

# OPTIMIZAREA PROIECTĂRII ROLELOR DE MACARA PORTUARĂ DE CHEI PRIN METODA ELEMENTELOR FINITE

Dr. ing. Cristina DRAGOMIR

Universitatea Maritimă din Constanța, România

**REZUMAT.** Deși au fost construite, în medie, cu aproximativ 35 de ani în urmă, macaralele portuare de chei Bocșa continuă să fie exploatate și în prezent în Portul Constanța, având o bună productivitate și funcționalitate. Rolele macaralelor sunt calculate cu grijă în procesul de proiectare. Însă adeseori sunt preferate metodele analitice de calcul care comportă ipoteze simplificatoare și coeficienți de siguranță exagerați, ceea ce conduce la role excesiv de groase și masive. Calculul de optimizare cu metoda elementelor finite oferă oportunitatea unui calcul foarte precis ceea ce duce la micșorarea greutateii și a îmbunătățirii comportamentului în exploatare, inclusiv la mărirea duratei de viață.

**Cuvinte cheie:** Bocșa, fisuri, ANSYS, SolidWorks .

**ABSTRACT.** Although built, on average, about 35 years ago, Bocșa quay port cranes continue to be operated today in the Port of Constanta, having a good productivity and functionality. The roles of the cranes are carefully calculated in the design process. However, often analytical methods of calculation are involving simplifying assumptions and exaggerated safety coefficients, which often leads to excessively thick and massive rolls. The optimization calculation with the finite element method offers the opportunity for a very precise calculation which leads to the reduction of the weight and the improvement of the operating behavior, including the increase of life duration.

**Keywords:** Bocșa, cracking, ANSYS, SolidWorks .

## 1. INTRODUCERE

În Portul Constanța, cel mai mare port al României, sunt operate numeroase tipuri de mărfuri (vrac solid, vrac lichid, mărfuri unitizate) cu o gamă diversificată de echipament portuar [1]. Deși dezvoltarea tehnologică permite operarea cu o productivitate maximă a mărfii de tip vrac solid (cereale, minereu, fier vechi) cu macarale portuare de chei complet automatizate, operatorii portuari autohtoni folosesc frecvent macarale portuare de chei semiautomate, încă funcționale și cu o bună productivitate, deși au fost produse în urmă cu peste 35 de ani de întreprinderea de stat producătoare de construcții metalice Bocșa.

Compania de Construcții Metalice Bocșa, având ca obiect principal de activitate construcția, cercetarea, proiectarea, montarea, întreținerea, și repararea de confecții metalice, inițial a aparținut proprietății de stat și după Revoluție a fost privatizată în 2002. Compania a dispărut de pe piață în 2005, intrând în faliment, după ce, în mare parte, echipamentele au fost vândute pe piața de fier vechi [2].

Deși inițial rolele macaralelor au fost proiectate cu maximă exigență în scopul obținerii de siguranță în exploatare, valoare adăugată și plus de funcționalitate, metodele analitice de calcul cu ipoteze simplificatoare și coeficienți de siguranță exagerați au contribuit la construcția de role excesiv de groase și masive.

## 2. CALCULUL ROLEI INIȚIALE

Metode moderne de proiectare de tipul metodei elementelor finite permite realizarea unui calcul de optimizare foarte precis, ceea ce duce la micșorarea greutateii pieselor și a îmbunătățirii comportamentului în exploatare, inclusiv la mărirea duratei de viață a acestora. În egală măsură se pot calcula numărul minim de cicluri de funcționare după care se impune inspecția cu metode nedistructive.

În articolul de față este prezentat un experiment numeric de optimizare geometrică a unei role de cablu de macara portuara de chei Bocșa 16 t-32m, în vederea creșterii vieții sale garantate. În cadrul experimentului s-a efectuat simularea rolei opti-

## OPTIMIZAREA PROIECTĂRII ROLELOR DE MACARA PORTUARĂ DE CHEI PRIN MEF

zate prin analiza cu elemente finite 3D a unor fisuri plasate în zonele cele mai încărcate susceptibile de a dezvolta asemenea defecte în timp.

