța de penetrare parțială
- greutate structură
- raportul energie internă / greutate structură.

7.1 Structura neconvențională de dublu bord „K” - TIP1

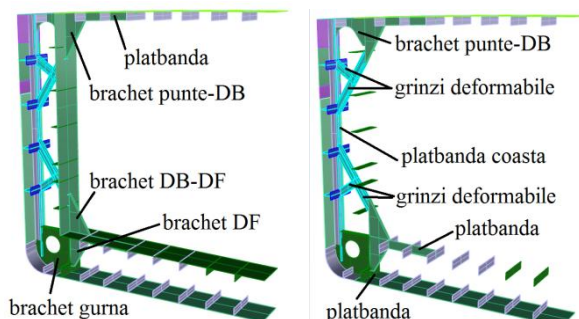
7.1.1 Descriere structură TIP1

Structura TIP1 constă în adăugarea la structura convențională a următoarelor elemente structurale la coasta simplă (figura 7.1.1):

- grinzi deformabile: grindă lungă profil cu secțiune „I” 115x8/100x8 mm și grindă scurtă secțiune „I” 125x8/100x8 mm,
- platbandă 100x8 la coasta simplă
- brachet între punte și dublu bordaj, în dublu bordaj 480x260x6,5 mm
- brachet între punte și dublu bordaj, în tanc marfă 800x425x6,5 mm cu flanșă 40x6,5 mm și

platbandă în continuarea braketului pentru rigidizarea învelișului punții 1000x140x6,5mm

- braket de gurnă 6,4 mm grosime cu flanșă 100x6,4 mm și platbandă în continuarea braketului pentru rigidizarea învelișului fundului 425x120x6,4mm
- braket dublu fund 680x425x6,5 mm cu flanșă 40x6,5 mm și platbandă în continuarea braketului pentru rigidizarea învelișului dublu fundului 1000x160x6,5mm
- braket dublu bord-dublu fund 710x425x6,5 mm cu flanșă și nervură intermediară 40x6,5 mm



7.1.3 Analiză structură TIP1 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

Tabel 7.1.1 – centralizator rezultate structură TIP1 - total

Structură	Energie internă totală	Diferență Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferență Deplasare maximă	Masă	Diferență masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401

Tabel 7.1.2 – centralizator rezultate structură TIP1 - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferență Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferență Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337

7.2 Structura neconvențională de dublu bord „SANDWICH” - TIP2

7.2.1 Descriere structură TIP2

Structura TIP2 constă în adăugarea la structura convențională a următoarelor elemente (figura 7.2.1):

- un strat de 160 mm grosime de polistiren pe învelișul bordajului exterior,
- un înveliș de oțel de 4mm aplicat peste polistirenul bordajului exterior, astfel încât a rezultat un înveliș al bordajului exterior realizat dintr-un sandwich oțel-polistiren-oțel
- un strat de 140 mm grosime de polistiren pe învelișul dublu bordajului,
- un înveliș de oțel de 4mm aplicat peste polistirenul bordajului interior, astfel încât a rezultat un înveliș al peretelui tancului realizat dintr-un panou sandwich oțel-polistiren-oțel.

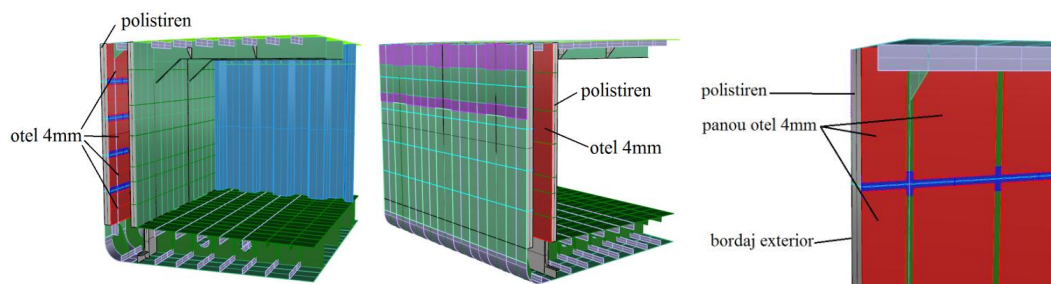


Fig.7.2.1 – Model 3D – structură TIP2

7.2.3 Analiză structură TIP2 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.2.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1 și structura TIP2, rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.2.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.2.1 – centralizator rezultate structură TIP2 - total

Structură	Energie internă totală	Diferență Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferență Deplasare maximă	Masă	Diferență masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360

Tabel 7.2.2 – centralizator rezultate structură TIP2 - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferență Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferență Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320

7.3 Structura neconvențională de dublu bord „SANDWICH” – TIP3

7.3.1 Descriere structură TIP3

Structura TIP3 constă în adăugarea la structura convențională a următoarelor elemente (figura 7.3.1):

- un strat de 140 mm grosime de polistiren pe învelișul dublu bordajului,
- un înveliș de oțel de 4mm aplicat peste polistirenul bordajului interior, astfel încât a rezultat un înveliș al peretelui tancului realizat dintr-un panou sandwich oțel-polistiren-oțel.

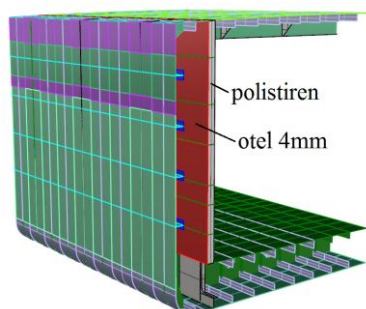


Fig.7.3.1 – Model 3D – structură TIP3

7.3.3 Analiză structură TIP3 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.3.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1, structura TIP2 și structura TIP3, rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.3.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.3.1 – centralizator rezultate structură TIP3 - total

Structură	Energie internă totală	Diferență Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferență Deplasare maximă	Masă	Diferență masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360
SANDWICH-TIP3	5.139	-3,4%	-1.781	-15,2%	12,73	7,15%	0,404

Tabel 7.3.2 – centralizator rezultate structură TIP3 - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferență Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferență Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320
SANDWICH-TIP3	0.477	4.265	11,4%	-1.538	9,1%	0,335

7.4 Structura neconvențională de dublu bord „SANDWICH” – TIP4

7.4.1 Descriere structură TIP4

Structura TIP4 constă în adăugarea la structura convențională a următoarelor elemente (figura 7.4.1):

- un strat de 160 mm grosime de polistiren pe învelișul bordajului exterior,
- un înveliș de Epoxy S-Glass UD de 10mm aplicat peste polistirenul bordajului exterior, astfel încât a rezultat un înveliș al bordajului exterior realizat dintr-un sandwich oțel-polistiren-GRP
- un strat de 140 mm grosime de polistiren pe învelișul dublu bordajului,
- un înveliș de Epoxy S-Glass UD de 10mm aplicat peste polistirenul bordajului interior, astfel încât a rezultat un înveliș al peretelui tancului realizat dintr-un sandwich oțel-polistiren-GRP.

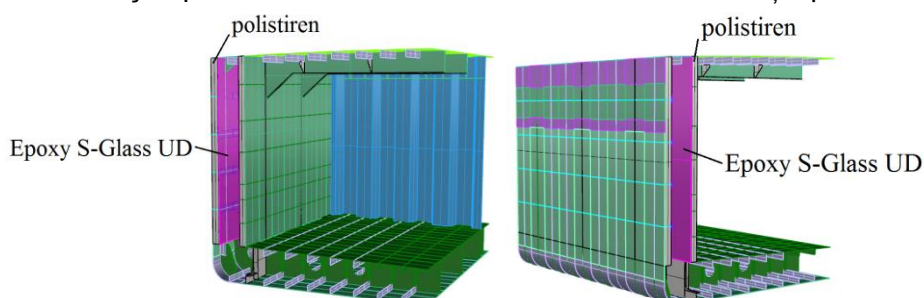


Fig.7.4.1 – Model 3D – structură TIP4

7.4.3 Analiză structură TIP4 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.4.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1, structura TIP2, structura TIP3 și structura TIP4 rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.4.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.4.1 – centralizator rezultate structura TIP4 - total

Structură	Energie internă totală	Diferența Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferența Deplasare maximă	Masă	Diferența masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360
SANDWICH-TIP3	5.139	-3,4%	-1.781	-15,2%	12,73	7,15%	0,404
SANDWICH-TIP4	4.563	-14,2%	-1.630	-22,4%	13,10	10,3%	0,348

Tabel 7.4.2 – centralizator rezultate structura TIP4 - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferența Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferența Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320
SANDWICH-TIP3	0.477	4.265	11,4%	-1.538	9,1%	0,335
SANDWICH-TIP4	0.480	4.012	4,8%	-1.476	4,7%	0,306

7.5 Structura neconvențională de dublu bord „ICE” – TIP5

7.5.1 Descriere structură TIP5

Structura TIP5 constă în adăugarea următoarelor elemente structurale (figura 7.5.1):

- flanșă 100 x 8 mm la fiecare coastă simplă
- coaste intermediare profil „T” 160 x 5,6/100 x 8 mm
- brachet între punte și dublu bordaj, în dublu bordaj 480x260x6,5 mm
- brachet între punte și dublu bordaj, în tanc marfă 800x425x6,5 mm cu flanșă 40x6,5 mm și platbandă în continuarea brachetului pentru rigidizarea învelișului punții 1000x140x6,5mm
- brachet de gurnă 6,4 mm grosime cu flanșă 100x6,4 mm și platbandă în continuarea brachetului pentru rigidizarea învelișului fundului 1325x120x6,4mm
- platbandă pentru rigidizarea învelișului dublu fundului 1000x160x6,5mm

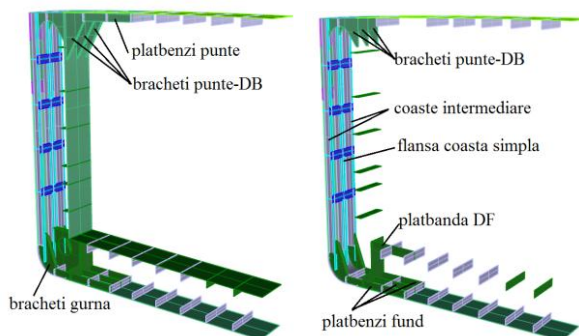


Fig.7.5.1 – Model 3D – structură TIP5

7.5.3 Analiză structură TIP5 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.5.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1, structura TIP2, structura TIP3, structura TIP4 și structura TIP5 rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.5.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.5.1 – centralizator rezultate structura TIP5 - total

Structură	Energie internă totală	Diferență Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferență Deplasare maximă	Masă	Diferență masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360
SANDWICH-TIP3	5.139	-3,4%	-1.781	-15,2%	12,73	7,15%	0,404
SANDWICH-TIP4	4.563	-14,2%	-1.630	-22,4%	13,10	10,3%	0,348
ICE-TIP5	4.964	-8,5%	-1.819	-13,4%	13,71	15,4%	0,362

Tabel 7.5.2 – centralizator rezultate structura TIP5 - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferență Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferență Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320
SANDWICH-TIP3	0.477	4.265	11,4%	-1.538	9,1%	0,335
SANDWICH-TIP4	0.480	4.012	4,8%	-1.476	4,7%	0,306
ICE-TIP5	0.340	3.061	-20,1%	-1.188	-15,7%	0,223

7.6 Structura neconvențională de dublu bord „DUCTIL” – TIP6

7.6.1 Descriere structură TIP6

Structura TIP6 constă în înlocuirea învelișului bordajului interior cu un oțel mai ductil, spre exemplu stainless steel 304L, 316L, 317 LN cu alungirea la rupere 45% (figura 7.6.1).

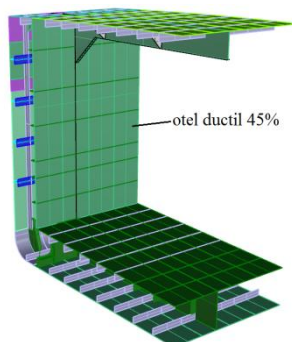


Fig.7.6.1 – Model 3D – structura TIP6

7.6.3 Analiză structură TIP6 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.6.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1,

structura TIP2, structura TIP3, structura TIP4, structura TIP5 și structura TIP6 rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.6.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.6.1 – centralizator rezultate structura TIP6 - total

Structură	Energie internă totală	Diferență Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferență Deplasare maximă	Masă	Diferență masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360
SANDWICH-TIP3	5.139	-3,4%	-1.781	-15,2%	12,73	7,15%	0,404
SANDWICH-TIP4	4.563	-14,2%	-1.630	-22,4%	13,10	10,3%	0,348
ICE-TIP5	4.964	-8,5%	-1.819	-13,4%	13,71	15,4%	0,362
DUCTIL-TIP6	5.806	9,2%	-1.872	-10,8%	11,88	0,0%	0,489

Tabel 7.6.2 – centralizator rezultate structura TIP6 - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferență Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferență Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320
SANDWICH-TIP3	0.477	4.265	11,4%	-1.538	9,1%	0,335
SANDWICH-TIP4	0.480	4.012	4,8%	-1.476	4,7%	0,306
ICE-TIP5	0.340	3.061	-20,1%	-1.188	-15,7%	0,223
DUCTIL-TIP6	-	5.806	51,6%	-	-	0.489

7.7 Structura neconvențională de dublu bord „LIGHT” – TIP7

7.7.1 Descriere structură TIP7

Structura TIP7 constă în ușurarea elementelor structurii convenționale (figura 7.7.1):

- traverse punte – decupări 150 x 300 mm
- varange – decupări ϕ 300 mm
- curent lateral – decupări 380 x 500 mm

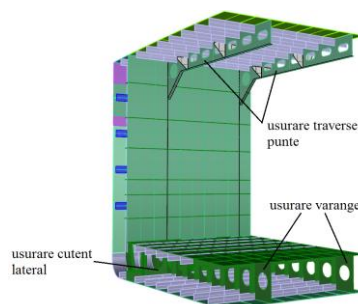


Fig.7.7.1 – Model 3D – structura TIP7

7.7.3 Analiză structură TIP7 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.7.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1, structura TIP2, structura TIP3, structura TIP4, structura TIP5, structura TIP6 și structura TIP7 rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.7.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.7.1 – centralizator rezultate structura TIP7 - total

Structură	Energie [MJ]	Diferenta %	Deplasare [m]	Diferență %	Masă [t]	Diferență %	Energie [MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360
SANDWICH-TIP3	5.139	-3,4%	-1.781	-15,2%	12,73	7,15%	0,404
SANDWICH-TIP4	4.563	-14,2%	-1.630	-22,4%	13,10	10,3%	0,348
ICE-TIP5	4.964	-8,5%	-1.819	-13,4%	13,71	15,4%	0,362
DUCTIL-TIP6	5.806	9,2%	-1.872	-10,8%	11,88	0,0%	0,489
LIGHT-TIP7	5.369	1,0%	-2.080	-1,0%	11,50	-3,2%	0,467

Tabel 7.7.2 – centralizator rezultate structura TIP7 - rupere

Structură	Moment [s]	Energie [MJ]	Diferență %	Deplasare [m]	Diferență %	Energie [MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320
SANDWICH-TIP3	0.477	4.265	11,4%	-1.538	9,1%	0,335
SANDWICH-TIP4	0.480	4.012	4,8%	-1.476	4,7%	0,306
ICE-TIP5	0.340	3.061	-20,1%	-1.188	-15,7%	0,223
DUCTIL-TIP6	-	5.806	51,6%	-	-	0,489
LIGHT-TIP7	0.452	3.663	-4,4%	-1.535	8,9%	0,319

7.8 Structura neconvențională de dublu bord „ARC” – TIP8

7.8.1 Descriere structură TIP8

Structura TIP8 constă în adăugarea la structura convențională a următoarelor elemente structurale (figura 7.8.1):

- elemente transversale de osatură de 6,5 mm grosime pe bordajul interior în forma de arc cu raza 1500 mm, conectate la punte și dublu fund
- ușurare traverse punte, varange și curent lateral identic capitolul 7.7.