În scopul realizării experimentului numeric s-a considerat o geometrie simplificată pentru reducerea puterii de calcul necesare. La generarea geometriei în CAD s-a folosit programul SolidWorks 2010 iar pentru tratamentul numeric ANSYS 13<sup>TM</sup>. Materialul rolei folosit în simulare a fost ANSI 102. Acesta are proprietăți apropiate proprietăților materialului din care este confecționată o rolă reală studiată la o macara portuară de chei Bocșa cu braț mobil 16/20 t – 32 m, aparținând unuia dintre operatorii portuari private din Portul Constanta, Romania.

Geometria și dimensiunile rolei sunt următoarele, indicate în Fig. 2.1 și 2.2:

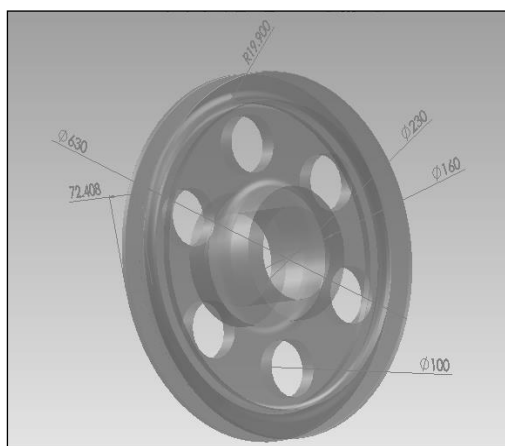


Fig. 2.1. Geometrie CAD și dimensiuni rolă inițială.

Modelul discretizat cu elemente finite cuprinde 106 257 elemente tetragonale cu 181 257 noduri. Zonele de risc precum fețele rozelor, suprafețele găurilor laterale și razele de racordare dintre salturile de diametru, sunt discretizate cu o rețea mai fină de elemente finite, în scopul măririi preciziei de calcul în aceste zone sensibile.

Condițiile la frontiere sunt specificate astfel încât să fie cât mai reale cu putință. De pildă, zona de montare a rolei pe arborele de susținere este modelată ca fiind de tip Suport Cilindric, iar presiunea exercitată de cabluri va ocupa un unghi de  $146^{\circ}$  și va avea valoarea de 41 MPa. În ceea ce privește modelarea comportamentului la oboseală, dat fiind că zona încărcată trece ciclic peste cablu, atunci încărcarea va fi modelată tip „Zero Based”. Ca teorie s-a folosit Soderberg's Mean Stress Theory. Se va observa că un ciclu de viață calculat corespunde unui ciclu real sub sarcina maximă a rolei. Ciclurile fără sarcină nu sunt luate în seamă. Statistic numărul de cicluri sub sarcină maximă în funcționare este de 425 zilnic, restul fiind cicluri în gol sau sub sarcini mici.

Tensiunile maxime von Mises sunt de 294 MPa în trei zone critice: lateralele găurilor discului rolei, zona

de racordare dintre disc și calea de rulare și calea de rulare propriu-zisă. Acestea zone sunt zone de risc crescut de apariție și propagare a fisurilor. Deformațiile echivalente maxime vor fi de 0,014% evident în aceleași zoneunde se dezvoltă câmpurile maxime de tensiuni. Cele mai mari deplasări le vor suferi lateralele căilor de rulare, cu maxime de 0,45 mm sub sarcina maximă, ceea ce indică o zonă de tensiuni intense pe calea de rulare. Factorul de siguranță în zona solicitată variază de la 1 spre 5. Concluzia este că rola sub sarcina maximă funcționează la „limita de siguranță” și arată că măsuri suplimentare de reproiectare sunt necesare pentru îmbunătățirea acestuia.

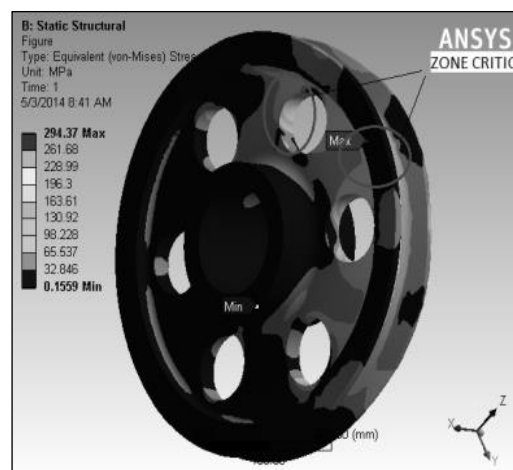


Fig. 2.2. Geometrie CAD și dimensiuni rolă inițială.