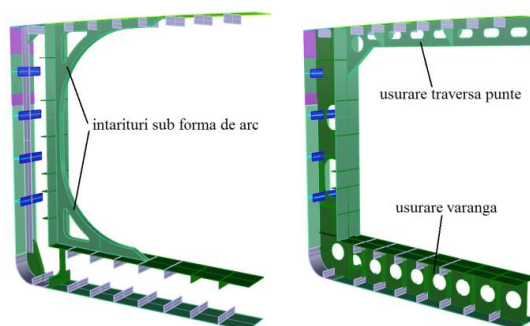


Fig.7.8.1 – Model 3D – structură TIP8

7.8.3 Analiză structură TIP8 în domeniul plastic cu solicitare dinamică

În tabelul 7.8.1 sunt prezentate comparativ între structura convențională, structura TIP1, structura TIP2, structura TIP3, structura TIP4, structura TIP5, structura TIP6, structura TIP7 și

structura TIP8 rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 7.8.2 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 7.8.1 – centralizator rezultate structură TIP8 - total

Structură	Energie [MJ]	Diferență %	Deplasare [m]	Diferență %	Masă [t]	Diferență %	Energie [MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
K-TIP1	5.148	-3,2%	-1.705	-18,8%	12,84	8,1%	0,401
SANDWICH-TIP2	4.859	-8,6%	-1.623	-22,7%	13,50	13,6%	0,360
SANDWICH-TIP3	5.139	-3,4%	-1.781	-15,2%	12,73	7,15%	0,404
SANDWICH-TIP4	4.563	-14,2%	-1.630	-22,4%	13,10	10,3%	0,348
ICE-TIP5	4.964	-8,5%	-1.819	-13,4%	13,71	15,4%	0,362
DUCTIL-TIP6	5.806	9,2%	-1.872	-10,8%	11,88	0,0%	0,489
LIGHT-TIP7	5.369	1,0%	-2.080	-1,0%	11,50	-3,2%	0,467
ARC-TIP8	5.633	5,9%	-1.820	-13,3%	12,62	6,2%	0,446

Tabel 7.8.2 – centralizator rezultate structură TIP8 - rupere

Structură	Moment [s]	Energie [MJ]	Diferență %	Deplasare [m]	Diferență %	Energie [MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
K-TIP1	0.462	4.330	13,1%	-1.444	2,4%	0,337
SANDWICH-TIP2	0.480	4.321	12,8%	-1.468	4,1%	0,320
SANDWICH-TIP3	0.477	4.265	11,4%	-1.538	9,1%	0,335
SANDWICH-TIP4	0.480	4.012	4,8%	-1.476	4,7%	0,306
ICE-TIP5	0.340	3.061	-20,1%	-1.188	-15,7%	0,223
DUCTIL-TIP6	-	5.806	51,6%	-	-	0.489
LIGHT-TIP7	0.452	3.663	-4,4%	-1.535	8,9%	0.319
ARC-TIP8	0.690	5.614	46,6%	-1.813	28,6%	0.445

7.9 Concluzii

Analizând rezultatele obținute pentru soluțiile de structuri neconvenționale investigate, se pot trage următoarele concluzii:

a) O metodă de creștere a energiei de deformație este adăugarea unor elemente de structură care să participe la impact (TIP1, TIP2, TIP3, TIP4, TIP5, TIP8), această abordare conducând la creșterea masei structurii. Este de remarcat că rata de creștere a energiei interne până la momentul ruperii peretelui tancului nu depinde doar de masa elementelor de structură adăugate, ci mai degrabă de aranjamentul structural care conduce la implicarea elementelor structurale existente și adiționale în fenomenul de deformare în timpul impactului.

b) O alta metodă de creștere a energiei interne până în momentul cedării peretelui tancului este utilizarea unor materiale mai ductile (TIP6), care să întârzie ruperea dublu bordajului și să permită structurii să absoarbă mai multă energie de deformație până în acel moment. Această soluție permite practic păstrarea sau chiar reducerea masei structurii în comparație cu structura convențională, pentru aceleași nivel de energie de deformație până la cedarea tancului.

c) Ușurarea elementelor de structură cu o participare mică la energia de deformație (TIP7) nu a modificat energia totală de deformație și nici deplasarea maximă a modelului prova. Acest principiu poate fi utilizat la proiectarea structurilor viitoare pentru a putea reduce masa structurii.

CAPITOLUL 8

PROPUNERI PENTRU MODERNIZAREA STRUCTURILOR ACTUALE

În continuare sunt propuse câteva soluții de modernizare a structurilor de dublu înveliș existente, precizând la fiecare în parte avantajele și dezavantajele:

A) Propunerea „Ductil” – TIP6

Modernizarea presupune:

- înlocuirea învelisului bordajului cu un oțel ductil, având alungirea la rupere minim 45%.

Avantaje:

- creștere energie de deformare maximă - dacă scopul principal este creșterea energiei interne atunci această soluție este cea mai potrivită (51,6% față de structura convențională)
- greutatea structurii – practic se păstrează aceeași greutate a structurii convenționale, ceea ce conduce la un raport energetic maxim 0,489 MJ/t

Dezavantaje:

- implementarea acestei soluții la o structură existentă presupune îndepărtarea învelișului dublu bordajului, păstrarea osaturii existente și asamblarea noului înveliș din oțel „ductil”, ceea ce implică o manoperă mai costisitoare
- trebuie aprovizionat oțelul „ductil” și investigat costul în comparație cu oțelul naval uzual

B) Propunerea „ARC” – TIP8

Modernizarea presupune:

- adaugarea elementelor transversale de osatură de tip „arc” la interiorul dublu bordajului, cu grosimea de 6,5 mm
- ușurarea traverselor de punte, varangelor și curentului lateral.

Avantaje:

- creștere energie de deformare mare (46,6% față de structura convențională)
- greutatea structurii – se realizează cea mai mică creștere a greutății, cu 6,2% față de structura convențională, obținând astfel a doua poziție ca raport energetic 0,445 MJ/t
- tehnologie simplă – practic elementele de tip „arc” se realizează din oțel uzual și cu tehnologia obișnuită din șantierele navale

Dezavantaje:

- în unele situații, cum este cazul substanțelor mai vâscoase: petrol, asphalt etc., elementele „arc” adăugate în interiorul tancurilor de marfă pot crea probleme funcționale (complicarea sistemului de încălzire a mărfii, acumularea substanțelor transportate în jurul elementelor de structură, îngreunarea procesului de spălare a tancurilor)
- nu se poate aplica la navele pentru transport mărfuri vrac sau de tip containere

C) Propunerea „K” – TIP1

Modernizarea presupune:

- adaugarea unor elemente de tip grinzi deformabile între bordajul exterior și punte și între bordajul exterior și dublu fund
- flansarea coastelor simple de pe bordajul exterior
- adaugarea unor bracheți între dublu bord și punte și între dublu bord și dublu fund.