Calculul la oboseală și analiza duratei de viață a rolei sub sarcină maximă indică o situație de risc semnificativ. Numărul maxim de cicluri garantat în zonele critice este de 5927 cicluri ceea ce înseamnă 13 zile de funcționare, în condițiile în care numărul de cicluri mediu la încărcătură maximă a unei role exprimată statistic pe ziua de lucru este 425. Ca atare, acest design de rolă este un proiect cu grad semnificativ de risc iar reproiectarea devine o necesitate.

### 3. OPTIMIZAREA GEOMETRICĂ A ROLEI

Geometria optimă a unei role se poate găsi prin procedurile de Design Explorer - modul în soft-ul ANSYS 13<sup>TM</sup>.

Există multe metode de generare a acestor suprafețe de răspuns care leagă variația parametrilor de input de variația parametrilor de output din proiect. O metodă extrem de populară rămâne metoda Proiectării experimentelor (DOE-Design Of Experiments). Ca primă fază se stabilește câte puncte de proiectare sunt necesare pentru suprafețe de răspuns credibile. Acest lucru se face prin metode statistice, cea mai întâlnită fiind metoda Proiectului Central

Compozit (CCD-Central Composite Design). Spațiul de proiectare este matematic un spațiu multidimensional, de dimensiune egală cu suma parametrilor de input și de output. În scopul determinării suprafeței de răspuns și a candidatului optim, schema de optimizare este dată mai jos, în figura 3.1.

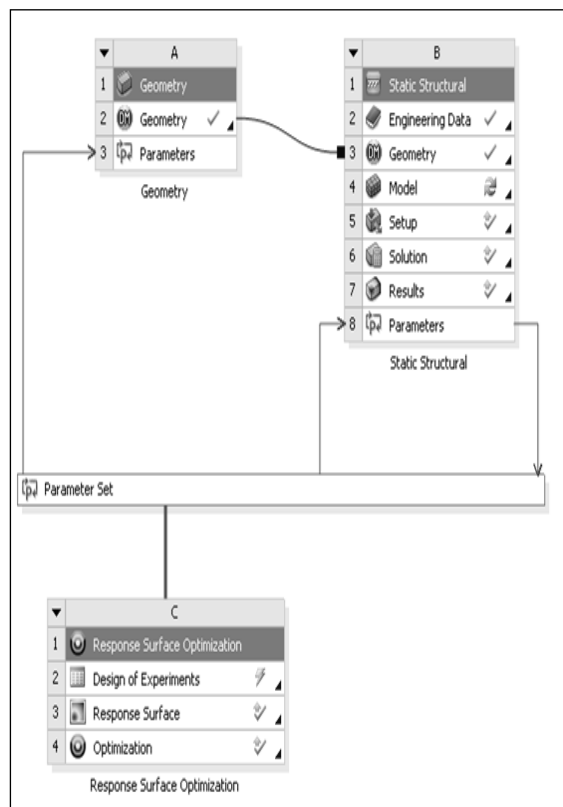


Fig. 3.1. Schema proiectului de optimizare.

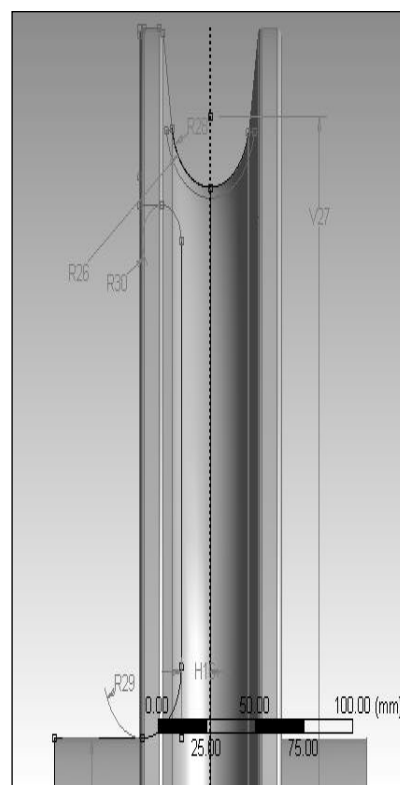


Fig. 3.2. Parametri de input Proiect inițial

Parametri de input sunt stabiliți încă din proiectarea geometrică și pot fi vizualizați în Tabelul 3.1.