Avantaje:

- creștere energie de deformare bună (13,1% față de structura convențională)
- penetrarea modelului prova – se reduce semnificativ penetrarea maximă, cu 18,8%
- tehnologie simplă – elementele adiționale de structură se realizează din profile „I” existente/platbenzi sudate, fiind confecționate din oțel obișnuit și asamblate prin sudare
- poate fi aplicată oricărui tip de navă, elementele structurale adiționale sunt prevăzute

doar în interiorul structurii de dublu înveliș

Dezavantaje:

- raport energetic mic 0,337 MJ/t

B) Propunerea „SANDWICH” – TIP3

Modernizarea presupune:

- transformarea invelisului bordajului exterior și interior într-un sandwich oțel-polistiren-oțel, prin adaugarea unui strat de polistiren și apoi a unui strat de oțel.

Avantaje:

- creștere energie de deformație bună (11,4% față de structura convențională)
- greutatea structurii – se obține creștere mică a greutății, cu 7,15% față de structura convențională
- poate fi aplicată oricărui tip de navă, elementele structurale adiționale sunt prevăzute doar în interiorul structurii de dublu înveliș

Dezavantaje:

- raport energetic mic 0,335 MJ/t
- tehnologie de fabricație mai costisitoare
- reducere capacitate tancuri de balast

Concluzii: Fiecare dintre propunerile de mai sus prezintă avantaje și dezavantaje, în funcție de importanța acordată diverselor obiective considerate. Astfel alegerea unei soluții sau chiar a unei combinații de soluții va fi clar impusa de obiectivul/obiectivele principale urmărite în cazul concret al unei structuri cu dublu invelis.

CAPITOLUL 9

PROPUNEREA UNEI STRUCTURI NECONVENTIONALE NOI TIP-X

Ținând cont de rezultatele analizelor din capitolele 7 și 8, precum și de stabilirea a două noi obiective: reducerea greutății structurii și micșorarea lățimii dublu bordajului, s-a propus o structura neconvențională nouă, denumită TIP-X .

S-a încercat o abordare cuplată a comportării în domeniul elastic și în domeniul plastic, astfel încât să rezulte o structură cât mai eficientă din punct de vedere a greutății și a răspunsului conjugat la solicitările globale, locale și din impact.

Tema de proiectare

Se va proiecta o structură cu dublu înveliș pentru nava cisternă fluviială descrisă în capitolul 6.1, care va îndeplini următoarele cerințe:

- utilizarea unor materiale și tehnologii uzuale în construcțiile navale
- rezistență structurală globală și locală în domeniul elastic conform normelor societăților de clasificare (BV Rules, 2016)
- asigurarea protecției la impact a tancurilor de marfă conform ADN, 2017
- asigurarea accesului în spațiile adiacente tancurilor de marfă, conform ADN, 2017.

Obiective

Suplimentar cerințelor de mai sus, s-a propus îndeplinirea următoarelor obiective pentru structura neconvențională TIP-X:

- reducerea greutății structurii care va conduce la următoarele beneficii economice:
 - reducerea costului de producție a navei
 - reducerea pescajului sau mărirea deadweight-ului
- reducerea lățimii dublu bordului sau înălțimi dublu fundului conducând astfel la flexibilitate în amenajarea structurii
- să asigure cel puțin aceeași rezistență la impact obținută de structura convențională.

Strategie

În prezent proiectarea structurilor navale abordează în general doar problema rezistenței în domeniul elastic, deci aranjamentul și dimensionarea structurii sunt gândite pentru un răspuns optim la solicitările globale și locale în limita domeniului elastic.

Comportarea structurilor la impact se investighează doar în anumite situații conform unor cerințe particulare, ca de exemplu NMA 123/1994 sau ADN 2017.

Este evident că separarea celor două abordări de cele mai multe ori nu conduce la o structură cu un răspuns eficient simultan pentru ambele domenii.

Practic structura neconvențională TIP-X a fost proiectată astfel:

a) s-au păstrat principalele elemente de rezistență longitudinală: structura punții, fundului și dublu fundului, identic cu nava convențională, tocmai pentru a scoate în evidență doar beneficiile aduse de structura neconvențională de dublu bord propusă

b) reproiectarea structurii de bordaj și dublu bordaj, care să răspundă conjugat la solicitările locale (presiunea apei pe bordajul exterior, presiunea mărfii pe pereții tancului) și la solicitările din impactul bordajului cu o altă navă. În acest scop, s-au avut în vedere soluțiile investigate în capitolul 7.

c) verificarea structurii în domeniul elastic prin analiză cu element finit, conform capitolul 6.2

d) verificarea structurii la impact, conform capitolul 6.4.

Etapele b)...d) au fost reluate în cadrul unui proces iterativ, modificând elementele structurii până s-a ajuns la cea mai eficientă soluție din punct de vedere a greutății structurii și a răspunsului conjugat la toate solicitările considerate.

9.1 Analiză structură neconvențională TIP-X în domeniul elastic

Structura neconvențională TIP-X constă în implementarea următoarelor soluții:

- ușurarea traverselor de punte, varangelor și a curentului lateral
- îngustare dublu bordajului cu 60mm
- utilizare oțel mai ductil la învelișul dublu bordajului, cu alungirea la rupere 30%
- eliminarea osaturii longitudinale și adoptarea unui sistem transversal de osatură pentru dublu bordaj format din elementele de tip „ARC” și coaste din profil HP 120x7
- eliminarea stringherilor de pe bordajul exterior.

În figurile 9.1 - 9.5 sunt prezentate o vedere de ansamblu a structurii precum și fiecare tip de coastă modificată.

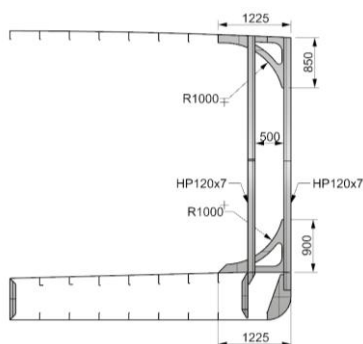


Fig.9.1–Coasta simplă-structură TIP-X

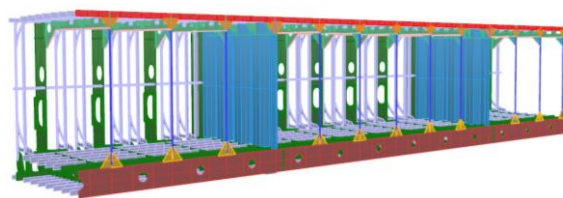


Fig.9.3–Model 3D-structură TIP-X

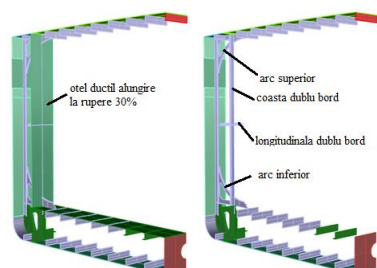


Fig.9.4–Model 3D-coastă simplă

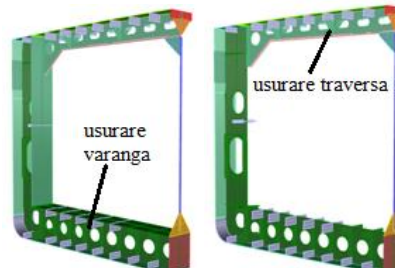


Fig.9.5–Model 3D-coastă întărită

În figura 9.6 este prezentată discretizarea elementelor structurii neconvenționale TIP-X.