Dintre toți parametrii de input, cei mai importanți sunt raza de racordare dintre discul rolei și calea de rulare și grosimea rolei.

Ca parametri de output s-au considerat cei din Tabelul 3.2

Tabelul 3.1. Parametri de output Proiect inițial

| Name    | P5 - Geometry Mass | P8 - Equivalent Stress Maximum | P9 - Safety Factor Minimum | P10 - Life Minimum |
|---------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Units   | Kg                 | MPa                            |                            |                    |
| Current | ⚡ 85.887           | ⚡ 294.37                       | ⚡ 0.95118                  | ⚡ 5927.8           |

Tabelul 3.2. Parametri de output Proiect inițial

|                   | Grosime Rola /2 (mm) | P3 - Diametru Butuc (mm) | P4 - DiametruGaura (mm) | P6 - Raza Racordare Superioara (mm) | P5 - Geometry Mass (kg) | P8 - Equivalent Stress Maximum (MPa) | P9 - Safety Factor Minimum | P10 - Life Minimum |
|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Candidate Point 1 | ⚡ 19.723             | ★ 91.355                 | ★ 119.38                | 16.58                               | ★ 72.914                | ★★ 218.59                            | ★ 1.3021                   | — 47877            |
| Candidate Point 2 | ⚡ 19.003             | ★★ 90.476                | ★★ 118.06               | 10.129                              | ★ 73.237                | ★ 226.27                             | — 1.2545                   | ⚡ 38069            |
| Candidate Point 3 | ⚡ 18.523             | ★★ 90.33                 | ★ 108.11                | 15.774                              | ★ 73.46                 | ★ 222.16                             | — 1.2561                   | ⚡ 34800            |

Masa rolei este importantă și trebuie minimizată dar nimic nu e mai important decât durata de viață a rolei care trebuie să fie maximizată. În orice caz, tensiunile echivalente influențează atât factorul de siguranță care trebuie maximizat cât și durata de viață.

La parametri de input proiectantul trebuie să stabilească valorile maxime și minime pe care le pot lua în cursul calculului suprafețelor de răspuns. Aceste minime și maxime trebuie definite cu grijă astfel încât să nu ducă la geometrii imposibile. Folosind metoda Proiectării experimentelor se generează automat punctele de proiectare care să acopere spațiul de proiectare. Acestea sunt în număr de 25 și și variază în funcție de parametri de input.

Odată definite punctele de proiectare de mai sus se procedează la calculul parametrilor de output pentru fiecare set de parametri de input dat. Acest proces poate dura mult în funcție de capacitatea calculatorului de calcul. În final rezulta parametri de output pentru fiecare punct de proiectare

În continuare se trece la determinarea celui mai bun candidat ca fiind proiectul optim. Pentru aceasta se impun o serie de cerințe fiecărui parametru de input și output în sensul descris mai sus, rezultând Tabelul 3.2 prezentat în continuare.

Evident primul candidat este cel ales (Candidatul 1 din tabelul de mai sus) de vreme ce acesta asigură cea mai mare durata de viață.

Inginerul proiectant are la îndemână un instrument foarte puternic de analiză și anume graficele analizelor de sensibilitate. Aceste grafice și suprafețele de răspuns asociate pot da indicații asupra influenței variației a perechi de parametri de input (luați doi câte doi) asupra unui parametru de output. În graficul de sensibilitate se pot deduce care parametri de input au o influență mai mare sau mai mică asupra parametrilor de output.

#### 4. ANALIZA NUMERICĂ A PROIECTULUI OPTIM DE ROLĂ

După detectarea proiectului optim de rolă, acum este cazul să modelăm numeric acest proiect pentru a se vedea dacă se dovedesc rezultatele deduse în subcapitolul anterior. Singurele diferențe vor fi că dacă diametrul găurii din disc este de 119.38 mm optim, acesta din rațiuni evidente va fi rotunjit la 120 mm, și așa mai departe. Aceste rotunjiri vor afecta rezultatele finale ale modelului optim real (față de cel teoretic cu dimensiuni nerotunjite) dat fiind că așa cum s-a văzut, dependențele pot fi exponențiale.

Pentru o bună comparație rezultatele calculului pentru proiectul inițial vor fi așezate alături de rezultatele proiectului optim. Această analiză servește și drept *validare* a procesului de optimizare.