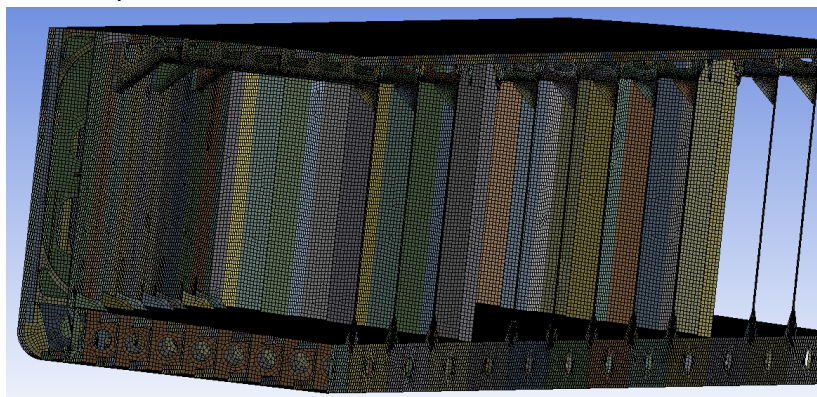


Fig.9.6 – Discretizare structură TIP-X

Rezultate calcul

În tabelul 9.1 de mai jos s-a considerat valoarea maximă a tensiunii σ_{FEM} rezultată din cele patru cazuri de încărcare analizate (A1, A2, B1 și B2) pentru fiecare element de structură.

Tabel 9.1 – nivel tensiuni în structura neconvențională de dublu bord TIP-X

Nr.	Denumire element	z	Z	σ_{HGL}	σ_{FEM}	σ_{total}
		[m]	[cm ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	Tablă lacrimară	4.79	621937	57	14	71
2	Centură	4.758	629531	56	20	76
3	Tablă bordaj 1	4.2	799806	44	37	81
4	Tablă bordaj 2	3.57	1151431	31	47	78
5	Tablă bordaj 3	3.3	1418745	25	85	110
6	Tablă gurnă	0	772110	46	43	89
7	Tablă dublu bord	4.79	621937	57	118	175
8	Diafragmă bordaj etanșă				43	43
9	Diafragmă bordaj				172	172
10	Coastă bordaj HP120x7				113	113
11	Brachet gurnă				16	16
12	Coastă dublu bordaj HP120x7				143	143
13	Elemente de tip "arc"				171	171
14	Longitudinală dublu bordaj T 120x7/60x7	2.70	2930728	12	155	167
15	Curent lateral Y3925	0	772110	46	54	100
16	Bracheți diafragmă bordaj etanșă				65	65
17	Nervuri diafragmă bordaj 100x8				57	57
18	Longitudinale punte HP140x7	4.79	621937	57	10	67
19	Longitudinale fund HP 120x7	0	772110	46	16	62

Concluzie: Din tabelul 9.1 de mai sus reiese că valorile tensiunilor sunt sub limita valorii admisibile a tensiunii $\sigma_{VM} = 219,3$ MPa.

În figurile 9.7...9.10 sunt reprezentate distribuția de tensiuni și deformată structurii sub acțiunea sarcinilor locale.

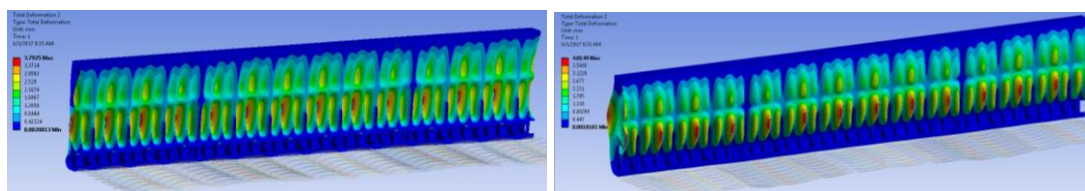


Fig.9.9 – Deformată dublu bord TIP-X - caz de încărcare A2 (sus) și B1 (jos)

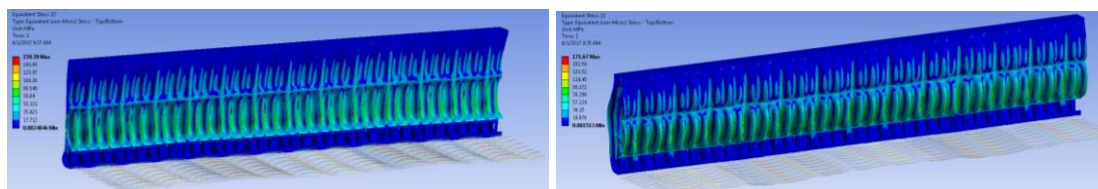


Fig.9.10 – Distribuție tensiuni în dublu bord TIP-X - caz de încărcare A2 (sus) și B1 (jos)

9.2 Analiză structură neconvențională TIP-X în domeniul plastic cu solicitare dinamică

Pentru această analiză s-a utilizat un oțel mai ductil, având limita la curgere $R_y = 236,2$ MPa, modul tangent 1105 MPa și alungirea la rupere 30%.

9.2.2 Cedarea dublu bordajului

Analizând distribuția de tensiuni echivalente, la diferite momente intermediare, s-au identificat următoarele cauze ale ruperii bordajului interior:

- cedarea elementelor într-un plan orizontal corespunzător contactului dintre puntea modelului prova și dublu bordaj, la momentul $t = 0,69$ s
- cedarea elementelor pe o direcție verticală datorată contactului dintre etrava modelului prova și dublu bordaj.

În figura 9.14 este prezentată cedarea peretelui tancului într-o vedere din exteriorul tancului asupra dublu bordajului.

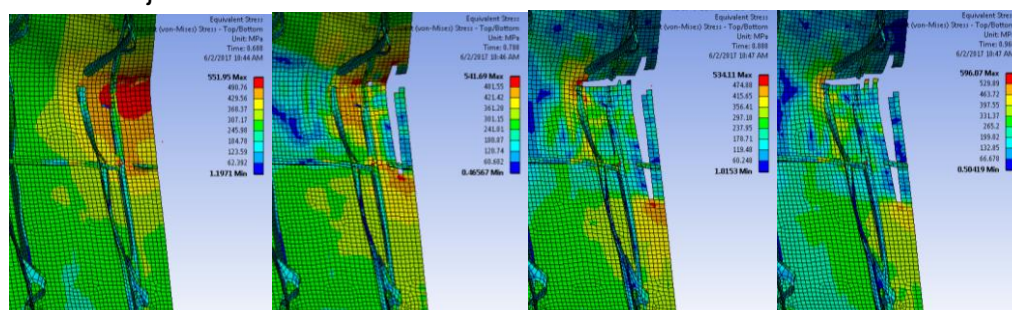


Fig.9.14 – Zona de contact model prova cu înveliș dublu bordaj– structură TIP-X

9.2.5 Energii și deplasări

În figura 9.17 este prezentată diagrama de energie cinetică [MJ] a modelului prova funcție de timp.

În figura 9.18 este prezentată diagrama energiei interne [MJ] a structurii funcție de timp.

În figura 9.19 este prezentată diagrama de Deplasare a modelului prova [m] pe direcția Oy a modelului structurii funcție de timp.

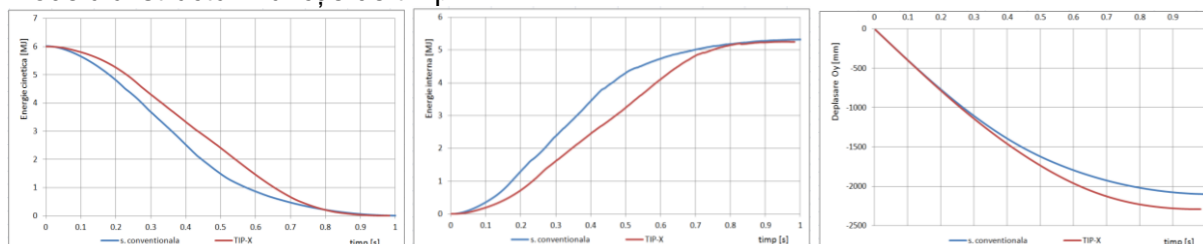


Fig.9.17–Energie cinetică

Fig.9.18–Energie internă

Fig.9.19–Deplasare prova

Concluzii În tabelul 9.2 sunt prezentate comparativ între structura convențională și structura TIP-X rezultatele obținute până la finalul impactului, iar în tabelul 9.3 rezultatele obținute până la momentul cedării dublu bordajului.

Tabel 9.2 – centralizator rezultate structură TIP-X - total

Structură	Energie internă totală	Diferență Energie internă totală	Deplasare maximă	Diferență Deplasare maximă	Masă	Diferență masă	Energie internă totală/masă structură
	[MJ]	%	[m]	%	[t]	%	[MJ / t]
Structură conv.	5.318	-	-2.100	-	11,88	-	0,448
TIP-X	5.255	-1,2%	-2.288	8,9%	10,74	-9,6%	0,489

Tabel 9.3 – centralizator rezultate structură TIP-X - rupere

Structură	Moment rupere dublu bordaj	Energie internă rupere	Diferență Energie internă rupere	Deplasare până la rupere	Diferență Deplasare până la rupere	Energie internă rupere/masă structură
	[s]	[MJ]	%	[m]	%	[MJ / t]
Structură conv.	0.440	3.830	-	-1.410	-	0,322
TIP-X	0.690	4.772	24,6%	-2.112	49,7%	0,444

Concluzii: Structura neconvențională nouă TIP-X propusă respectă cerințele legate de rezistența structurală globală și locală în domeniul elastic și cerințele ADN pentru accesul în spațiile adiacente tancurilor de marfă.

Structura TIP-X a îndeplinit obiectivele propuse astfel:

- reducerea greutateii structurii cu 10%
- reducerea lățimii dublu bordului cu 7,5%
- energia de deformație la impact cu 25% mai mare decât la structura convențională.

Pentru a obține energia de deformație la impact s-a utilizat un oțel mai ductil, cu alungirea la rupere de minim 30%, apărând astfel necesitatea dezvoltării unui oțel nou, cu ductilitate mai mare, în cazul în care acesta nu exista deja pe piață la un cost rezonabil.

CAPITOLUL 10 CONCLUZII FINALE

Utilizarea structurilor de dublu înveliș are la bază două justificări:

- îndeplinirea unor funcții generale: asigurarea spațiilor pentru tancuri de balast și rezerve și compartimentarea corpului navei pentru asigurarea stabilității de avarie
- îndeplinirea unor funcții specifice tipului de nava: protecția tancurilor de marfă, asigurarea unei geometrii la interiorul tancurilor la navele tehnice etc.

În general, din punct de vedere al rezistenței, structurile de dublu înveliș au fost proiectate să răspundă cerințelor legate de rezistența în domeniul elastic.

În ultima perioadă s-a dezvoltat și analiza structurilor în domeniul deformațiilor plastice, în acest sens au apărut o serie de reguli care precizează modul de analiză și cerințele impuse pentru comportarea structurilor la impactul de fund și coliziunea de bordaj.

IMO, IACS și celelalte autorități din domeniul construcțiilor navale au adoptat reguli privind obligativitatea structurilor de dublu înveliș precum și măsurile constructive.

Astfel de reguli care impun utilizarea dublu învelișului, sunt:

- MARPOL – dublu fund și dublu bord pentru prevenirea poluării
- SOLAS – dublu fund pentru stabilitatea de avarie
- MSC.235(52) – dublu bord pentru prevenirea poluării
- IBG, IGC, ADN și NMA 123/1994– dublu fund și dublu bord pentru prevenirea poluării.

Măsurile constructive impuse structurilor de dublu înveliș constau în general dintr-o serie de reguli de eșantionare și amenajare, doar în anumite situații fiind necesară analiza directă.

Studiul comportării structurilor navale la impact se face printr-o analiză directă cu element finit, cu ajutorul căreia se poate demonstra eficiența unei structuri în cazul unor scenarii de impact impuse de reguli specifice (ADN, NMA 123/1994).

Utilizarea metodei cu element finit la analiza structurilor navale este reglementată prin Regurile societăților de clasificare navale și a altor organisme din domeniu, aspectele concrete la care se referă aceste reguli fiind:

- folosirea grosimilor nete
- extinderea modelului
- discretizarea structurii în elemente finite
- aplicarea condițiilor la limită
- aplicarea încărcărilor
- calculul tensiunilor
- idealizarea materialului
- criterii de cedare

Pentru a determina nivelul de aproximare a metodologiei de calcul propusă pentru analiza comportării structurilor în domeniul deformațiilor plastice s-au realizat o serie de teste experimentale, constând în deformarea elasto-plastică cu ajutorul unui bulb sferic a trei modele de structură:

- experiment 1 – panou simplu de oțel
- experiment 2 – panou de oțel cu osatura
- experiment 3 – panou sandwich oțel - polistiren XPS - oțel.

În timpul experimentelor s-au măsurat:

- forța de contact dintre bulbul sferic și panoul de tablă al modelului și
- deplasarea modelului pe verticală (direcția de aplicare a forței).

S-au realizat simulările numerice ale testelor experimentale pentru a investiga influența discretizării, condițiilor la limită și idealizării materialului asupra rezultatelor.

În urma analizei comparative între experimente și simulările numerice corespunzătoare au rezultat următoarele diferențe exprimate în procente, prezentate în tabelul 10.1 de mai jos:

Tabel 10.1 – centralizator comparativ experimente-simulări

Nr.	Experiment	Diferențe [%]
		Deformată plastică
1	Experiment 1	4.00
2	Experiment 2	2.70
3	Experiment 3	2.86

Se observă că diferența maximă pentru deformata plastică între experimente și simulările numerice este de maxim 4% .

Nivelul de eroare maxim posibil în timpul experimentelor, datorat instrumentelor de măsură și a standului de încercări, însumează valoarea de 2%.

Considerând cel mai defavorabil scenariu, când toate erorile se cumulează, va rezulta o diferență totală, pentru deformatele plastice, între experiment și simularea numerică de $2\% + 4\% = 6\%$.

Ținând cont de marja de siguranță folosită în domeniul structurilor navale, în general cuprinsă între 5% și 10 %, se poate concluziona că nivelul de eroare între experimentele realizate și simulările numerice bazate pe metoda de analiză considerată se încadrează în marja de eroare acceptată.

Metoda de analiză propusă pentru investigarea structurilor de dublu înveliș și calibrată pe baza testelor experimentale a fost folosită mai întâi la analiza comportării la impactul de bordaj a structurii de referință și apoi la analiza diverselor soluții de structuri neconvenționale.

Structura de referință folosită la analiza comparativă este o structură de navă tanc fluvială pentru transportul mărfurilor periculoase, construită conform cerințelor ADN.