Se constata ca tensiunile maxime sunt de 218 MPa în zonele critice la proiectul optim față de 294 MPa, ceea ce înseamnă o reducere cu 25% a acestora. Mai mult, distribuția câmpurilor de tensiuni din zona încărcată s-a îmbunătățit arătând o mai bună participare a masei de material la susținerea încărcării. Deformațiile echivalente urmează același trend ca și tensiunile, modelul optim având 0,01% iar cel inițial 0,014%.

Cele mai mari deplasări le vor suferi lateralele căilor de rulare, cu maxime de 0,45 mm sub sarcina maximă, ceea ce indică o zona de tensiuni intense pe calea de rulare la proiectul inițial. Proiectul optimizat va întoarce 0,12 mm ca deplasări, adică cu 74% mai mici, indicând un design mult mai robust și mai rezistent. Factorul de siguranță minim crește cu 28%, de la 1 la 1,28.

Referitor la durata de viață a rolei sub sarcină maximă inițială și optimizată, numărul maxim de cicluri garantat în zonele critice la proiectul inițial a fost de 5927 cicluri ceea ce înseamnă 13 zile de funcționare. La proiectul optimizat această durată de viață garantată este de 38.745 adică de 6,5 ori mai mare. Această durată de viață garantează 86 de zile de funcționare în deplină siguranță, dar ținând cont că apariția și dezvoltarea unei fisuri durează de cel puțin trei ori durata garantată de viață, se recomandă inspecția anuală a rolelor mai cu seamă în zona găurilor, în zona de racordare de sub calea de rulare și pe calea de rulare. Dacă nu sunt detectate fisuri următoarea inspecție se va face după 6 luni. După această perioadă rola poate fi folosită încă 3 luni după care trebuie înlocuită.

Evident aceste recomandări depind de cât de intens este folosită macaraua portuară de chei.

#### 5. CONCLUZII

Calculul de optimizare cu metoda elementelor finite oferă avantajul unui calcul foarte precis, contribuind la micșorarea greutatei pieselor proiectate și îmbunătățirii comportamentului în exploatare. Tensiunile maxime sunt în trei zone critice: lateralele găurilor discului rolei, zona de racordare dintre disc și calea de rulare și calea de rulare propriu-zisă. Acestea zone prezintă risc crescut de apariție și propagare a fisurilor. Cele mai mari deplasări le vor suferi lateralele căilor de rulare, ceea ce indică o zona de tensiuni intense pe calea de rulare. Factorul de siguranță în

zona solicitată variază de la 1 spre 5, ceea ce indică faptul că rola analizată sub sarcina maximă funcționează la „limita de siguranță” și sunt necesare măsuri suplimentare de reproiectare. Calculul la oboseală și analiza duratei de viață a rolei sub sarcină maximă indică o situație de risc semnificativ. În consecință, designul de rolă este un proiect cu grad semnificativ de risc iar reproiectarea devine o necesitate. Geometria optimă a rolei s-a putut identifica prin procedurile de Design Explorer – modul existent în soft-ul ANSYS 13™.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Dragomir, C., Scurtu, I. C., *Contribuții la optimizarea exploataării macaralelor portuare de chei*, Buletinul AGIR nr. 4/2018, noiembrie-decembrie, 2018, București, Romania.
- [2] Honiges, L., *Fosta Intreprindere de Constructii Metalice Bocsă, vândută la licitație*, România liberă, 13 mai 2006, <https://romanioliberal.ro/actualitate/proiecte-locale/fosta-intreprindere-de-constructii-metalice-bocsa-vanduta-la-licitatie-33243>, accesat la 17 noiembrie 2019
- [3] Dragomir, C., *Contribuții la optimizarea macaralelor portuare de chei cu graifăr mecanic*, Teză de doctorat, Universitatea Maritimă din Constanța, 2014

---

### Despre autor

Șef lucrări dr. ing. ec. **Cristina DRAGOMIR**  
Universitatea Maritimă din Constanța, Romania

Absolventă a studiilor doctorale în cadrul Universității Maritime Constanța, absolventă a studiilor de licență în inginerie marină, respectiv inginerie și management în domeniul maritim și portuar. În prezent, șef lucrări la Universitatea Maritimă din Constanța. Domenii de competență: Analiza și ingineria valorii, Mijloace de transport, Tehnologii de transport, Tehnica circulației.