Analizând rezultatele obținute în urma simulării numerice a coliziunii de bordaj, conform ADN, a structurii convenționale s-au concluzionat următoarele:

- este de evitat folosirea elementelor de osatură pe bordajul exterior care pot deveni concentratori de tensiune la contactul cu învelișul bordajului interior, conducând astfel la cedarea acestuia din urmă (a se vedea 6.4.5.2),
- este de evitat folosirea la bordajul interior a elementelor cu diferențe mari de rigiditate în direcția OY, direcția de deformare impusă de modelul prova (a se vedea 6.4.5.2),
- ținând cont de energia de deformație se poate aprecia nivelul de participare a fiecărui element de structură în timpul impactului și se poate reproiecta structura convențională astfel încât să rezulte o reducere a greutateii structurii simultan cu o capacitate de absorbție a energiei de impact la fel de bună (a se vedea 6.4.5.3),
- analizând comportarea locală a elementelor de structura se pot identifica diverse soluții pentru a mari nivelul de energie totală absorbită de structură în timpul impactului (6.4.5.4)

Analizând modul de deformare a structurii convenționale la impact, zonele în care apar concentratorii de tensiuni, modul de cedare a peretelui tancului s-au identificat următoarele soluții spre a fi investigate:

- utilizarea unor elemente de structură care să transmită energia din zonele puternic solicitate către cele mai puțin solicitate – structura „K” (TIP1)
- utilizarea unor elemente care să disipeze concentratorii de tensiuni care duc la cedarea materialului – structura „SANDWICH” (TIP2, TIP3, TIP4)
- întărirea structurii bordajului exterior – structura „ICE” (TIP5)
- utilizarea unui material mai ductil la învelișul bordajului interior – structura „DUCTIL” (TIP6)
- ușurarea elementelor de osatură care au o participare mică la energia de deformație – structura „LIGHT” (TIP7)
- întărirea bordajului interior – structura „ARC” (TIP8)

În urma investigării soluțiilor de structuri neconvenționale descrise mai sus, se pot trage următoarele concluzii:

- o metodă de creștere a energiei de deformație este adăugarea unor elemente de structură care să participe la impact (TIP1, TIP2, TIP3, TIP4, TIP5, TIP8), această

abordare conducând la creșterea masei structurii. Este de remarcat ca rata de creștere a energiei interne până la momentul ruperii peretelui tancului nu depinde de masa elementelor de structură adăugate, ci mai degrabă de aranjamentul structural care conduce la implicarea elementelor structurale existente și adăugate în fenomenul de deformare în timpul impactului.

- o alta metodă de creștere a energiei interne până în momentul cedării peretelui tancului este utilizarea unor materiale mai ductile (TIP6), care să întârzie ruperea dublu bordajului și să permită structurii să absoarbă mai multă energie de deformație până în acel moment. Această soluție permite practic păstrarea sau chiar reducerea masei structurii în comparație cu structura convențională, pentru același nivel de energie de deformație până la cedarea tancului.
- ușurarea elementelor de structură cu o participare mică la energia de deformație (TIP7) nu a modificat energia totală de deformație și nici deplasarea maximă a modelului prova. Acest principiu poate fi utilizat la proiectarea structurilor viitoare pentru a putea reduce masa structurii.

Fiecare dintre variantele propuse prezintă avantaje și dezavantaje, astfel că alegerea unei soluții sau chiar a unei combinații de soluții va fi dictată de obiectivul/obiectivele principale urmărite în cazul concret al unei structuri cu dublu înveliș.

Ținând cont de rezultatele obținute anterior și de stabilirea a două obiective principale: reducerea greutateii structurii și micșorarea lățimii dublu bordajului, s-a propus o structura neconvențională nouă, denumită TIP-X .

În urma analizei s-a constatat că structura neconvențională nouă TIP-X propusă respectă cerințele legate de rezistența structurală globală și locală în domeniul elastic și cerințele ADN pentru accesul în spațiile adiacente tancurilor de marfă.

De asemeni structura TIP-X a îndeplinit obiectivele propuse astfel:

- reducerea greutateii structurii cu 10%
- reducerea lățimii dublu bordajului cu 7,5%
- energia de deformație la impact cu 25% mai mare decât la structura convențională.

Pentru a obține energia de deformație la impact s-a utilizat un oțel mai ductil, cu alungirea la rupere de minim 30%.

În condițiile în care acest tip de oțel nu există deja pe piață sau nu există la un cost rezonabil, apare deci necesitatea de a dezvolta un oțel nou, care să prezinte ductilitate mai mare și să fie fezabil pentru structurile navale.

Astfel din necesitatea de a răspunde atât cerințelor de comportare a structurilor de dublu înveliș la impact, impuse de ADN, cât și obiectivului de a reduce greutatea structurii se naște o noua direcție de cercetare și inovare în domeniul materialelor pentru construcții navale.

Concluziile sintetice care se pot desprinde din această lucrare sunt:

- Structurile cu dublu înveliș au fost introduse în construcțiile navale pentru a mări gradul de siguranță a navei și a reduce riscul poluării mediului în cazul unui impact de fund sau de bordaj
- În general structurile de dublu înveliș sunt proiectate conform reglementărilor de amenajare și eșantionare impuse de Regulile IMO și IACS, analiza directă fiind necesară doar în anumite situații.
- Studiul comportării structurilor navale la impact se face prin analiză directă cu element finit, condițiile de calcul precum și scenariile de impact fiind impuse prin regulile specifice aplicabile (ADN, NMA 123/1994).
- În prezent proiectarea navelor se face în general disjunct în privința celor două aspecte: comportarea în domeniul elastic și în domeniul plastic. Structurile se proiectează de cele mai

multe ori pentru un răspuns optim în domeniul elastic și numai în anumite situații când regulile specifice o impun se adopta soluții privind comportarea structurii la impact.

e) Utilizând metoda elementului finit s-au investigat diverse soluții de dublu înveliș viabile pentru îmbunătățirea comportării structurilor la impact.

f) S-a proiectat o structura neconvențională de dublu înveliș care să răspundă cerințelor impuse de Reguli și obiectivelor suplimentare impuse (reducerea greutateii structurii și micșorarea lățimii dublu bordului), utilizând analiza directă cu element finit pentru comportarea în domeniul elastic și plastic.

CAPITOLUL 11 CONTRIBUTII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE

Scopul principal al activității de cercetare desfășurate în cadrul aceste lucrări a fost dezvoltarea unei structuri inovatoare de dublu înveliș, care să răspundă atât cerințelor privind rezistența structurală și siguranța în exploatare, cât și unor obiective particulare, cum ar fi reducerea greutateii structurii și/sau modificarea amenajării structurale impuse de Reguli.

Contribuții originale

Îndeplinirea scopului amintit se bazează pe o serie de contribuții originale, printre care se numără:

1) Validarea prin experiment a metodologiei de calcul utilizată la analiza comportării structurilor în domeniul deformațiilor plastice. Prin realizarea testelor experimentale din capitolul 5 s-a putut stabili că gradul de aproximare al rezultatelor simulărilor numerice în comparație cu valorile măsurate experimental se încadrează într-o marjă de eroare acceptată.

2) Stabilirea parametrilor pentru calculul cu element finit utilizat la analiza structurilor neconvenționale de dublu înveliș. S-a investigat influența asupra rezultatelor simulărilor numerice a diversilor parametri precum: idealizarea materialului, tipul și mărimea elementelor finite, tipul grilei de discretizare (uniformă sau neuniformă), condițiile la limită. Având ca referință rezultatele experimentale s-au putut determina cele mai potrivite valori ale parametrilor amintiți, astfel încât să se obțină un nivel minim de eroare între experimente și simulările numerice.

3) Investigarea sistematică a diverselor soluții de structuri neconvenționale, având la bază următoarele direcții principale:

- utilizarea unor elemente de structură care să transmită energia din zonele puternic solicitate către cele mai puțin solicitate („K”, „ARC”)
- utilizarea unor elemente care să disipeze concentratorii de tensiuni care duc la cedarea materialului („SANDWICH”)
- mărirea energiei de deformație a bordajului exterior, prin dublarea osaturii („ICE”)
- utilizarea unui material mai ductil la învelișul bordajului interior („DUCTIL”)
- ușurarea elementelor de osatură care au o participare mică la energia de deformație („LIGHT”)

4) Propunerea unor soluții de modernizare a structurilor actuale de dublu înveliș. În funcție de obiectivele urmărite și utilizând rezultatele obținute la analiza soluțiilor amintite, s-au făcut următoarele propuneri concrete:

- „DUCTIL” – potrivită pentru următoarele obiective: creșterea energiei de deformație, păstrarea greutateii structurii și păstrarea sistemului de osatură neschimbat
- „ARC” – potrivită pentru: creșterea energiei interne și utilizarea oțelului naval uzual
- „K” – potrivită pentru: creșterea energiei de deformație, reducerea penetrării modelului prova și utilizarea oțelului uzual
- „SANDWICH” – potrivită pentru: creșterea energiei de deformație și reducerea penetrării modelului prova.

5) Proiectarea unei structuri neconvenționale inovatoare de dublu bord. Având drept obiective principale: reducerea greutateii, reducerea lățimii dublu bordului și menținerea energiei de deformație la valoarea structurii de referință, s-a proiectat o structură nouă de dublu bord care înglobează două dintre soluțiile investigate anterior: „ARC” și „DUCTIL”. S-a încercat o abordare cuplată a comportării în domeniul elastic și în domeniul plastic, astfel încât să rezulte o structură cât mai eficientă din punct de vedere a greutateii și a răspunsului conjugat la solicitările globale, locale și din impact. S-au obținut beneficii considerabile:

- reducerea greutateii structurii cu 10%
- reducerea lățimii dublu bordului cu 7,5%
- energia de deformație la impact cu 25% mai mare decât la structura convențională.

Perspective

În vederea dezvoltării activității de cercetare prezentate în cadrul acestei lucrări, se pot considera următoarele perspective:

1) Abordarea completă a comportării structurii de dublu înveliș în domeniul plastic, analizând și comportarea la impactul de fund. Dacă se pot obține rezultate similare cu cele ale structurii TIP-X și pentru structura de dublu fund, atunci beneficiile globale pentru o structură inovatoare de dublu înveliș vor fi mult mai consistente.

2) O altă direcție ar putea fi investigarea unor soluții bazate pe materiale noi. În funcție de obiectivele propuse pentru o structură neconvențională de dublu înveliș apare necesitatea utilizării unor materiale îmbunătățite sau chiar complet noi. Un astfel de exemplu este soluția „DUCTIL”, care a dovedit că se pot obține rezultate bune utilizând un material cu o caracteristică îmbunătățită, în acest caz ductilitatea mărită.

3) Ținând cont de interesul sporit pentru analiza la impact și pentru optimizarea structurilor, se poate imagina pentru viitor o nouă modalitate de abordare: proiectarea concurențială, astfel încât dimensionarea și amenajarea structurii să ofere un răspuns optim (de exemplu din punct de vedere al greutateii) pentru solicitările globale, locale și din impact în același timp.

4) Având în vedere amploarea tot mai mare a analizei la impact a structurilor navale, ar fi utilă realizarea unor experimente la scara 1:1, care să permită ajustarea metodelor de calcul, pentru a obține un nivel cât mai bun de aproximare.

5) Ținând seama de standardele tot mai ridicate de siguranță și de grija sporită pentru mediul înconjurător se poate prefigura pe viitor obligativitatea analizei comportării structurilor navale la impact pe scara largă. Astfel s-ar putea dezvolta și aplica o serie de reguli privind:

- determinarea riscului de spargere a tancurilor de marfă în cazul impactului
- determinarea capacității de supraviețuire a navei în urma unui impact, din punct de vedere al rezistenței structurii avariate etc.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [3] BV Rules, 2016 (NR467) – Bureau Veritas - Rules for the Classification of Steel Ships - Edition July 2016;
- [8] MARPOL 2006- International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – International Maritime Organization 2006;
- [9] CSR OT, 2012 – Common Structural rules for Double Hull Oil Tankers – International Association of Classification Societies - July 2012;
- [12] CSR BC, 2012 – Common Structural rules for Bulk Carriers – International Association of Classification Societies - July 2012;
- [13] ABS, 2015 – American Bureau of Shipping - Rules for Building and Classing Steel Vessels - Edition January 2015;
- [14] ADN, 2017 - European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous goods by Inland Waterways – United Nations 2016;
- [15] <http://www.pntl.co.uk/our-fleet/>
- [16] MOVEIT! - Modernisation of vessels for inland waterway freight traffic <http://www.moveit-fp7.eu/>
- [17] MOVEIT! - Modernisation of vessels for inland waterway freight traffic - Work package WP5 Structures & Weight, Task 5.3 Crashworthiness (TNO, SMILE FEM, University Galati, Ship Design Group, SWEREA Sicomp) – 2014;
- [18] Intelligent Engineering UK Limited - <http://www.ie-sps.com/sectors/maritime>
- [19] IE - Intelligent Engineering UK Limited – A member of the IE Group of Companies - January 2016 – Project portofolio;
- [23] SOLAS, 2014 – International Convention for the Safety of Life at sea – International Maritime Organization 2014;
- [24] MSC.235(82) - Guidelines for the design and construction of offshore supply vessels – Maritime Safety Committee MSC 2006
- [25] IBC, 2007 - International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemical in Bulk – Maritime Environment Protection Committee MEPC 2007;
- [26] IGC Code, 2016 - International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk - Maritime Environment Protection Committee MEPC 2007;
- [27] NMA 123/1994 – Norwegian Maritime Authority – Regulations of 10 February 1994 No. 123 for mobile offshore units with production plants and equipment;
- [32] Ionel Chirica – Elasticitate – Fundamente. Exemple. Aplicatii – Editura Tehnica, Bucuresti 1997– ISBN 973-31-1129-5;
- [35] Chakrabarty J. – Theory of plasticity – Elsevier Butterworth-Heinemann 2006– ISBN 978-0-7506-6638-2;
- [37] Jacob Lubliner – Plasticity theory – Revised edition (PDF) University of California at Berkeley 2006;
- [38] E. J. Hearn – Mechanics of materials 1 – Elsevier Butterworth-Heinemann 1997 – ISBN 0-7506-3265-8;
- [39] E. J. Hearn – Mechanics of materials 2 – Elsevier Butterworth-Heinemann 1997 – ISBN 0-7506-3266-6;
- [40] Philippe Rigo and Enrico Rizzuto – Ship design & Construction, Volume 1 – Chapter 18: *Analysis and Design of Ship Structure* - 2003;
- [41] Chen W.F., Han D.J. – Plasticity for Structural Engineers – Springer Verlag New York Inc. 1988 – ISBN 3-540-96711-7;
- [43] David Broek – Elementary engineering fracture mechanics – Martinus Nijhoff Publishers 3rd printing 1984 – ISBN 90-247-2580-1;

[45] T.L. Anderson – Fracture mechanics – Fundamentals and Applications – CRC Press LLC
1995 – ISBN 0-8493-4260-0;

[59] ANSYS Release 17 January 2016 – Engineering Data User's Guide;

[60] ANSYS Release 17 January 2016 – ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide;