

**UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

ing. CAMELIA PINCA-BRETOTEAN

**OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ
ALE UTILAJELOR METALURGICE**

Teză de doctorat

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA „POLITEHNICĂ”
TIMIȘOARA

**Conducător științific,
Prof. Dr. Ing. Eur. Ing. TIBERIU BABEU**
*Membru titular al
Academiei de Științe Tehnice din România*

2002

CUPRINS

Cuprins	
Introducere.....	1
CAP.1 CONSIDERAȚII GENERALE ASUPRA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE.....	5
1.1. Categoriile de structuri de rezistență întâlnite la utilajele metalurgice.....	5
1.1.1. Structuri de rezistență cu inimă plină.....	5
1.1.2. Structuri de rezistență cu zăbrele.....	7
1.2. Mărci de oțeluri folosite în construcția structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.....	10
1.3. Acțiuni mecanice datorate procesului de funcționare și efectul lor asupra structurilor de rezistență.....	14
1.4. Concluzii și contribuții personale.....	27
CAP.2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND CALCULUL ȘI OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE.....	28
2.1. Posibilități de modelare fizică și matematică în vederea calculului structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.....	28
2.1.1. Metode și procedee utilizate.....	28
2.1.2. Fundamentarea teoretică a metodei elementelor finite aplicată în calculul structurilor de rezistență.....	34
2.1.2.1. Alegerea modelelor de calcul în analiza cu elemente finite.....	34
2.1.2.2. Etape în alegerea modelelor de calcul.....	35
2.1.2.3. Principalele tipuri de elemente finite folosite în calculul structurilor de rezistență.....	37
2.1.2.4. Formularea ecuațiilor în elemente finite.....	42
2.1.3. Observații critice și concluzii.....	45
2.2. Considerații privind optimizarea structurilor de rezistență.....	48
2.2.1. Aspecte generale ale problemei optimizării.....	49
2.2.2. Etape și criterii de optimizare.....	53
2.2.3. Metode de optimizare.....	56
2.2.4. Evaluarea fazelor și analiza factorilor care influențează optimizarea unei structuri de rezistență.....	63
2.3. Concluzii asupra posibilităților actuale de optimizare.....	70
2.3.1. Oportunitatea optimizării în faza de proiectare.....	70
2.3.2. Concluzii asupra stadiului actual al optimizării.....	72
2.4. Concluzii și contribuții personale.....	74
CAP.3 STUDII TEORETICE PRIVIND COMPORTAREA SUB ÎNCĂRCĂRI A STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE.....	75
3.1. Considerații generale. Domeniul abordat.....	75
3.2. Studii teoretice asupra stării de tensiune din elementele structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN-17,3 m pe baza analizei cu elemente finite.....	77
3.2.1. Programul de studii și cercetări. Probleme abordate.....	77
3.2.2. Alcătuire structurală. Analiza geometriei elementelor componente, a ansamblului structurii de rezistență și a legăturilor dintre elemente.....	78

3.3. Modelarea numerică cu elemente finite a structurilor de rezistență a podurilor rulante.....	86
3.3.1. Modelul de calcul al structurii de rezistență al unui pod rulant utilizând elemente finite de tip BEAM 3.....	87
3.3.2. Rezultate obținute în urma analizei structurii cu elemente finite de tip BEAM 3.....	91
3.3.3. Modelul de calcul al structurii de rezistență al unui pod rulant utilizând elemente finite de tip placă subțire (SHELL 3).....	95
3.2.4. Rezultate obținute în urma discretizării structurii cu elemente finite de tip SHELL 3.....	104
3.4. Analiza calculelor efectuate și a rezultatelor obținute.....	135
3.5. Concluzii și contribuții personale cu privire la studiile teoretice privind comportarea sub încărcări a structurilor de rezistență a utilajelor metalurgice.....	138
CAP.4 STUDII EXPERIMENTALE EFECTUATE ASUPRA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE PODURILOR RULANTE AFLATE ÎN EXPLOATARE.....	138
4.1. Programul de cercetări experimentale. Obiective și etape.....	138
4.2. Măsurători efectuate. Rezultate obținute.....	139
4.3. Studiu comparativ între rezultatele obținute prin calcul și cele obținute prin măsurători experimentale.....	144
4.4. Concluzii și contribuții personale cu privire la studiile experimentale efectuate.....	153
CAP.5 STUDII DE OPTIMIZARE A UNOR ELEMENTE COMPONENTE ALE STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PODULUI RULANT DE 100 KN-17,3 m.....	154
5.1. Optimizarea dimensională a unei grinzi principale aparținând podului rulant.....	154
5.2. Concluzii și contribuții personale.....	163
CAP.6 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE.....	164
Bibliografie.....	172
ANEXE	
A.1 Verificarea geometriei podurilor rulante din hala unei oțelării. Fișa măsurătorilor executate pentru un pod rulant de 100KN.....	178
A.2 Fișierul de comenzi cu date de intrare în programul de calcul COSMOS/M, versiunea 2.5 pentru modulul GEOSTAR.....	179
A.3 Modelul geometric și de calcul al structurii de rezistență a podului rulant de 100KN - 17,3 m în urma analizei cu elemente finite SHELL 3D.....	188
A.4a Rezultate teoretice obținute în urma analizei structurii de rezistență a podului rulant 100 KN - 17,3 m cu elemente finite de tip SHELL 3D.....	193
A.4b Fișierul cu date de ieșire în analiza cu elemente finite de tip SHELL 3D a stării de tensiune și deformație.....	198
A.5 Rezultate experimentale obținute prin înregistrări electrotensometrice.....	202
A.6 Diagrame de variație a deformațiilor specifice înregistrate în lungul unei grinzi principale, în funcție de diferite sarcini de încărcare și poziții ale căruciorului pe structura de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m.....	214
A.7 Fișierul de comenzi cu date de intrare în programul de calcul COSMOS/M, versiunea 2.5 pentru modulul OPTSTAR.....	222

INTRODUCERE

Proiectarea rațională și exploatarea corectă a utilajelor metalurgice constituie la ora actuală o cerință primordială datorită influenței acestora asupra creșterii eficienței proceselor tehnologice la realizarea cărora participă aceste utilaje. Realizarea unui utilaj metalurgic, indiferent de destinația sa solicită în mod direct două compartimente principale și anume pe cel al proiectării și pe cel al execuției. În acest scop, se urmărește perfecționarea continuă a calculului acestora care în stadiul actual de dezvoltare se face pe baza unei metodologii orientată corespunzător spre specificul lor de funcționare și exploatare. Construcția utilajelor metalurgice a avut pe parcursul anilor o dezvoltare deosebită, pentru studiul lor existând la ora actuală o vastă literatură de specialitate care stă la baza progresului tehnic din acest domeniu.

Activitatea de proiectare a unui utilaj metalurgic cuprinde două secvențe de bază care se referă la structura de rezistență, respectiv mecanismele acestuia și este dirijată pe baza normativelor în vigoare.

O caracteristică importantă a proiectării structurii de rezistență a unui utilaj metalurgic constă în faptul că aceasta este un proces iterativ care se desfășoară prin aproximații succesive, operându-se asupra tuturor elementelor utilizate în activitatea de proiectare: tipul structurii, caracteristicile materialului, natura și valorile încărcărilor, metoda de calcul a tensiunilor și deformațiilor, metodele de dimensionare, prețul de cost al materialelor. În acest fel, se pornește de la o structură dată, ca schemă generală de alcătuire și distribuție a materialului în secțiune, care trebuie să răspundă favorabil acțiunilor ce o solicită și se corectează apoi distribuția materialului în secțiune, pentru ca structura să suporte încărcările date cu un consum minim de material. Astfel, operațiile de verificare alternează cu cele de proiectare propriu-zisă, acest proces continuând până la obținerea unei *variante constructive optime* pentru structura de rezistență. Obținerea acestui proiect optim presupune considerarea tuturor elementelor ce intervin în proiectare, cât mai aproape de situația reală din exploatare. Datorită volumului mare de calcul, considerarea acestor elemente se face prin schematizări ale fenomenelor reale, care se referă la: proprietățile fizice ale materialului; modul de rezemare al structurii; modul de manifestare al acțiunilor și de aplicare pe structură, modul de distribuție al tensiunilor și deformațiilor în secțiunile elementelor structurii.

În ceea ce privește proprietățile materialelor folosite la fabricarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, acestea se referă la următoarele caracteristici: continuitate, omogenitate, izotropie, elasticitate, plasticitate, duritate, fragilitate, deformabilitate și rigiditate. La ora actuală, concepția asupra materialului a evoluat de la tipul elastic, omogen și izotrop, la considerarea acestuia în domeniul elastic, elastic-plastic liniar sau neliniar sau elastic – vâscos - plastic, în funcție de cum își păstrează sau nu în timp, caracteristicile fizice în funcție de starea de solicitare.

În calculul structurilor, simultaneitatea sarcinilor este o problemă importantă din punct de vedere practic, datorită faptului că pe parcursul exploatării, utilajele din care fac parte aceste structuri de rezistență sunt supuse unor acțiuni, a căror grupare teoretică nu este întotdeauna

acceptabilă în realitate, fără anumite rezerve. În cazul în care mai multe sarcini solicită utilajul este foarte puțin probabil ca intensitatea lor să fie simultan la nivelul valorilor maxime. O compensare a acestei situații se poate face prin considerarea valorilor sarcinilor cu coeficienți de reducere, care în stadiul actual sunt apreciați pe bază de experiență și intuiție inginerescă. Deoarece, în cazul acțiunii simultane a mai multor încărcări, problema se complică, în calculul simultaneității acțiunilor este necesar să fie introduse ipoteze și schematizări simplificatoare. În acest sens, valorile încărcărilor, grupările acestora și modul de considerare în calcul sunt stabilite pe baza normativelor în vigoare, datele oferite de acestea fiind fixate în urma unui număr mare măsurători sau pe baza unor studii statistice.

În general, reprezentarea acțiunilor se face pe baza unor scheme de încărcare în care se specifică forțele, deplasările sau deformațiile impuse, sub forma parametrilor care le definesc. Acțiunile se definesc fie individual, fie în ansamblul în care ele se pot grupa, iar combinațiile dintre diferitele tipuri de sarcini a căror acțiune este simultană, formează *ipotezele de încărcare*. Parametrii ce caracterizează o sarcină și grupările acestora, pot fi definiți determinist, prin valori numerice unice, sau statistic, ceea ce presupune că acești parametri sunt definiți prin valori numerice care arată probabilitatea de apariție a acesteia.

În ceea ce privește schema de calcul care modelează din punct de vedere geometric structura de rezistență, la ora actuală se consideră *schema de calcul spațială*, care ia în considerare forma complexă a structurii.

Cele mai adecvate metode pentru stabilirea distribuției tensiunilor și deformațiilor în structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice sunt *metodele numerice*, în cadrul cărora dimensionarea, verificarea sau optimizarea unei structuri sau a unei părți componente a acesteia se face prin înlocuirea corpului continuu cu un ansamblu de elemente discrete, legate între ele prin noduri, numite elemente finite, [48], [57], [62], [74], [86], [100]. Astfel, corpul continuu real este substituit cu un câmp de valori ce prezintă discontinuități ale tensiunilor și deformațiilor la limita dintre elementele finite. Deoarece, volumul informațiilor furnizate de calculator este foarte mare, (fapt dependent direct de numărul elementelor finite); utilizarea unei rețele cu un număr cât mai mare de elemente finite reduce discrepanța dintre caracterul continuu al informațiilor obținute prin programul de calcul și situația reală din practică. De asemenea, utilizarea unor elemente finite cât mai complexe prezintă avantajul eliminării acestei discrepanțe, ele modelând mai fidel structura reală.

Având în vedere aspectele anterior prezentate, calculele realizate pe baza acestor ipoteze vor conduce la rezultate care au un anumit grad de aproximare față de situația reală. În scopul verificării acestor ipoteze se realizează experimentări industriale care au rolul de a confirma posibilitatea acceptării ipotezelor simplificatoare adoptate.

Așa cum arată literatura de specialitate [46], [57], [83], la ora actuală, în calculul și proiectarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice se adoptă soluții acoperitoare care duc la supradimensionarea acestora. Apare astfel problema optimizării acestor structuri care necesită efectuarea unor calcule laborioase ce presupun introducerea unor parametri variabili în limite foarte largi, și care în final trebuie să conducă la o corelare optimă între starea deformată a structurii și consumul de material, acesta fiind unul dintre obiectivele urmărite în această lucrare.

Aceste aspecte, preocupări și concluzii justifică importanța elaborării tezei de doctorat cu titlul „**Optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice**”, în cuprinsul căreia s-a urmărit prezentarea sistematică a stadiului actual al cercetărilor privind calculul și optimizarea structurilor de rezistență, precum și abordarea modernă a acestor probleme folosind tehnica actuală de calcul, cu referiri concrete asupra unui pod rulant care funcționează în hala unei oțelării dintr-un combinat siderurgic. Teza este structurată pe șase capitole și cuprinde un număr de 129 referiri bibliografice.

Capitolul I al tezei intitulat „**Considerații generale asupra structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice**” cuprinde o prezentare generală a principalelor tipuri de structuri de rezistență ale utilajelor metalurgice, a mărcilor de oțeluri folosite în construcția acestor structuri, a tipurilor de acțiuni mecanice datorate procesului de exploatare, precum și efectul lor asupra acestor structuri de rezistență. În scopul evidențierii unor încărcări cu efect defavorabil asupra structurii de rezistență care pot apare în exploatarea utilajelor metalurgice, în acest capitol s-au făcut referiri directe asupra unui pod rulant care funcționează în hala unei oțelării dintr-un combinat siderurgic

Capitolul II al tezei intitulat „**Stadiul actual al cercetărilor privind calculul și optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice**” a fost structurat pe două direcții referitoare la calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, respectiv optimizarea acestora. În ceea ce privește calculul, în cadrul acestui capitol s-a prezentat stadiul actual al cercetărilor din acest domeniu, cu prezentarea posibilităților de modelare fizică și matematică a structurilor de rezistență, precum și a metodelor și procedurilor de calcul utilizate. În ceea ce privește optimizarea, s-a realizat o sistematizare a sintezei bibliografice cuprinzând aspectele generale ale problemei optimizării, etapele și criteriile de optimizare, metodele de optimizare, fazele și factorii care influențează optimizarea unei structuri de rezistență.

Capitolul III al tezei intitulat „**Studii teoretice privind comportarea sub încărcări a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice**” abordează o analiză teoretică a unui pod rulant aflat în exploatare, iar rezultatele obținute permit efectuarea unei evaluări a modului de comportare sub încărcări, a structurii de rezistență a acestui utilaj. Evaluarea modului de comportare în exploatare a structurilor de rezistență ale podurilor rulante sub acțiunea încărcărilor, precum și optimizarea acestora, se poate realiza cunoscând starea de tensiune și deformație din structura de rezistență a utilajului, ceea ce implică necesitatea unei modelări fizice și matematice cât mai apropiate de structura reală aflată în exploatare. Pentru cunoașterea acesteia s-a efectuat o modelare numerică a structurii de rezistență a podului rulant, folosind două tipuri de elemente finite și programul de calcul COSMOS/M. Programul de studii și cercetările efectuate în acest sens, au avut ca obiectiv obținerea datelor necesare modelării structurii de rezistență a podului rulant și efectuarea calculelor, în vederea analizei stării de tensiune și deformație din elementele acesteia, cu scopul efectuării unei optimizări dimensionale.

Capitolul IV al tezei intitulat „**Studii experimentale efectuate asupra structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN –17,3 m aflat în exploatare**” s-a realizat un studiu experimental asupra structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN –17,3 m folosind metodele tensometriei electrice, în scopul validării studiului teoretic efectuat în capitolul anterior. Astfel, analiza experimentală industrială a determinat tensiunile din structura de rezistență a podului rulant

aflat în exploatare. Măsurătorile experimentale s-au realizat în regim static, considerând 20 de ipoteze de încărcare 20 de ipoteze. Pentru aceste ipoteze de încărcare s-au determinat deformațiile în șase secțiuni, considerate semnificative, aparținând structurii de rezistență a unui pod rulant. De asemenea, în acest capitol se prezintă și un studiu comparativ între rezultatele obținute experimental și cele analitice, care pune în evidență rezervele de rezistență de care dispune structura de rezistență a acestui utilaj metalurgic.

Capitolul V al tezei intitulat „**Studii de optimizare a elementelor componente ale structurii de rezistență a podului rulant de 100KN –17,3 m**” realizează un studiu de optimizare asupra unei grinzi principale din structura de rezistență a podului rulant considerat. În vederea realizării acestei optimizări, s-a utilizat modulul OPTSTAR, aparținând programul COSMOS/M, versiunea 2.5. În urma efectuării mai multor rulări s-a obținut o reducere a grosimii tălpilor și inimilor secțiunilor transversale a grinzii analizate, în condițiile încadrării tensiunilor și deformațiilor corespunzătoare în limitele celor admisibile, ceea ce reprezintă o reducere a greutatea acesteia cu aproximativ 8,64 %.

Capitolul VI al tezei intitulat „**Concluzii și contribuții la optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice**” prezintă concluzii și perspective de perfecționare a cercetărilor din acest domeniu. De asemenea sunt prezentate contribuțiile autoarei privind optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice și unele recomandări cu privire la posibilitățile de analiză a stării de tensiune, deformație și optimizare a acestor structuri de rezistență.

CAPITOLUL 1

CONSIDERAȚII GENERALE ASUPRA STRUCTURILE DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

Structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice sunt construcții metalice alcătuite din elemente (bare, plăci) legate între ele în diferite noduri, formând sisteme spațiale complexe, [49]. Elementele cele mai importante care intră în alcătuirea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice sunt: *grinzile cu zăbrele și grinzile cu inimă plină*. Aceste elemente sunt formate din unul sau mai multe laminate (profile, platbande, table) legate între ele prin sudură, nituri sau șuruburi. Alcătuirea lor trebuie să asigure prinderea corectă a barelor, întreținerea ușoară în timpul exploatării, rigiditate la transport și montaj, consum minim de energie pentru execuție și întreținere, posibilitatea recuperării unor subansamble sau elemente în cazul dezafectării utilajului, motiv pentru care se impune folosirea elementelor standardizate într-o varietate nu prea mare de forme constructive. Din punct de vedere al formei constructive, aceste elemente trebuie să se adapteze naturii și variației tensiunilor, atât în secțiune transversală, cât și în secțiune longitudinală, [49], [57],[69].

1.1.CATEGORII DE STRUCTURI DE REZISTENȚĂ ÎNTÂLNITE LA UTILAJELE METALURGICE

1.1.1. Structuri de rezistență cu inimă plină

Grinzile cu inimă plină sunt elemente de rezistență foarte frecvent folosite la alcătuirea construcțiilor metalice. Întrebuințarea lor pe scară largă la confecționarea structurilor de rezistență derivă în primul rând dintr-o bună comportare a acestora sub acțiunea încărcărilor din exploatare, precum și datorită rezervei de rezistență pe care o prezintă. Totodată, grinzile cu inimă plină se caracterizează printr-o execuție relativ simplă care, în cazul utilizării îmbinărilor prin sudură, permite automatizarea majorității operațiilor de fabricație. De asemenea, secțiunile grinzilor cu inimă plină pot fi ușor adaptate la variația solicitărilor din exploatare, fapt care conduce la dimensiuni optime ale secțiunilor și obținerea unor economii maxime de oțel.

Din punctul de vedere static, grinzile cu inimă plină pot fi simplu rezemate, continue - cu sau fără articulații - sau pot face parte din structura unui cadru. Prin calcule statice se determină solicitările în secțiunile grinzilor, care provin din încărcări, conform prescripțiilor din normele în vigoare, solicitări pe baza cărora se efectuează dimensionarea ori verificarea secțiunilor impuse.

Din punct de vedere al concepției de alcătuire și al modului de execuție, grinzile folosite la fabricarea structurilor de rezistență pot fi grupate în următoarele categorii:

- grinzi realizate din profile laminate;

- grinzi alcătuite din elemente asamblate prin nituire;
- grinzi confecționate din elemente asamblate prin sudură.

Grinzile din prima categorie, alcătuite din profile laminate I sau \square , se folosesc la structurile de rezistență cu deschideri și încărcări relativ mici, datorită dimensiunilor limitate în care se fabrică aceste profile.

Grinzile executate prin asamblări nituite, se folosesc tot mai rar în ultimul timp, din cauza tehnologiei de execuție mai complicate și a dezavantajelor pe care le au îmbinările nituite în comparație cu cele sudate.

Grinzile alcătuite din elemente asamblate prin sudură se întâlnesc cel mai frecvent în practică și se caracterizează prin economicitate, simplitate și precizia execuției.

Dintre cele trei categorii de grinzi anterior prezentate, la confecționarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice se folosesc cu precădere grinzi sudate, datorită facilităților cu care se realizează asamblarea, prinderea și rezemarea lor. În funcție de mărimea și natura solicitărilor la care sunt supuse precum și din anumite considerente economice și constructive, în continuare se analizează diferite soluții de alcătuire a grinzilor utilizate pentru realizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.

Alături de grinzi clasice cu inimă plină, care au secțiunea transversală de formă I în construcție sudată, sau din profile I laminate, o soluție constructivă eficientă se obține prin tăierea inimii profilelor ca în fig. 1.1 a, urmată de decalarea și sudarea celor două jumătăți ca în fig. 1.1 b,c. În acest mod se obțin așa numitele **grinzi ajurate**, care prezintă o creștere a caracteristicilor geometrice (moment de inerție și modul de rezistență) fără consumuri suplimentare de material.

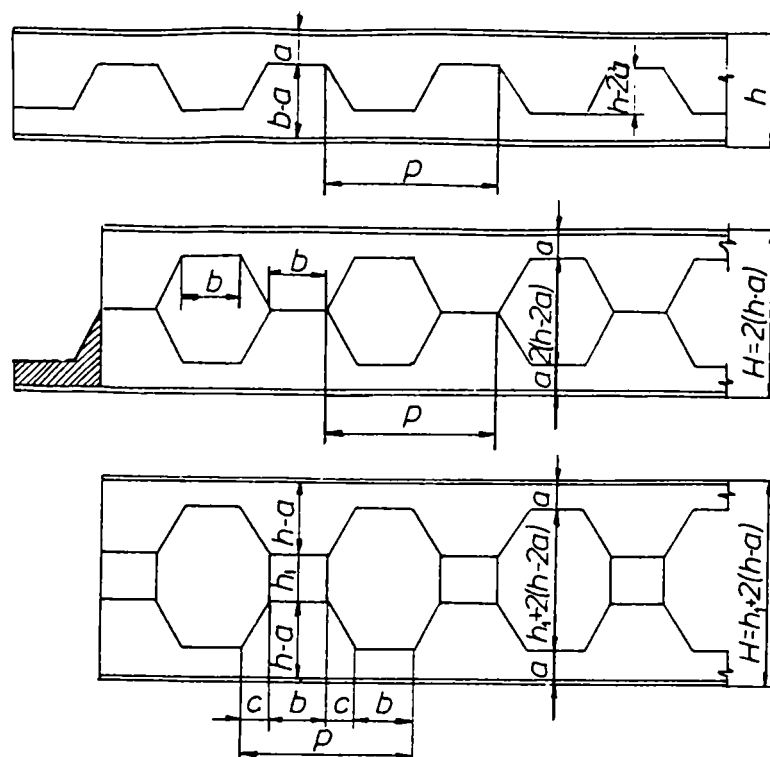


Fig.1.1 a,b,c. Grindă ajurată

Grinzile ajurate se obțin din profile I, printr-o tăiere specială a inimii, după linii în zig-zag sau arce de cerc, urmată de o sudare a celor două părți rezultate, astfel încât să se obțină secțiuni de

înălțime mai mare. În funcție de modul de tăiere, se pot obține grinzi ajurate cu goluri hexagonale, (fig. 1.1.b), respectiv octogonale (fig. 1.1.c).

În cazul unor încărcări concentrate foarte mari pe talpa superioară, cum ar fi de exemplu, presiunea exercitată de roțile podurilor rulante, devine rațională alcătuirea grinzilor sudate cu două grosimi de inimă și o rigidizare longitudinală continuă (fig. 1.1.c), cu rol de rezistență.

În cazul utilajelor metalurgice cu capacitate mare de ridicare și cu deschideri mari, soluția de

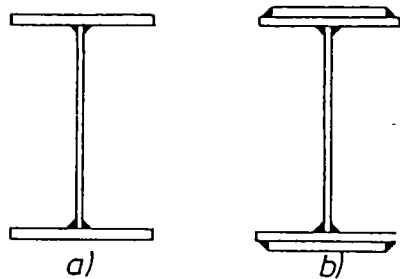


Fig. 1.2. a, b. Grinzi sudate

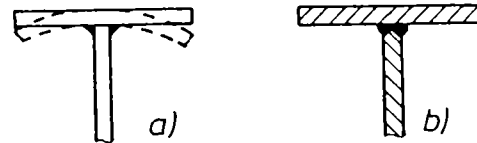


Fig. 1.3. Legătură realizată între inimă și talpi
a - sudură de colț; b - sudură în K

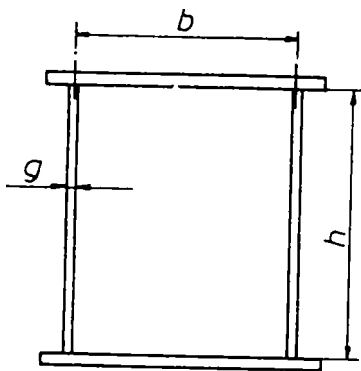


Fig. 1.4. Grindă cheson

utilizată este cea în care se realizează o inimă și două talpi realizate din câte o platbandă ca în fig. 1.2.a sau cu talpi realizate din câte două platbenzi, ca în fig. 1.2.b. Legătura dintre inimă și talpi se realizează frecvent prin suduri de colț, fig. 1.3.a, care au însă dezavantajul că provoacă la răcire deformații ale tălpilor. De aceea se referă utilizarea sudurilor în K, fig. 1.3.b, care sunt des folosite pentru platbenzi cu grosime mai mare, datorită faptului că elimină dezavantajul precedent.

În cazul utilajelor metalurgice de tipul podurilor rulante, cu regim de funcționare greu și foarte greu, cele mai frecvente situații întâlnite sunt acelea în care înălțimea grinzii este limitată, iar încărcările de exploatare pe care trebuie să le suporte sunt foarte mari. În aceste cazuri, grinda se poate realiza cu secțiune transversală închisă, denumită **grindă cheson**, caracterizată printr-o capacitate mai mare de a prelua momentul de răsucire, în comparație cu secțiunile deschise. Aceasta este alcătuită din două inimi și două talpi, ce formează un element de rezistență cu rigiditate mare la încovoiere și răsucire, asigurată de conlucrarea unitară a subansamblelor componente, fig. 1.4.

1.1.2. Structuri de rezistență cu zăbrele

Grinzile cu zăbrele alcătuiesc o categorie de elemente frecvent utilizate la confecționarea construcțiilor metalice datorită faptului că structurile de rezistență realizate sunt deosebit de rigide, economice, din punct de vedere al consumului de oțel și relativ ușor de executat. Realizate cu forme și dimensiuni de o mare diversitate, grinzile cu zăbrele satisfac cerințele impuse de condițiile tehnologice, de execuție și exploatare a construcțiilor metalice la a cărei realizare participă.

Forma grinzilor cu zăbrele depinde de destinația construcției și de legătura dintre grinda cu zăbrele și elementele pe care le susține.

Pentru structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice și la grinzile căilor de rulare ale acestora sunt folosite, grinzile de formă dreptunghiulară, cu tălpi paralele, fig.1.5 și fig.1.6.

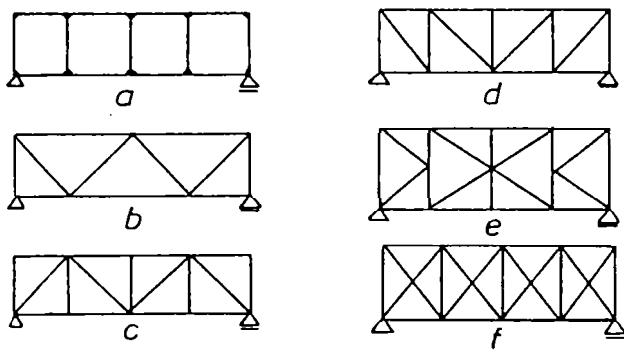


Fig.1.5. Tipuri de grinzi cu zăbrele

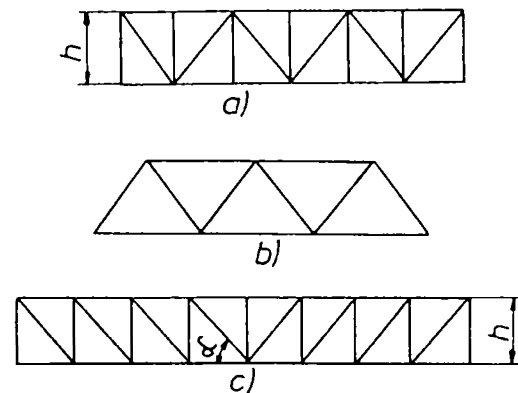


Fig.1.6. Grinzi cu zăbrele folosite la structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice și la grinzile căilor de rulare ale acestora

Principalele elemente care le caracterizează sunt: deschiderea, înălțimea și înclinarea diagonalelor grinzilor cu zăbrele.

Tensiunile din tălpile unei grinzi cu zăbrele sunt cu atât mai mici cu cât înălțimea grinzilor este mai mare. În cazul diagonalelor, aceste tensiuni nu depind de înălțimea grinzilor, ci numai de înclinarea acestora. Aceasta înseamnă că dacă înălțimea grinzii crește, atunci greutatea tălpilor scade, datorită faptului că odată cu scăderea tensiunilor din tălpi, scade și secțiunea acestora. Greutatea diagonalelor grinzilor crește datorită lungirii lor, pe de o parte și a sporului de secțiune suplimentar al barelor comprimate, pe de altă parte. În această situație există o anumită înălțime optimă pentru care greutatea grinzii cu zăbrele este minimă.

În practică însă, înălțimea grinzilor cu zăbrele se deduce din condiții de rigiditate, aceasta rezultând în funcție de deschiderea grinzii. Astfel, în cazul grinzilor cu zăbrele cu tălpi paralele, înălțimea lor se stabilește cu relația: $h = (1/10 \dots 1/6) l$. În ceea ce privește unghiul optim de înclinare al diagonalelor grinzilor cu zăbrele, acesta este cuprins în intervalul $35^\circ \dots 50^\circ$.

La împărțirea interioară în panouri a grinzilor cu zăbrele trebuie să se țină seama de următoarele principii:

- se va căuta ca numărul nodurilor grinzii să fie cât mai mic, deoarece prezența în fiecare nod a gușelor, mărește consumul de oțel;
- numărul nodurilor nu trebuie să fie prea mic, deoarece ar impune creșteri excesive ale lungimilor barelor, fapt care la barele comprimate ar duce la micșorarea coeficientului de flambaj φ și în consecință la dimensiuni mari ale secțiunilor transversale;
- unghiurile de înclinare ale barelor nu trebuie să fie prea mici, deoarece aceasta ar duce la lungimi mari ale diagonalelor, care la prinderea în noduri ar necesita gușee lungi, sporind consumul de oțel;

- barele grinzilor cu zăbrele trebuie să fie prinse în noduri astfel încât, axele centrelor lor de greutate să se întâlnească în nodurile teoretice;
- secțiunile barelor trebuie să fie simetrice față de planul grinzii cu zăbrele.

În general, barele grinzilor cu zăbrele sunt alcătuite cu secțiuni transversale foarte variate, obținute ca secțiuni compuse, realizate fie din profile metalice ușoare cu pereți subțiri, fie din profile laminate grele.

La alcătuirea secțiunii barelor trebuie să se țină seama de următoarele recomandări:

- secțiunea aleasă să dea posibilitatea de a folosi cât mai rațional materialul;
- secțiunea se alege astfel încât să fie formată din elemente care pot fi prinse ușor în noduri;
- secțiunile barelor comprimate să fie alese astfel încât să conducă la raze de girații cât mai mari, deci materialul să fie cât mai depărtat de axa barei.

Astfel, forma sistemului cu zăbrele se va alege ținând seama de deschiderea grinzii, mărimea încărcărilor, modul de aplicare al sarcinilor și tipul rezemării, adică forma grinzii cu zăbrele trebuie să corespundă schemei statice de încărcare, deci să fie pe cât posibil în concordanță cu diagrama de momente încovoietoare corespunzătoare.

Tensiunile care apar în bare se determină separat pentru fiecare solicitare, urmând ca efectele lor să se obțină prin suprapunerea acestora, ținând seama de posibilitățile reale de suprapunere a efectelor. Solicitățile în bare se pot determina fie prin metoda stărilor limită, pe baza încărcărilor normate, înmulțite cu coeficienții acțiunilor și luând în considerare încărcările fundamentale și cele suplimentare, fie prin metoda rezistențelor admisibile, luând în considerare încărcările fundamentale și apoi pe cele accidentale. În cazul grinzilor cu deschideri mari, pentru a reduce volumul calculelor analitice, se poate recurge la calcul automat, pe bază de programe de calcul.

În general, oricare din structurile de rezistență prezentate anterior poate fi considerată ca un ansamblu de bare ale căror componente sunt orientate după orice direcție, formând structuri spațiale, capabile să preia și să transmită sarcinile din exploatare. Comportarea spațială a structurilor de rezistență, datorată conlucrării tuturor componentelor, oferă o multitudine de avantaje tehnico - economice.

În comparație cu concepția relativ generală de a trata în mod obișnuit structurile ca fiind constituite din ansambluri plane, în ultimul timp, ca urmare a necesităților economice și a posibilităților tehnicii moderne de calcul automat, se pune problema revizuirii acestei concepții prin considerarea unor scheme de calcul spațiale, apropiate de cele reale. Aceasta conduce implicit la economie de material consumat pentru realizarea acestor structuri și la reproiectarea lor pe baza interpretării mai exacte a rezultatelor.

Restrângând analiza la cazul particular al *structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice*, acestea sunt construcții cu o alcătuire spațială și deci calculul lor riguros necesită rezolvarea unor structuri spațiale. În practică însă, este posibil să se neglijeze o serie de efecte de importanță secundară, fără ca precizia calculelor să fie influențată substanțial, structura spațială putând fi descompusă într-o serie de structuri plane.

Modul de distribuție al barelor în structurile obținute, respectiv topologia acestor tipuri de

structuri de rezistență, precum și numărul legăturilor necesare invariabilității lor geometrice și fixării în plan, presupune rezolvarea în calculele de proiectare fie a unor probleme static determinate, fie a unora static nedeterminate.

De regulă, calculul acestor structuri se aplică asupra unei imagini schematizate a realității, iar rezultatelor li se imprimă prin aceasta un caracter convențional, în sensul că valabilitatea lor este condiționată de măsura în care ipotezele inițiale pot fi considerate ca fiind justificate. Astfel, calculul unei structuri metalice apare ca un calcul condus cu un anumit grad de aproximare, iar metodele de calcul utilizate în practică, bazate pe ipoteze simplificatoare și schematizări, își găsesc justificarea doar în concordanța satisfăcătoare între rezultatele determinate prin calcul și datele obținute experimental.

În aceste condiții, datele experimentale și limitele lor de concordanță cu rezultatele calculelor sunt singurele criterii care pot justifica acceptarea ipotezelor simplificatoare și a schematizărilor aferente folosite. De aceea, tendința actuală în elaborarea bazelor calculului structurilor de rezistență se caracterizează prin perfecționarea schematizărilor și încadrarea lor între limite cât mai aproape de fenomenele reale pe care le modelează.

1.2 MĂRCI DE OȚELURI FOLOSITE ÎN CONSTRUCȚIA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

În general, alegerea unui material de construcție este o problemă complexă ce are la bază necesitatea realizării unor structuri de rezistență în condiții de eficiență tehnică și economică ridicată.

Îndeplinirea în exploatare a rolului pentru care au fost proiectate, impune ca structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice să fie capabile de a prelua solicitările la care sunt supuse, în condiții de economicitate maximă, atât în execuție cât și în exploatare, asigurând o anumită durată prescrisă de viață, în condiții de siguranță deplină. În acest sens, criteriile de funcționalitate ce trebuie satisfăcute în cazul acestor utilaje se reflectă atât în alegerea soluției de ansamblu, cât și a soluțiilor pentru principalele elemente componente ale structurilor de rezistență. Astfel, alegerea judicioasă a materialului din care este confecționată o structură de rezistență se face ținând seama de numeroși factori, dintre care cei mai importanți pot fi considerați:

- destinația și rolul construcției metalice a cărei structură de rezistență se proiectează;
- tehnologia de fabricație a elementelor de rezistență și a modului de îmbinare și asamblare a acestora în structură;
- condițiile specifice de exploatare, sub aspectul acțiunii factorilor de mediu asupra structurii proiectate.

Tendința generală actuală în construcția structurilor de rezistență a utilajelor metalurgice este îndreptată spre adoptarea structurilor sudate, datorită posibilităților de obținere a unor însemnate economii de material.

Comportarea sub încărcările din exploatare a elementelor structurilor de rezistență metalice alcătuite din profile laminate la cald, asamblate prin sudură, este influențată de caracteristicile de utilizare a oțelurilor, [116]. În cazul oțelurilor pentru construcții metalice și structuri sudate,

principalele caracteristici de utilizare se grupează în două categorii:

- caracteristici mecanice de rezistență;
- caracteristici tehnologice de sudabilitate.

Aceste caracteristici sunt dependente, la rândul lor, de o serie de factori metalurgici, caracteristici tehnologiei de fabricație, cum sunt:

- compoziția chimică și practica de dezoxidare la elaborare;
- mărimea granulației;
- regimul de temperaturi și gradul de deformare la laminare;
- grosimea de produs.

Factorii menționați au, după [54], o influență semnificativă atât asupra caracteristicilor mecanice ale oțelurilor, cât și a celor de tenacitate și plasticitate.

În fig.1.7 este exemplificată, după [43], analiza dependenței valorice dintre caracteristica mecanică - limita de curgere - și procentul de carbon echivalent, respectiv alungirea procentuală după rupere. În ceea ce privește clasa de calitate, aceasta diferențiază oțelurile încadrate în aceeași marcă, după calitățile pe care le au privind îndeosebi comportarea la solicitări variabile, dinamice și la temperaturi joase.

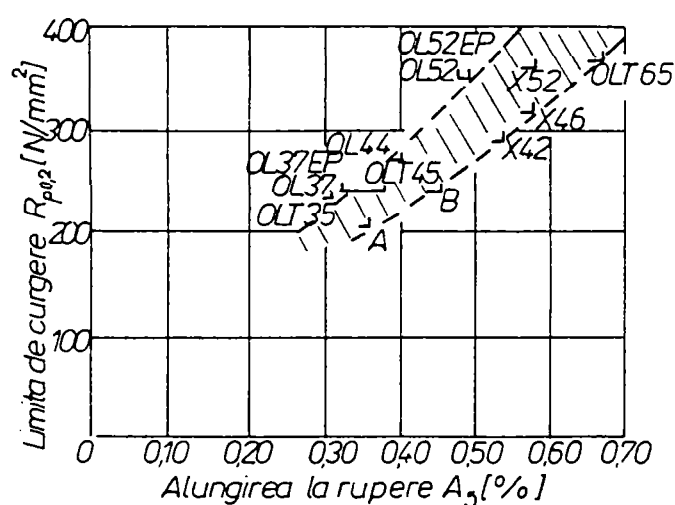


Fig.1.7.a. Variația limitei de curgere cu indicele de carbon echivalent la produsele laminate la cald din oțeluri de uz general

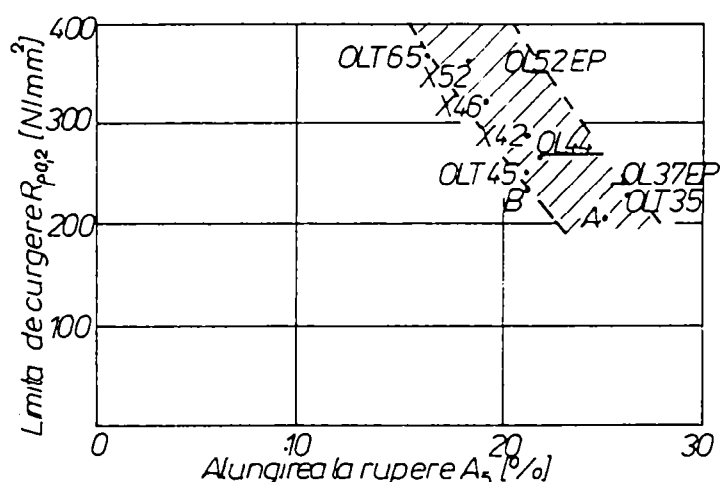


Fig.1.7.b. Variația alungirii la rupere în funcție de limita de curgere la produsele laminate la cald din oțeluri de uz general

După normele în vigoare din țara noastră, [120], clasa de calitate se adoptă pe baza coeficientului de periculozitate, ținând seama de importanța și modul de solicitare al elementului, temperatura minimă de exploatare și grosimea produsului. În cazul podurilor rulante, alegerea clasei de calitate a oțelului din care se confecționează structura lor de rezistență, se face conform prevederilor STAS R 8542-79, fig. 1.8.

Realizarea unor construcții metalice sudate durabile, cu o bună comportare în exploatare este determinată de conservarea tenacității îmbinărilor și a cusăturilor sudate. Tenacitatea îmbinărilor sudate reprezintă un factor strâns legat de noțiunea de sudabilitate a oțelurilor care, la rândul ei, este

Temperatura minimă de proiectare, °C	Grosimea produsului [*] , mm															
	0	10	20	30	40	50	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
Coeficient de periculozitate 5-A+3-D																Clasa de calitate 7
						30										Clasa de calitate 6
						30 25										Clasa de calitate 5
						30 25 20										Clasa de calitate 4
						30 25 20 15										Clasa de calitate 3
						30 25 20 15 10										Clasa de calitate 2
						30 25 20 15 10 05										Clasa de calitate 1 (oțel necălmăț)
					25 20 15 10 05										Clasa de calitate 2 (oțel călmat)	
					20 15 10 05										Clasa de calitate 1 (oțel necălmăț)	

^{*} Pentru rîfil ... grosimea medie a tălpii

Fig.1.8. Alegerea clasei de calitate a oțelurilor pentru structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice

dependentă de numeroși factori și reprezintă o caracteristică complexă ce determină, în condiții de sudare date, aptitudinea tehnică a oțelurilor pentru realizarea anumitor îmbinări.

Principalii factori care influențează sudabilitatea oțelurilor sunt: proprietățile fizico - mecanice ale oțelului determinate de compoziția chimică și procedeul de elaborare, condițiile tehnologice și procedeul de sudare folosit, concepția constructivă adoptată, tendința de fisurare la cald sau la rece a oțelului, condițiile de lucru ale elementelor sudate, natura și nivelul solicitărilor, temperatura de serviciu. Sudabilitatea oțelurilor poate fi caracterizată, în general, prin două aspecte: comportarea acestora la sudare și siguranța în exploatare a îmbinării sudate.

Comportarea oțelurilor la sudare în condiții optime se caracterizează prin posibilitatea ca în urma aplicării unei anumite tehnologii, în concordanță cu metoda de sudare, să se obțină o îmbinare sudată de bună calitate, tenace și fără defecte.

În ceea ce privește siguranța în exploatare, acesta este definită de însușirea îmbinării sudate, realizată într-o structură de rezistență al cărei material a suferit influența unei anumite tehnologii de sudare și care este supusă la anumite solicitări, de a nu i se altera în măsură inacceptabilă calitățile tehnice și de a nu prezenta tendință spre rupere fragilă la temperatura de exploatare.

Efectele proprii procesului de sudare - creșterea granulației, modificările de structură, tensiunile reziduale - determină o tendință de fisurare la rece a îmbinărilor sudate în directă legătură cu compoziția chimică a oțelului, aportul de căldură și hidrogen la sudare, viteza de răcire după sudare. Dacă primul dintre acești factori este propriu mărcii de oțel, următorii sunt caracteristici procedurii, tehnologiei de sudare și grosimii produselor.

Oțelurile de uz general folosite la confecționarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice pot fi sudate prin toate procedeele aplicate industrial, fără să necesite, de obicei, precauții deosebite privind regimul termic de sudare sau alegerea materialelor de adaos, [43]. Totuși, în cazul produselor cu garanții de tenacitate la temperaturi scăzute sau cu grosimi mari, se recomandă uscarea sau preîncălzirea zonei de tăiere sau sudare, folosirea unor materiale de adaos cu conținut redus de hidrogen, limitarea energiei liniare de sudare ori detensionarea după sudare. Unele recomandări în acest sens, rezultă din diagramele trasate în fig.1.9, prezentate în lucrarea [43], în care valoarea energiei liniare de sudare este calculată cu relația:

$$E = k \cdot \frac{60 \cdot U \cdot I}{10000 \cdot v} \quad [\text{KJ/mm}]$$

în care: k- factor geometric; U - tensiunea de sudare [V]; I - intensitatea curentului de sudare [A];
v - viteza de sudare [cm/min].

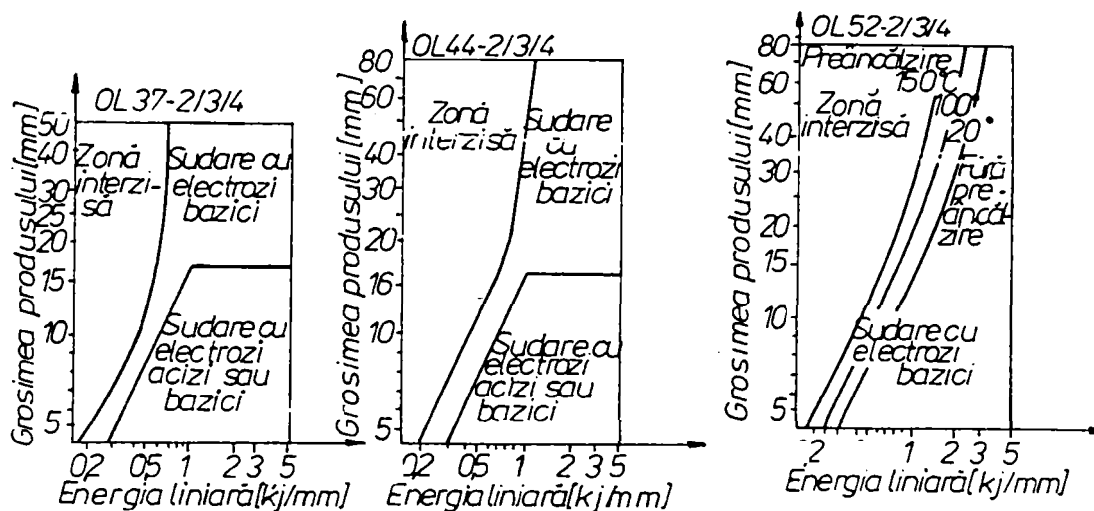


Fig.1.9. Energia liniară de sudare funcție de grosimea produsului sudat

După cum se observă din graficul prezentat în fig.1.9 pentru valori ale energiei de sudare mai mici de 0,2 KJ/mm, indiferent de marca oțelului și grosimea produsului folosit la confecționarea structurilor de rezistență, operația de sudare nu se poate realiza. Peste această valoare, sudarea este realizabilă, operația putându-se executa fie cu electrozi bazici, fie cu electrozi acizi, în funcție de marca de oțel și grosimea produsului folosit la confecționarea elementelor structurilor de rezistență.

Mărcile de oțel cele mai frecvent utilizate la confecționarea construcțiilor metalice sunt:

OL 34 - folosit în special la confecționarea niturilor sau la elementele cu pereți subțiri îndoite la rece, utilizate la elemente mai puțin solicitate, cum sunt elementele de închidere și tâmplărie metalică.

OL 37 - utilizat cel mai frecvent la alcătuirea structurilor de rezistență, datorită atât rezistenței mecanice ridicate cât și unei bune deformabilități. Întrucât acest oțel este foarte frecvent folosit pentru execuția construcțiilor metalice, realizate în majoritatea cazurilor sudate, el prezintă și o tenacitate bună.

OL 44 - utilizat la alcătuirea elementelor pentru construcții metalice sudate, supuse unor solicitări mecanice relativ ridicate și care trebuie să prezinte o suficientă garanție față de ruperea fragilă. Acesta este un oțel slab aliat, la care îmbunătățirea caracteristicilor mecanice se datorează atât procentului ridicat în carbon, cât și procentelor mari de Mn, Si, Al comparativ cu oțelul OL 37.

OL 52 - se utilizează la alcătuirea construcțiilor metalice puternic solicitate (căi de rulare, construcții de înălțimi și deschideri mari). Caracteristicile mecanice ridicate ale acestui oțel se obțin datorită procentului ridicat de C, Al, Mn, Si, precum și datorită prezenței în cantități reduse a unor elemente de aliere ca V, Nb, Ti. Pe lângă aceste caracteristici mecanice mari, acest oțel prezintă o bună plasticitate și caracteristici bune de sudabilitate.

OL 50, OL 60, OL70 - nu se utilizează la alcătuirea elementelor de rezistență ale construcțiilor metalice, ci doar la confecționarea șinelor de rulare datorită rezistențelor mecanice mari și a rezistenței sporite la uzură date de procentul mare de carbon pe care îl dețin. Aceste oțeluri însă se prelucrează și se sudează greu.

Dacă în alegerea materialului unei structuri de rezistență se adoptă ca și criteriu hotărâtor marca oțelului, exprimată prin rezistența minimă de rupere la tracțiune, se pot face următoarele precizări:

- pentru elementele constructive slab solicitate este indicată utilizarea oțelurilor carbon de uz general de marcă inferioară (de exemplu OL 37, OL 42);
- pentru elementele principale de rezistență este indicată utilizarea întregului domeniu de oțeluri carbon de uz general (OL 37, OL 42, OL 44, OL 52);
- pentru elementele metalice supuse oboselii, având în vedere faptul că influența mărcii asupra rezistenței la oboseală este redusă, se indică folosirea mărcilor OL 37 și OL 52;
- pentru nituri se adoptă mărci de oțel cu calități plastice mai mari decât cele ale materialului de bază (de exemplu OL 34 pentru elemente realizate din OL 37; OL 44 pentru elemente realizate din OL 52);
- șuruburile se realizează din oțeluri având grupa caracteristicilor mecanice corespunzătoare mărcii oțelului utilizat;
- electrozii și sârmele pentru sudare se realizează din oțeluri având cel puțin rezistența materialului de bază (de exemplu domeniul de mărci OL 37 ÷ OL60).

1.3 ACȚIUNI MECANICE DATORATE PROCESULUI DE FUNCȚIONARE ȘI EFECTUL LOR ASUPRA ELEMENTELOR STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ

Utilajele metalurgice sunt destinate desfășurării proceselor tehnologice din industria siderurgică și metalurgică. Structura lor de rezistență face parte din categoria structurilor alcătuite din bare de oțel. Comportarea mecanică sub încărcări este studiată pe baza unor ipoteze simplificatoare și a modelării matematice aferente: oțelul este tratat ca un material omogen și izotrop, iar determinarea solicitărilor și a deformațiilor maxime probabile se efectuează pe baza anumitor valori (încărcări, caracteristici de material, caracteristici geometrice ale secțiunilor), care, în realitate, pot prezenta unele abateri față de cele considerate în calcule. Siguranța elementelor și a structurii de rezistență în ansamblu este influențată însă și de prezența unor imperfecțiuni și abateri, cauzate de factorii ce pot interveni atât în procesul de fabricație al elementelor metalice, cât și la execuția și montajul lor în structură, iar peste efectul acestor imperfecțiuni și abateri se suprapune și acela al unor acțiuni specifice condițiilor de lucru din halele metalurgice.

În timpul exploatării, asupra elementelor structurilor de rezistență ale utilajelor ce deservesc sectorul metalurgic, se exercită acțiuni ale căror caracteristici sunt determinate de particularitățile proceselor tehnologice specifice acestui sector.

Prin **acțiune**, așa cum se arată în [1], se înțelege orice cauză care în timpul funcționării ori în

situațiile de nefuncționare, transport sau montaj, determină solicitarea mecanică a utilajului, respectiv a elementelor componente ale acestuia.

Astfel, ca acțiuni specifice structurilor metalice ale utilajelor metalurgice, în funcție de durata și frecvența cu care intervin pe întreaga durată de exploatare a acestora pot fi considerate următoarele categorii:

A. Acțiuni permanente

- încărcări provenite din greutatea proprii și eforturi inițiale;
- încărcări provenite din greutatea proprii ale sarcinilor utile transportate.

B. Acțiuni temporare

- acțiuni temporare principale;
 - încărcări nominale;
 - forțe de inerție - în plan vertical;
 - în plan orizontal;
 - încărcări provenite din căderea sarcinii utile;
- acțiuni temporare secundare
 - încărcări provenite din mersul oblic;
 - încărcări datorate acțiunii vântului;
 - încărcări datorate variațiilor de temperatură tehnologică;
 - încărcări pe scări, podeste, platforme, balustrade;
 - încărcări datorate depunerilor de praf industrial.

C. Acțiuni excepționale

- încărcări provenite din răsturnare la cărucioarele cu ghidarea rigidă a sarcinii utile;
- încărcări provenite din lovirea utilajului în tamponare și opritori;
- încărcări provenite din sarcinile de verificare cu ocazia recepției sau autorizării pentru punerea în funcțiune a utilajului.

A. Acțiuni permanente

Greutatea proprie a utilajului reprezintă o acțiune rezultată din greutatea proprie a elementelor fixe și mobile ale acestuia, care acționează fără întrerupere pe toată durata lui de viață.

În cazul în care soluția constructivă a structurii de rezistență a utilajului se bazează pe introducerea prin diferite metode a unor încărcări inițiale controlate, acestea se vor lua în considerare ca făcând parte din aceeași categorie de acțiuni.

În principiu, așa cum se arată în [1], determinarea greutății proprii a utilajelor metalurgice și a părților componente ale acestora se poate face prin două metode:

- metoda empirică, bazată pe prelucrarea statistică a datelor furnizate de proiectele și utilajele existente;

- metoda teoretică, prin care greutatea proprie este evaluată pe baza stării de tensiuni calculate ori a fluxului de forțe aplicate, considerându-se și factori de corecție care țin seama de abaterea valorilor determinate teoretic față de greutatea reală a utilajelor.

Greutatea sarcinii utile transportate de către utilaj generează asupra structurii de rezistență

a acestuia încărcări uniform distribuite sau încărcări distribuite discontinuu.

B. Acțiuni temporare

În accepțiunea prescripțiilor în vigoare pentru un utilaj metalurgic, *încărcarea nominală* reprezintă încărcarea maximă admisă ce poate fi manevrată de utilajul în cauză, considerând întreg spectrul de sarcini nominale pe toată durata lui de viață. Astfel, încărcarea nominală, conform **STAS 8290-83** rezultă din sarcinile utile ce pot fi ridicate pe toată durata de viață a utilajului, greutatea dispozitivelor de prindere inclusiv cota parte din mijloacele de susținere cuprinse între elementele de prindere a sarcinii utile și ultima înfășurare pe tambur. Valoarea sarcinii nominale este foarte importantă pentru dimensionarea structurii de rezistență a utilajului și se stabilește în urma:

- analizei procesului tehnologic la care participă utilajul;
- analizei spectrului de sarcini la care este supus utilajul pe toată durata sa de viață;
- analizei condițiilor de exploatare.

Caracterul specific al condițiilor de exploatare, precum și natura sarcinii nominale pot fi considerate în calcule prin intermediul unui factor de suprasarcină, a cărui valoare și distribuție este aleatoare, în funcție de condițiile amintite.

La ora actuală, acest factor este insuficient tratat în literatura de specialitate, iar rezultatele experimentale au arătat că, valoarea suprasarcinii este mică la utilajele echipate cu mijloace automate de agățare a sarcinii și are valori mari în cazul utilajelor echipate cu electromagnet. Tot experimental, s-a arătat că cele mai mici abateri, ca valoare și frecvență, de la valoarea sarcinii nominale s-au constatat la utilajele cu destinație specială, deoarece manevrează în majoritatea cazurilor sarcini de aceeași greutate, iar abateri mari, la utilajele cu destinație generală. Având în vedere tipul sarcinii utile transportate, așa cum se prezintă în [1], s-a observat că cele mai mari deviații de la valoarea sarcinii nominale s-a constatat în cazul transportării pieselor compacte și deviații relativ mici se constată în cazul transportării materialelor lichide și vâscoase.

Datele anterior prezentate nu epuizează cauzele care pot genera valoarea și frecvența apariției suprasarcinilor dar, împreună cu datele din literatura de specialitate, pot constitui un indiciu pentru stabilirea dispozitivelor de protecție, a dimensionării corecte a structurilor de rezistență și a necesității de supraveghere a exploatării utilajului.

Datorită condițiilor de funcționare, mișcarea utilajelor metalurgice se desfășoară frecvent în regim tranzitoriu. Astfel, accelerarea sau decelerarea utilajului generează apariția unor *forțe de inerție* pe direcția de mișcare, în sens opus, respectiv în sensul acesteia și determină apariția unor *efecte dinamice*. În accepțiunea normelor din țara noastră, efectele dinamice produse de forțele de inerție se iau în considerare prin doi coeficienți dinamici și anume:

φ - coeficient ce corespunde efectelor provocate de forțele de inerție ale elementelor utilajului, datorită deplasării lor, (tabel 1.1);

ψ - coeficient ce corespunde efectelor provocate de forțele de inerție datorită manevrării pe verticală a sarcinii utile, (tabel 1.2).

Efectele dinamice care apar la deplasarea pe orizontală sau verticală a utilajului metalurgic și a elementelor sale componente, generează apariția unor *forțe de inerție atât în plan orizontal, cât și*

în plan vertical. Astfel, din categoria forțelor de inerție în plan vertical, în cazul particular al podurilor rulante fac parte:

- încărcările de calcul determinate de greutatea propriei;
- încărcările de calcul determinate de sarcina utilă.

Efectele dinamice în plan vertical, care se produc în cursul deplasării utilajelor metalurgice sau a unor părți componente ale acestora, se iau în considerare în calcul prin înmulțirea încărcărilor rezultate din greutatea proprie a elementelor sau a eforturilor pe care le determină cu coeficientul dinamic φ , care ia în considerare efectele trecerii utilajului peste denivelări ale șinei, rosturi sau îmbinări ale acesteia. În acest fel, *încărcarea de calcul determinată de greutatea G* a unui element constitutiv oarecare al mașinii este: $P_c = \varphi \cdot G = \varphi \cdot m \cdot g$, unde φ se alege conform **STAS 8290-83**, în funcție de starea căii de rulare și viteza de deplasare (Tabel 1.1). Experimental s-a arătat că, în afara acestor factori, mărimea solicitărilor dinamice crește cu rigiditatea structurii de rezistență, cu reducerea diametrului și scăderea numărului roților de rulare. Totodată, cercetările experimentale prezentate în [61], arată că valoarea coeficientului dinamic " φ " crește la viteze de deplasare peste 120 m/min și, în aceste condiții, valori mai mari de 1,2 ale acestui coeficient nu par a avea o justificare practică.

Efectul dinamic cel mai important este cel produs de desprinderea sarcinii nominale de la sol. În cazul podurilor rulante, valoarea coeficientului dinamic la ridicarea sarcinii depinde de factori constructivi și de exploatare cum ar fi: elasticitatea cablurilor de ridicare, flexibilitatea structurii metalice, posibilitățile constructive ale mecanismului de ridicare de a realiza demaraje și opriri progresive, condițiile de lucru ale mecanismului de ridicare și natura sarcinii utile.

Coeficientul dinamic al mișcării de translație

Tabel 1.1

Viteza de deplasare [m/min]		Valoarea coeficientului dinamic φ
Starea căii de rulare		
- cu îmbinări ale șinei - cale pentru utilaje ce se deplasează pe sol	- fără îmbinări ale șinei - îmbinări sudate și prelucrate ale șinelor	
$v_t \leq 60$	$v_t \leq 90$	1,1
$60 < v_t \leq 200$	$90 < v_t \leq 300$	1,2
$v_t > 200$	$v_t > 300$	$\geq 1,2$

Deși factorii care determină acest coeficient dinamic sunt în general acceptați, forma respectiv formula de determinare a acestuia diferă de la normă la normă. În țara noastră, norma de determinare a acestui coeficient a adoptat principiul de calcul al normei DIN 15018, prin similitudine, considerând aceleași aspecte pozitive și negative (tabel 1.2). Astfel, utilajele metalurgice pot fi încadrate în patru clase de ridicare R_1, R_2, R_3, R_4 , pentru fiecare clasă corespunzând un anumit coeficient dinamic ψ , cu ajutorul căruia *încărcarea de calcul determinată de sarcina nominală* se determină cu relația:

$$Q_c = \psi \cdot Q \cdot g \quad [N] \quad (1.1)$$

În cazul utilajelor metalurgice există posibilitatea descărcării instantanee sau a așezării bruște a sarcinii, acest lucru ducând la apariția unor efecte dinamice care trebuie considerate în calcul

printr-o forță a cărei valoare este: $Q' = -0,25 \cdot \psi \cdot Q \cdot g$, [N], în care: ψ - coeficientul dinamic; Q - reprezintă sarcina utilă.

Coeficientul dinamic al mișcării de ridicare a sarcinii

Tabel 1.2

Clasa de ridicare	Valoarea coeficientului dinamic la ridicare Ψ	
	Viteza de ridicare v_r [m/min]	
	$v_r \leq 90$	$v_r > 90$
R ₁	$1,1 + 0,0025 v_r$	1,325
R ₂	$1,2 + 0,0050 v_r$	1,650
R ₃	$1,3 + 0,0075 v_r$	1,975
R ₄	$1,4 + 0,0100 v_r$	2,300

În timpul deplasării utilajelor metalurgice, pe lângă forțele de inerție ce se manifestă în plan vertical și care au fost prezentate anterior, apar forțe de inerție orizontale, ca răspuns al utilajului la efectele produse de procesele tranzitorii la care este supus. În cazul podurilor rulante, forțele de inerție în plan orizontal se pot împărți în următoarele categorii, în funcție de mișcarea care le produce:

- forțe de inerție în plan orizontal produse de translația căruciorului;
- forțe de inerție în plan orizontal produse de translația utilajului.

Efectele care apar datorită acestui tip de mișcare trebuie privite și evaluate în strânsă legătură cu felul și tipul acționării și în concordanță cu teoria deplasării. Astfel, aceste forțe de inerție depind de:

- concepția și distribuția întregului sistem de acționare;
- caracteristica motorului electric;
- amortizarea sistemului;
- influența jocurilor din lanțul cinematic;
- caracteristica elastică a sistemului.

Mecanismele de translație ale utilajelor metalurgice sunt prevăzute cu roți acționate și neacționate, grupate în perechi, care asigură rularea și rezemarea utilajului în patru puncte. În aceste condiții, o pereche de roți acționate se găsesc de regulă pe aceeași axă geometrică, adică fiecare rulează pe câte un fir al căii de rulare și pot fi: sincronizate sau cu acționare independentă. Având în vedere acest aspect, mărimea și punctul de aplicație al acestor forțe de inerție depind de distribuția grupurilor de acționare, de absența, prezența sau tipul sincronizării. Pe de altă parte, valoarea maximă a forțelor de inerție depinde de numărul total al roților acționate.

În ceea ce privește tipul și concepția motorului electric ales, acesta definește în principiu natura excitației dinamice și mărimea șocului de pornire, factori care influențează întreaga dinamică a proceselor tranzitorii.

Influența amortizării structurii de rezistență se manifestă mai puțin în dezvoltarea cantitativă a forțelor de inerție la translație, dar pregnant în definirea spectrului de solicitare.

Existența jocurilor în lanțul cinematic al transmisiei poate avea influențe negative, datorită neluării în considerare sau a evaluării greșite a jocurilor de execuție sau a celor provenite din uzări ale pieselor și în aceste condiții, efectul dinamic al excitației inițiale poate fi mult mărit față de sistemele idealizate utilizate în calcule.

În ceea ce privește caracteristica elastică a sistemului, aceasta are influență asupra forțelor de inerție la translație prin raportul dintre durata excitației produsă și perioada de oscilație a sarcinii.

Având în vedere multitudinea datelor enumerate, precum și timpul îndelungat necesar analizei lor, în calculul forțelor de inerție, în prescripții se prevăd metode simplificate care permit o evaluare rapidă și cu suficientă siguranță a valorii acestor forțe. Astfel, *forțele de inerție care acționează în diferite centre de masă izolate* se pot calcula pe baza instrucțiunilor FEM/I- 12-1970, cu relația:

$$F_i = m_i \cdot a \quad [\text{N}] \quad (1.2)$$

în care: m_i - masa elementului "i", [kg];

a - accelerația mișcării de translație, [m/s^2].

În cazul în care valorile accelerațiilor prevăzute în aceste instrucțiuni nu sunt satisfăcătoare ori valorile estimate nu se încadrează în cele prevăzute, respectiv nu dispunem de suficiente date, valorile limită ale forțelor de inerție se pot determina, conform STAS 8290-83 prin calcularea *forțelor de patinare*.

Aceste forțe se consideră aplicate la periferia roților acționate, paralele cu axa longitudinală a căii de rulare și orientate în sens opus direcției de mișcare. Pentru un utilaj dat, supus unei anumite situații de încărcare, valoarea forței de inerție depinde de mărimea accelerației, respectiv a decelerației care se imprimă acestuia în timpul proceselor tranzitorii. În practică sunt posibile cazuri în care datorită unei porniri bruște, forța dezvoltată de motor la periferia roților poate să depășească forța de aderență dintre roată și șină, roțile acționate învârtindu-se în gol fără ca utilajul să poată fi scos din starea de repaus, iar în cazul proceselor de frânare, alunecarea roților apare în momentul în care frânarea se produce brusc, cu blocarea roților, ambele situații definind fenomenul de patinare.

În ceea ce privește *acțiunile temporare secundare*, ele determină apariția unor încărcări cu o frecvență redusă în exploatarea curentă a utilajelor metalurgice. Aceste acțiuni sunt generate de inexactități constructive legate de utilaj și/sau calea lui de rulare, respectiv vânt, praf sau variații de temperatură tehnologică.

Un fenomen cu frecvență mai mică de apariție în exploatarea utilajelor metalurgice este *mersul oblic* care apare datorită unor toleranțe și imprecizii de fabricație (abateri ale paralelismului axelor roților în plan orizontal și vertical), respectiv a căilor de rulare (denivelări, șerpuiiri, curburi).

În principiu, datorită cauzelor anterior enumerate, în timpul rulării stabilizate apare tendința de rotire în plan orizontal a întregii structuri de rezistență a utilajului (considerată rigidă), fapt ce generează apariția unui sistem de *forțe* denumite *de mers oblic*. Metoda de calcul a acestor forțe, adoptată de normele aflate în vigoare în țara noastră a fost propusă de H.O.Hannover, care experimental arată că, în cazul utilajelor metalurgice care rulează cu "tracțiune față", elementul de ghidare din față intră în contact cu șina de rulare. În punctul de contact apare o forță care, datorită excentricității față de centrul instantaneu de rotație, determinat de poziția centrului de greutate al utilajului și sistemul de rezemare al roților, tinde să rotească utilajul. În funcție de poziția ei în geometria utilajului, de rezemarea roților de rulare și soluția constructivă adoptată pentru mecanismul de translație, în punctele de tangență ale roților de rulare cu șina, apar forțe de contact, ca răspuns la acțiunea acestei forțe. Forța de ghidare a utilajului și aceste forțe de contact, formează

un sistem de forțe în echilibru, denumite *forțe de mers oblic*, sistem care reprezintă încărcarea statică a structurii.

Forțele determinate de presiunea vântului acționează în cazul în care utilajul metalurgic se află instalat în aer liber, de exemplu la estacadele de pregătire a trenurilor de turnare pentru oțelării, la estacadele de stripaj, ori la cele de dezbatere a oalelor de zgură. Astfel, forța vântului ce acționează asupra structurii de rezistență a utilajului metalurgic se manifestă pe direcție orizontală și se aplică în centrul de presiune al suprafeței considerate. Totodată, această forță se manifestă și asupra sarcinii utile ce este transportată de către utilajul metalurgic; de exemplu în cazul podurilor rulante forța provenită din acțiunea vântului asupra sarcinii se transmite structurii de rezistență a podului în punctul în care cablul se reazemă pe acesta.

Literatura de specialitate, [1], definește presiunea dinamică pe baza curgerii curenților de aer, ca fiind dată de relația:

$$g_v = \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \frac{v^2}{1,63} \quad [\text{N/m}^2] \quad (1.5)$$

în care: ρ - densitatea aerului la presiunea atmosferică normală ($\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$);

v - viteza curenților de aer, [m/s],

iar prescripțiile în vigoare admit funcționarea utilajelor metalurgice până la o valoare a lui $g_v = 250 \text{ N/m}^2$, corespunzătoare unei viteze a vântului de 20 m/s (72 km/h).

Aceste valori se folosesc nu numai la calculul static al structurii metalice, ci și la calculul mecanismelor, la verificarea sub sarcină a stabilității, la efectuarea calculelor de oboseală și la determinarea puterii de regim a motoarelor electrice.

Variațiile de temperatură tehnologică constituie încărcări aferente structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice care deservește halele tehnologice în care au loc procese calde. Variațiile frecvente ale temperaturii se datorează proceselor tehnologice specifice, care determină transmiterea mai intensă a căldurii spre exterior. Aceste creșteri, variabile în timp și aleatorii ale temperaturii afectează condițiile de exploatare sub încărcări a elementelor structurii metalice de rezistență ale utilajelor care deservește aceste hale industriale și îndeosebi grinzile căilor de rulare pe care se deplasează aceste utilaje.

Încărcările datorate variațiilor de temperatură tehnologică se vor lua în considerare numai în cazul structurilor static nedeterminate, la care este împiedicată dilatarea sau contracția liberă a elementelor.

Forțele generate de încărcările pe scări, podeste și platforme se vor lua în considerare prin greutatea lor proprii și o sarcină concentrată mobilă de 3000 N, în cazul circulației pe suprafața acestora cu greutate și 1500 N, în cazul în care se circulă rar și fără greutate, iar în cazul balustradelor, se va lua o sarcină mobilă de 300 N care acționează orizontal, la nivelul mâinii curente.

Încărcarea cu praf industrial a structurilor de rezistență situate în apropierea surselor de praf (furnale, oțelării, turnătorii, forjă) reprezintă o acțiune specifică, atât datorită greutății propriu-zise, cât și a efectului corosiv al depunerilor. Densitatea prafului industrial, îmbibat cu apă de ploaie și compactat, produce încărcări cu valori mari, care provin uneori și din modul de exploatare

necorespunzător al utilajelor din componența cărora fac parte aceste structuri.

Praful industrial rezultat în urma proceselor metalurgice, alcătuit în cea mai mare parte din pulberi metalice ce conțin oxizi ai fierului și ai altor elemente de aliere, depus pe suprafața elementelor metalice și în contact cu apa din atmosfera industrială, constituie un agent coroziv cu agresivitate deosebită și, în aceste condiții, încărcarea cu praf industrial ar putea fi considerată ca încărcare permanentă, cel puțin pentru unele categorii de structuri metalice din metalurgie.

C. Acțiuni excepționale

Aceste acțiuni se definesc ca fiind încărcări care teoretic nu ar trebui să apară în exploatarea utilajului, dar datorită unor condiții specifice ori deosebite de funcționare apar cu o frecvență foarte redusă.

Pentru utilajele la care sarcina utilă este ghidată rigid și unde este posibilă ciocnirea între obstacole fixe și sarcină sau între elementele metalice care alcătuiesc ghidajele acestora, conform prescripțiilor în vigoare [1], trebuie să se țină cont de încărcările provocate de o asemenea ciocnire. *Forța datorată lovirii de obstacole a utilajului în cazul ghidării rigide a sarcinii* se manifestă fie la nivelul solului, fie la nivelul obstacolului și poate provoca ridicarea a două roți ale căruciorului. Valoarea ei se determină fără a se ține seama de coeficienții dinamici la ridicare și se limitează la 0,25 din suma greutatei proprii a căruciorului și a sarcinii nominale, și numai dacă este cazul se va ține seama de efectul dinamic provocat de revenirea instantanee a căruciorului în poziția de rulare.

În accepțiunea normelor în vigoare, tamponarea utilajului se produce numai în cazuri excepționale. Astfel, în cazul utilajelor a căror viteză de translație este sub 40 m/min, nu se ține seama de efectul tamponării, iar la utilajele care se deplasează cu o viteză peste această limită, efectul tamponării se calculează considerând o valoare de 0,7 din viteza nominală de translație. În calculele de verificare, efectul tamponării se materializează printr-o forță concentrată, aplicată în centrul de masă al utilajului. *Forța de tamponare* se obține egalând energia cinetică a utilajului în momentul tamponării, cu lucrul mecanic consumat la deformația concomitentă a structurii de rezistență și a tamponelor.

În urma rezolvării sistemelor de ecuații diferențiale pentru diferite situații de tamponare, se ajunge la următoarele concluzii:

- dacă tamponarea se produce cu viteză nominală, în cazul tamponului cu diagrama caracteristică triunghiulară fără amortizare, datorită efectului pendulării sarcinii, apare o a doua tamponare, care provoacă o deformație mai mare a grinzii decât la contactul inițial între tamponul podului și contra - tamponul de la capătul căii de rulare.
- dacă tamponarea se produce în timpul procesului de frânare, în cazul tamponelor cu caracteristică triunghiulară fără amortizare, deformația maximă a grinzilor se produce la prima comprimare a tamponelor.

În literatura de specialitate [114] se apreciază că, în cazul tamponării cu viteză nominală, neglijarea pendulării sarcinii conduce, din punct de vedere cantitativ la subaprecierea fenomenului, iar la tamponarea în timpul procesului de frânare, influența celei de a doua comprimări este neglijabilă față de efectul celei dintâi.

Pentru asigurarea condițiilor de securitate în timpul exploatării, prescripțiile tehnice R1, [115], prevăd efectuarea verificării tehnice a utilajelor. În cadrul acestor verificări tehnice sunt prevăzute *încercări cu suprasarcină*, care trebuie luate în considerare ca încărcări excepționale ce pot acționa asupra utilajului în cauză.

Procesele tehnologice și condițiile specifice de exploatare determină apariția acestor categorii de încărcări, prezentate anterior, care definesc comportarea în timp a structurilor de rezistență ale utilajului respectiv. Aceste acțiuni de natură mecanică, determină asupra elementelor din care sunt alcătuite structurile de rezistență, apariția unor efecte, a căror analiză se face în cele ce urmează.

S-a observat că, în timpul procesului tehnologic desfășurat în hala unei oțelării, deplasarea podurilor rulante sub sarcină, în lungul căii de rulare, precum și ridicarea sau coborârea sarcinii utile, determină ca acțiunile provenite din funcționarea acestora să producă solicitări cu caracter variabil în timp și dinamic.

Efectul cumulat al acestor acțiuni se exercită atât asupra structurii de rezistență a podului rulant cât și asupra grinzilor căii de rulare și are o influență importantă asupra concepției și a execuției utilajului.

Analiza fenomenului amortizării oscilațiilor podului staționar, fig. 1.10, [69], relevă variația în timp a deformațiilor construcției metalice a unui pod rulant și caracterul defavorabil al acestora în exploatarea utilajului. Astfel, o amortizare mai puternică, reduce timpul de oscilație și produce scăderea logaritmică a vârfurilor de solicitare, iar în cazul unei amortizări slabe, timpul de amortizare al oscilațiilor crește, numărul vârfurilor de solicitare fiind mare în cadrul unei singure excitații dinamice, adică structura de rezistență a utilajului ajunge mai târziu în echilibru cinetostatic. Atingerea acestui echilibru într-un timp cât mai scurt are o importanță cu atât mai mare cu cât, datorită caracterului aleatoriu aceste spectre de solicitare nu au putut fi definite încă, [1]. În particular, variația în timp a deformațiilor construcției metalice a unui pod rulant staționar și a solicitărilor care apar în cadrul unui ciclu de ridicare are forma diagramei din fig. 1.10.

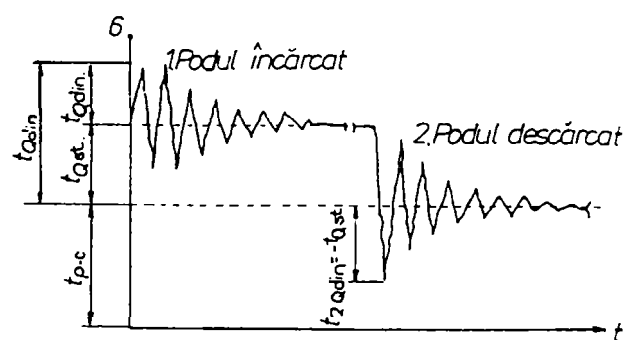


Fig. 1.10. Amortizarea oscilațiilor unui pod rulant staționar în timpul unui ciclu de încărcare

Analizând diagrama din fig. 1.10 se observă că la ridicarea bruscă a sarcinii, săgeata inițială f_{p-c} , rezultată din greutatea proprie a podului și căruciorului descărcat, crește cu valoarea f_{1Qdin} , care reprezintă efectul dinamic al sarcinii utile Q . Datorită acestui efect dinamic, structura de rezistență a podului începe să oscileze în jurul poziției „1” de echilibru static al podului încărcat, caracterizat prin nivelul $f_{p-c} + f_{Qst}$, unde f_{Qst} reprezintă săgeata produsă de sarcina Q aplicată static. În continuare,

amplitudinile scad datorită amortizării, iar structura tinde spre poziția de echilibru static „1”. Un fenomen similar are loc la descărcarea sarcinii Q când, după amortizarea oscilațiilor, structura tinde spre poziția de echilibru static „2”, caracterizată prin săgeata f_{p+c} .

Forțe cu caracter dinamic apar și în cazul deplasării longitudinale a podului rulant, la trecerea roților acestuia prin dreptul unor rosturi ale șinelor sau peste denivelări cauzate de uzura și degradarea în timp a capetelor de șină, cum sunt cele exemplificate în fig. 1.11 și fig. 1.12.

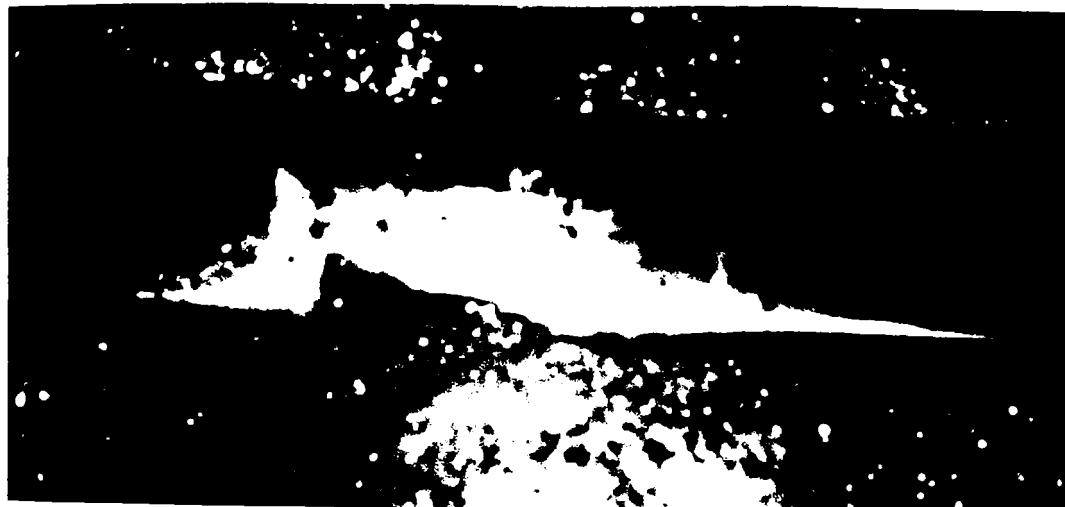


Fig.1.11. Deteriorări ale șinelor de rulare în hala unei oțelării



Fig.1.12. Deteriorarea șinei de rulare în zona rostului, în hala unei oțelării

Un alt efect dinamic cauzat de denivelarea șinei [69], prezentat în fig. 1.13, se manifestă prin “căderea” roții podului pe înălțimea h a denivelării, roata rămânând tot timpul în contact cu colțul șinei; în intervalul t_0 , (cât durează “căderea”), roata se deplasează vertical, cu accelerația constantă a_0 , apoi în intervalul de timp Δt_0 , ce corespunde impactului roții “i”, se imprimă o accelerație a_1 de jos în sus.

Influența defavorabilă a rosturilor și a denivelărilor șinelor au impus adoptarea, în norma STAS 6911-80, a valorii maxime de 1 mm pentru denivelarea admisă. În urma uzării în timp a șinelor, s-au măsurat însă și denivelări de 12-15 mm, însoțite de uzuri laterale pronunțate ale „ciupercii” și de fisuri în inima profilului de șină, [2].

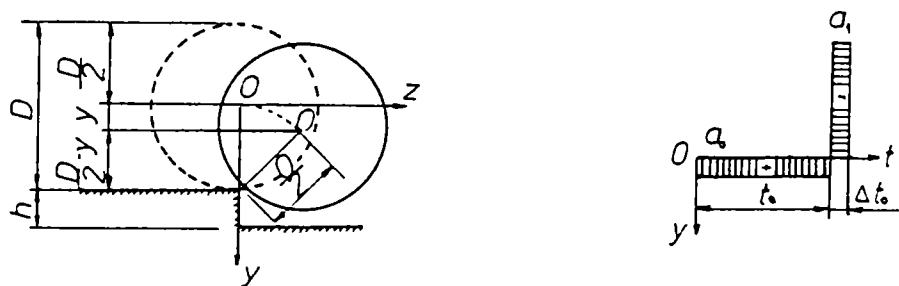


Fig.1.13. Efectul denivelării șinei de rulare

Aceste defecte se produc de obicei în zona rosturilor, ele fiind constatate, de exemplu, la ansamblul grinzilor căilor de rulare dintr-o oțelărie, unde fixarea tronsoanelor de șină s-a realizat cu elemente sistem clești, iar prinderea de talpa superioară a grinzii de rulare, cu șuruburi. Din cauza slăbirii șuruburilor în timpul exploatarei, elementul de prindere nu mai menține contactul direct și continuu dintre șină și talpa superioară, local șina fiind puțin ridicată. La trecerea podului rulant pe zona rostului s-au produs șocuri care au dus la uzura rapidă și accentuată a șinei, precum și la deteriorarea bandajelor roților, până la rupturi locale ale acestora, [2].

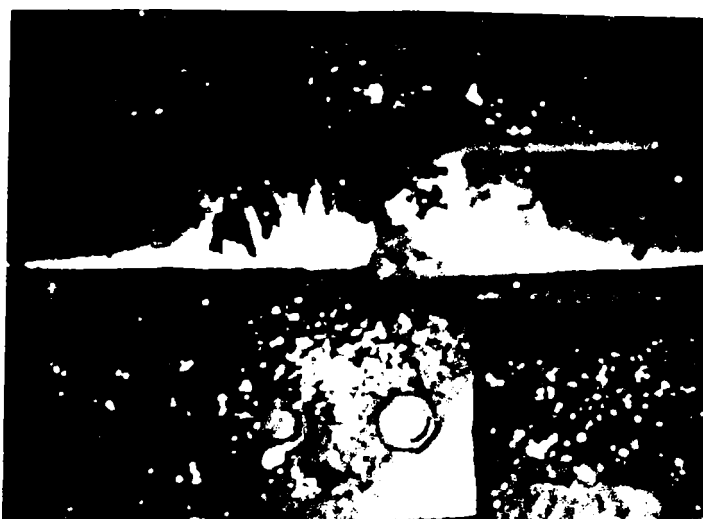


Fig.1.14. Deteriorarea șinelor datorată slăbirii prinderilor cu șuruburi, la podurile rulante din hala unei oțelării

Tot ca efect defavorabil al slăbirii prinderilor șinelor pe grinzile de rulare, fig.1.14, se menționează transmiterea inegală, cu precădere la o singură grindă, a forțelor transversale provenite din frânarea sau demararea căruciorului pe pod. Același efect îl are și micșorarea accidentală a coeficientului de frecare dintre roata de rulare a podului și șină, de obicei din cauza posibilității ca materialul de ungere al buzelor bandajelor să ajungă la fața șinei.

Repartizarea apăsărilor verticale între roțile podului depinde în mare măsură de denivelările cu care au fost montate șinele, de inexactitățile provenite din execuția podului rulant, dar și de rigiditățile grinzilor principale și de capăt ale podului. În fig.1.15, presupunând că cele două căi de rulare sunt înclinate în sens invers cu $1/5000$, la un ecartament al podului de 4500 mm și în ipoteza în care, podul calcă pe șine cu roțile 1, 2 și 3, roata 4 ar fi denivelată cu 6 mm față de șină. Pentru ca toate roțile să calce pe șine, structura de rezistență a podului trebuie să se deformeze și din această

cauză, apare o redistribuire a forțelor verticale transmise prin roți, [69].

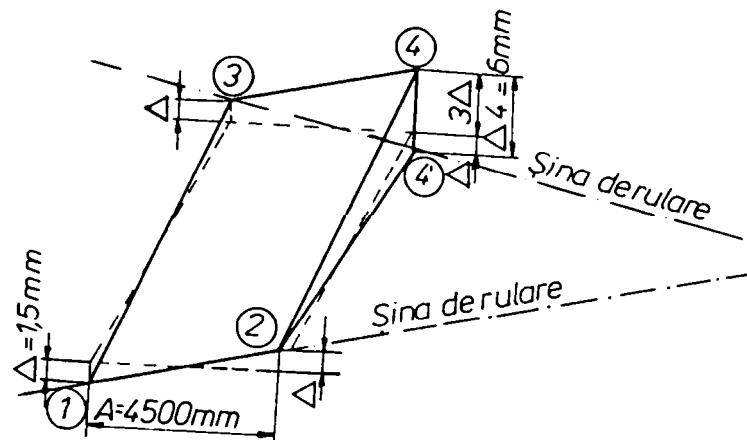


Fig.1.15. Deformarea structurii de rezistență a podului și repartizarea inegală a apăsărilor maxime pe roată, datorită denivelării șinelor

În practică însă, apar de multe ori imperfecțiuni de execuție sensibil mai mari, cum sunt de exemplu, cele constatate în urma măsurărilor efectuate asupra structurii de rezistență a unui pod rulant, ce funcționează în hala unei oțelării, dintr-un combinat siderurgic, verificările geometriei podurilor, înscrise în anexa A.1, au rezultat ridicări ale roților față de șine de pînă la 8 mm, iar în ceea ce privește denivelarea căilor de rulare, acestea înregistrează pante de 1/4000... 1/4500.

Aplicarea defavorabilă a încărcărilor verticale este accentuată și de excentricitățile de montare ale șinelor care, în general, se măresc în timpul exploatării, datorită deplasărilor cauzate de slăbirea șuruburilor de fixare ale acestora de talpă. Astfel, în aceeași hală menționată anterior, s-au măsurat excentricități de pînă la 40 mm, care au dus, pe lângă aplicarea defavorabilă a încărcărilor verticale au dus și la răsucirea șinei. În acest fenomen poate fi antrenată și talpa superioară a grinzii de rulare, mărimea unghiului de răsucire φ_t , fiind funcție de rigiditatea la răsucire a structurii grinzii, fig.1.16, [69].

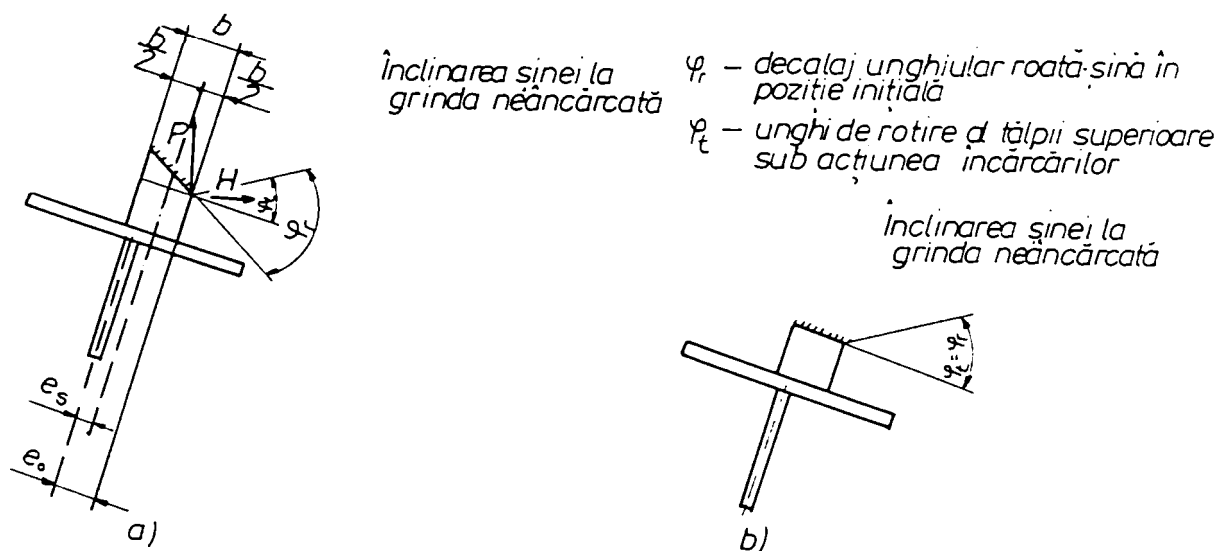


Fig.1.16. Răsucirea șinei și a tălpii superioare a grinzii de rulare, datorită imperfecțiunilor de montaj: a - structură cu rigiditate mare la răsucire; b - structură cu rigiditate mică la răsucire

Răsucirea șinei și a tălpii superioare a grinzii de rulare poate să apară de câte ori există un decalaj unghiular între înclinarea roții și poziția inițială a șinei, chiar dacă șina este riguros centrată.

Aplicarea excentrică a încărcărilor verticale dă naștere unor solicitări de răsucire a tălpii superioare, respectiv de încovoiere a inimii în direcție orizontală [69]. Aceste solicitări au un caracter

variabil și pot cauza apariția unor fisuri de oboseală la grinzile căilor de rulare.

Din cele prezentate anterior se observă că, alegerea soluției de acționare a mecanismului nu trebuie să rezolve numai problema legată de acționarea utilajului, ea are o influență deosebit de mare și asupra comportamentului structurii de rezistență a utilajului, prin efectele ce se manifestă la nivelul acesteia.

Spre deosebire de fenomenul de “strâmbare” al utilajului, care se consideră un fenomen dinamic, mersul oblic, deși fenomenologic similar, este considerat un fenomen static și apare datorită unor toleranțe și imprecizii de fabricare ale utilajului, respectiv ale căilor de rulare. Astfel, în cazul neconcordanței dintre direcția de rulare rezultantă a podului și direcția șinei, apar forțe rezultate din mersul oblic, notate cu S , fig.1.17, [2]. Aceste forțe acționează în sens transversal pe direcția grinzii de rulare, în locul unde elementul de ghidare este în contact cu șina, mărimea lor fiind proporțională cu cea a unghiului de dezaxare.

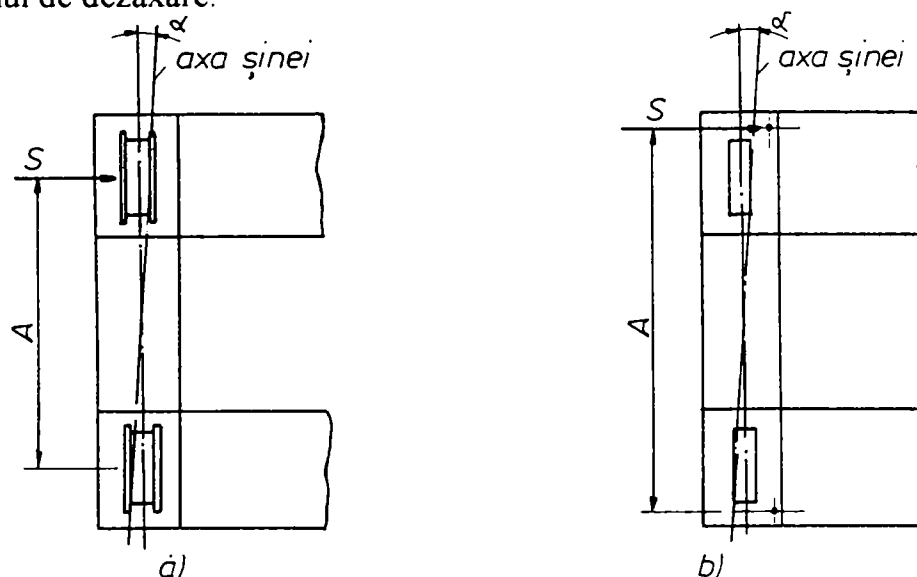


Fig.1.17. Efecte provenite din mersul oblic al podului rulant
a - Ghidare prin buzele bandajelor; b - Ghidare prin role

Rezultatele măsurărilor privind cinetica deplasării podurilor rulante din hala unei oțelării, au arătat că dezaxarea unghiulară maximă este de aproximativ 7 % (mai mică însă de 15 %, dată în [2] ca valoare admisă).

Condițiile specifice de exploatare ale structurilor metalice ale utilajelor metalurgice pot determina acțiunea unor factori care intensifică efectul defavorabil al solicitărilor de oboseală. Astfel, defectele de pe suprafața unor elemente aparținând structurii de rezistență, pot constitui amorse de fisuri care dezvoltându-se, duc la ruperea prin oboseală a materialului. Prezența tensiunilor reziduale, suprapuse peste cele provenite din încărcările exterioare, poate produce atingerea unor valori ale tensiunilor la care apar fisuri de oboseală. De asemenea, defectele interioare, pe lângă concentrările de tensiuni pe care le produc, reprezintă și puncte de amorsare a fisurilor ce se pot dezvolta la solicitări repetate.

Variațiile de temperatură tehnologică constituie și ele încărcări aferente utilajelor metalurgice care funcționează în hale în care au loc procese calde (elaborarea și turnarea fontei și a oțelului, halele laminoarelor). Variațiile frecvente ale temperaturii se datorează proceselor tehnologice specifice; de exemplu, în faza de afinare a oțelului, ca urmare a insuflării intense de oxigen în cuptor,

temperatura băii crește la peste 1700⁰C, fapt ce determină o transmitere mai intensă a căldurii spre exterior. Aceste creșteri variabile în timp și aleatorii, ale temperaturii, afectează condițiile de exploatare sub încărcări ale elementelor structurii metalice ale utilajelor metalurgice ce deservește aceste sectoare și îndeosebi grinzile căilor de rulare.

Variații mari ale temperaturii pot apare și în cazul producerii unor avarii ale utilajului tehnologic de elaborare și turnare, cum ar fi: uzura avansată a părții superioare a pereților și a bolții cuptorului de elaborare, desprinderea unor porțiuni din bolta cuptorului, arderea unor elemente de răcire sau funcționarea chiar și pentru scurt timp, în regim redus de avarie a unor astfel de utilaje. În acest caz, acțiunile asupra elementelor structurilor de rezistență au caracterul unor acțiuni temporare secundare.

Printre efectele defavorabile datorate exploatării defectuoase a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice putem aminti: consolidări și modificări ale structurilor de rezistență ale podului rulant; schimbarea regimului de funcționare a podului, ori creșterea capacității de ridicare a acestuia.

S-a observat că, în funcție de specificul procesului tehnologic desfășurat de un utilaj metalurgic, exploatarea acestuia poate produce șocuri și vibrații, a căror transmitere spre elementele structurii de rezistență poate produce deplasări și deformații ale acestora, aceste fenomene influențând defavorabil comportarea în ansamblu a structurii sub încărcările din exploatare.

1.4 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

- Prin analiza principalelor categorii de structuri metalice s-au pus în evidență, în cadrul acestui capitol, tipurile de structuri de rezistență frecvent folosite la utilajele metalurgice, în general, și la podurile rulante, în particular.
- Evidențierea sistematică a mărcilor de oțeluri folosite la fabricarea elementelor structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.
- Prin analiza calitativă a modului de comportare în exploatare a elementelor metalice ce alcătuiesc structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice s-au pus în evidență tipurile de acțiuni mecanice specifice proceselor industriale metalurgice.

În cadrul acestui capitol **contribuțiile personale** constau în:

- analiza condițiilor reale de lucru a structurilor de rezistență ale podurilor rulante sub acțiunea unor încărcări datorate procesului de exploatare și evidențierea efectelor produse de aceste încărcări asupra structurilor metalice ale acestor utilaje.
- realizarea unor verificări a geometriei unui pod rulant care funcționează în hala unei oțelării, dintr-un combinat siderurgic, cu scopul evidențierii unor imperfecțiuni de execuție care pot genera încărcări care au efect defavorabil asupra structurii de rezistență a utilajului aflat în exploatare.

CAPITOLUL 2

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND CALCULUL ȘI OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

2.1. POSIBILITĂȚI DE MODELARE FIZICĂ ȘI MATEMATICĂ ÎN VEDEREA CALCULULUI STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

2.1.1. Metode și procedee utilizate

Tendința actuală în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice este orientată spre cuprinderea cât mai completă a tuturor factorilor care intervin în comportarea acestora, în scopul obținerii unor soluții cât mai eficiente sub aspectul rezistenței, durabilității și economicității.

Această orientare modernă este impusă de:

- adaptarea cât mai fidelă a structurilor de rezistență la cerințele funcționale și tehnologice ale utilajelor metalurgice din care acestea fac parte;

- amploarea dimensiunilor structurilor de rezistență;
- diversitatea încărcărilor la care sunt supuse structurile metalice ale utilajelor metalurgice;
- realizarea unui consum minim de materiale și manoperă;
- amplificarea gradului de industrializare al execuției structurilor metalice.

În general, concepția unei structuri de rezistență necesită calculul tensiunilor și deformațiilor produse de acțiunile la care este supusă construcția din care respectiva structură face parte. Pe baza acestora, se evaluează răspunsul structurii, în regim static și/sau dinamic și se dimensionează elementele ei componente, având în vedere siguranța și comportarea normală în exploatare.

Procedeele utilizate în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, constând, ca principiu în compararea răspunsului structurii la încărcările din exploatare cu anumite valori stabilite prin metoda de calcul adoptată, sunt influențate de evoluția și fundamentarea **conceptului de optimizare**. Din acest punct de vedere, [52], metodele de calcul utilizate în proiectarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice se pot clasifica în:

- metode de proiectare indirectă;
- metode de proiectare directă.

În cazul primei metode se propun, într-o primă aproximație, forma, dimensiunile și materialul din care se confecționează structura, se determină apoi încărcările și se verifică dacă structura respectivă are o comportare satisfăcătoare sub acțiunea acestor încărcări, comportarea fiind definită prin tensiuni, deformații, deplasări, fisurări ori ruperi. Structura se consideră corect proiectată dacă

sunt satisfăcute condițiile inițiale privitoare la comportarea estimată, în caz contrar fiind necesară schimbarea datelor inițiale (forma, dimensiunile, materialul), astfel încât condițiile impuse inițial să fie satisfăcute.

Cea de-a doua metodă de proiectare constă în determinarea directă a dimensiunilor optime și a tipurilor de materiale, astfel încât să nu se depășească valorile limită ale tensiunilor ce definesc comportarea structurii metalice în exploatare.

Folosirea în practica proiectării structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice a metodei directe, presupune însă soluționarea exprimării analitice a problemei, astfel încât să rezulte în mod explicit dimensiunile și proprietățile mecanice ale materialelor folosite la confecționarea structurii. Deoarece dificultățile care apar în cazul acestei metode sunt mari, soluția cea mai adecvată se poate obține cu ajutorul metodei indirecte, dacă se folosesc metode de optimizare potrivite.

Metoda de proiectare indirectă, acceptă *conceptul de optimizare determinist* – considerat, [56], ca fiind de treaptă zero - conform căruia proprietățile materialului structurii, caracteristicile geometrice, acțiunile și solicitările sunt considerate mărimi nealeatorii, având valori certe, iar definirea rezistenței admisibile, σ_a se face prin adoptarea unui coeficient de siguranță unic, c , prin care se reduce limita de curgere a materialului; condiția impusă ca structura de rezistență să nu cedeze sub acțiunea încărcărilor este ca tensiunea maximă, σ_{max} să nu depășească o anumită fracțiune din valoarea limitei de curgere. Mărimea coeficientului de siguranță unic, stabilită mai mult pe baza judecării unor situații de ansamblu, a condus la creșterea rezistențelor admisibile, în ultimii 50 de ani până la valori aproape duble, [54], în timp ce efectele acțiunilor însă, nu s-au schimbat. Astfel, alegerea unui coeficient de siguranță acoperitor pentru toate cazurile posibile de cedare ale structurii are o importanță deosebită asupra prețului de cost și a greutății structurii metalice. În aceste condiții, de cele mai multe ori coeficientul de siguranță ales are valori mult mai mari decât ar fi necesar, iar structura de rezistență obținută este **supradimensionată**.

Proiectarea deterministă reprezintă un punct de vedere îngust al procesului de optimizare și poate avea uneori implicații periculoase, deoarece metodele de optimizare bazate pe concepte deterministe riscă să reducă nivelul de siguranță al structurii de rezistență, sub nivelul minim admis, spre exemplu, în urma minimizării greutății acestora. De asemenea, reducerea nivelului siguranței structurii poate rezulta, cel puțin în parte, dintr-o distribuție improprie a materialului între diverse elemente ale structurii.

Încercările de îmbunătățire a metodelor de proiectare, în sensul definirii mai corecte a încărcărilor și rezistențelor, au arătat că, în practică, chiar și în cazul elementelor considerate similare, există o dispersie semnificativă atât a datelor cât și a rezultatelor, dovedind astfel necesitatea abordării statistice a proiectării structurilor, respectiv acceptarea *conceptului de optimizare probabilist* – considerat, [56] ca fiind de treaptă superioară, II, III sau IV.

Analiza probabilistă completă a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice ar necesita însă, [52], cunoașterea atât a legilor statistice de distribuție ale încărcărilor și solicitărilor produse, a proprietăților fizico-mecanice, a dimensiunilor geometrice a elementelor componente, cât și a unei metodologii de aplicare a calculului statistic complet.

Abordarea procedurii de calcul a structurilor de rezistență în manieră probabilistă, conduce însă și la dificultăți care derivă din aplicarea practică a teoriilor statistice în proiectarea curentă a structurilor complexe, cum sunt și structurile metalice de rezistență ale utilajelor metalurgice; în acest sens se remarcă insuficiența, îndeosebi cantitativă, a unor informații referitoare, de exemplu, la variabilitatea încărcărilor, a proprietăților fizico-mecanice ale materialelor sau a caracteristicilor geometrice ale elementelor structurii metalice. Din acest motiv, unele mărimi cu care se operează se presupune a avea un caracter determinist (înălțimea secțiunii elementelor, ariile secțiunilor transversale ale barelor, greutatea proprie a structurii), iar altele caracter probabilist (limita de curgere a oțelului).

Dificultățile utilizării practice a conceptului optimizării probabiliste, semnalate în studiile asupra metodelor de calcul ale structurilor de rezistență [52], [56], [64], justifică adoptarea în majoritatea normelor actuale de proiectare, a *conceptului semiprobabilist* – considerat, [56], ca fiind de treapta a-II-a, iar metoda de calcul aferentă, în care determinarea capacității portante se efectuează pe baza coeficienților de siguranță diferențiați, a fost denumită convențional **metoda stărilor limită**.

Conceptele și noțiunile cu care operează această metodă de calcul, definite în normele [117], se regăsesc și în normele naționale [127], [128], [125]. Metoda constă, principial, în **asigurarea rațională a elementelor și a structurilor de rezistență față de atingerea stărilor limită**, stări care ar implica fie pierderea capacității de a satisface condițiile de exploatare, fie generarea unor pericole pentru oameni sau bunurile materiale deservite [87].

După [87], [101], stările limită ale structurilor de rezistență se grupează în două categorii:

- stări limită ultime (în care se ating valori maxime ale capacității portante);
- stări limită ale exploatării normale (atingerea acestora influențează defavorabil funcționalitatea ansamblului sau a unui element component).

Definirea acestor două categorii de stări permite calculul structurilor de rezistență atât în faza de proiectare, cât și după o anumită perioadă de exploatare a construcției sub acțiunea diverselor încărcări.

Luarea în considerare însă, a tuturor parametrilor ce intervin în exploatarea structurilor de rezistență este dificilă și, din punct de vedere practic, imposibilă. Din acest motiv, se admit o serie de simplificări care se referă la acțiuni, la comportarea materialelor din care sunt confecționate elementele structurii și la alcătuirea ei. În urma acceptării acestor ipoteze simplificatoare se obține **modelul fizic** al structurii reale, căruia, pentru a-i defini comportarea, i se atașează un **model matematic**. Acesta, la rândul său, poate fi afectat de o serie de ipoteze simplificatoare care vizează definirea matematică a problemei. Cele două seturi de ipoteze conduc la simplificarea calculelor, însă conferă rezultatelor un grad de aproximare dependent de finețea ipotezelor admise.

Modelul fizic al structurii de rezistență împreună cu modelul matematic definesc **modelul de calcul** al acesteia.

Definirea modelului de calcul este posibilă numai după ce s-au analizat condițiile generale și de principiu privind performanțele ansamblului din care face parte structura, tehnologia de execuție a

acesteia, materialul din care este confecționată, durata sa de viață și condițiile în care aceasta lucrează.

Calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice implică evaluarea răspunsului acestora la acțiunile exterioare, atât din punct de vedere calitativ, cât și cantitativ; aspectul calitativ se referă la modalitățile de evaluare a mărimilor fizice corespunzătoare stadiului de solicitare analizat (deplasări și tensiuni), iar cel cantitativ, la determinarea valorică a acestora.

Analiza teoretică a răspunsului structurii la acțiunile exterioare necesită adoptarea unei modelări prin schematizarea fenomenului fizic real, în vederea exprimării sale ulterioare sub formă matematică.

Deși în rezolvarea problemelor calculului practic al structurilor de rezistență, forma matematică cea mai frecvent utilizată este forma liniară, aceasta nu reprezintă totdeauna fidel fenomenul real al deformării structurii, iar în unele cazuri, de exemplu în cel al pierderii stabilității, nici nu îl poate exprima [13]. Urmărirea caracterizării cât mai exacte a fenomenului real, cu considerarea efectelor unora dintre parametrii secundari ce influențează desfășurarea lui, conduce la forme matematice neliniare, a căror rezolvare practică necesită unele schematizări sau simplificări. Dintre acestea, cele mai curent utilizate, se referă la: stabilirea schemei de calcul, schematizări ale comportării materialului și schematizări ale comportării structurii.

Stabilirea schemei de calcul - este efectuată pe baza soluției constructive a structurii, determinată de destinația acesteia. Schema de calcul, plană ori spațială, cuprinde modelarea tipului de legături între elementele structurii, respectiv între acestea și baza de susținere, iar considerarea ori neglijarea imperfecțiunilor conduce la scheme reale, respectiv ideale ale structurilor.

Schematizarea comportării materialului - este determinată de caracteristicile fizico-mecanice ale acestuia, fiind materializată prin curba caracteristică corespunzătoare unei anumite solicitări. În cazul oțelului pentru construcții metalice, relația tensiune - deformație, corespunde materialelor ideal elasto-plastice, ce prezintă comportarea schematizată în fig.2.1 a.

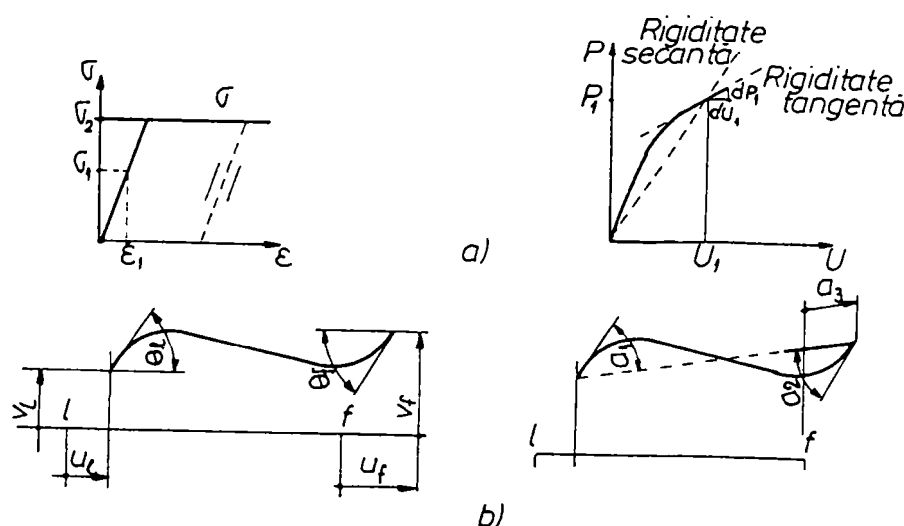


Fig.2.1 Schematizări ale comportării materialului
a - Relația forță - deplasare; b - Deplasări și deformații în calculul de ordinul II

Schematizarea comportării structurii - prezintă relațiile de legătură dintre forțele exterioare respectiv tensiunile și deplasările de pe direcțiile lor, de exemplu sub forma celor prezentate în fig.2.1.b.

Analiza soluțiilor constructive și a comportării structurilor reale printr-un calcul neliniar, poate fi abordată, în condițiile actuale, sau doar sub aspectul neliniarității geometrice - calcul de ordinul II liniar elastic, neliniar geometric - sau, al neliniarității atât geometrice, cât și elastice - calculul de ordinul II neliniar elastic respectiv elasto-plastic. Astfel, prin considerarea efectului forțelor axiale asupra tensiunilor și deplasărilor, modelarea matematică se apropie mai mult de cea a fenomenului real de comportare a structurilor.

Dezvoltarea unui calcul de ordinul II, alături de consecința exprimării ecuațiilor de echilibru static în raport cu forma deformată a structurii, presupune acceptarea unor ipoteze simplificatoare.

Elaborarea modelului de calcul ce reprezintă o structură de rezistență **trebuie corelat riguros cu metoda de calcul adoptată**, deoarece modelul va reflecta ipotezele simplificatoare, restricțiile, avantajele și dezavantajele metodei, în timp ce metoda folosită va fundamenta calculul propriu-zis.

La ora actuală [85], este dificil de a stabili criterii care să permită o clasificare a metodelor de calcul folosite în mecanica structurilor. Acestea se vor împărți, în conformitate cu teoria matematică a structurilor, [85], în metode exacte (analitice) și aproximative (numerice), fig.2.2 Metodele exacte se folosesc în calculul structurilor în anumite cazuri particulare de acțiuni și geometrie a structurii și din această categorie fac parte metodele analitice de calcul care rezolvă un număr redus de probleme, în special cele care au mai mult un caracter teoretic. În ceea ce privește metodele aproximative de calcul, după [12], există trei grupuri de metode, și anume:

- metode matriceale directe;
- metode variaționale;
- metode reziduale.

Toate aceste metode s-au dezvoltat pe baza metodelor numerice din mecanica structurilor care operează cu modele discrete, discretizarea fiind de natură fizică și/ori matematică.

În ceea ce privește posibilitățile de alegere a metodei de calcul, în cazul structurilor de rezistență, [68], [59], [13], dintre cele anterior prezentate, metodele analitice se recomandă a fi utilizate doar în cazurile în care soluțiile ecuațiilor se pot obține direct, iar rezolvarea lor este posibilă prin integrare numerică sau cu diferențe finite, cum este cazul structurilor simple.

Calculul structurilor complexe se efectuează însă, utilizând metodele generale ale tensiunilor sau deplasărilor, formulate matriceal, pe baza caracteristicilor de rigiditate și flexibilitate ale elementelor supuse diferitelor solicitări, cu ajutorul programelor automate de calcul. O mare parte a acestor programe sunt concepute pe baza metodei elementelor finite care, discretizând structura reală într-o serie de substructuri și elemente conectate atât între ele, cât și cu baza de susținere, conduce la înlocuirea rezolvării sistemelor de ecuații diferențiale cu sisteme de ecuații liniare.

Un astfel de program de calcul utilizat și pentru calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice este programul COSMOS/M, conceput pentru microcalculatoare IBM PC.

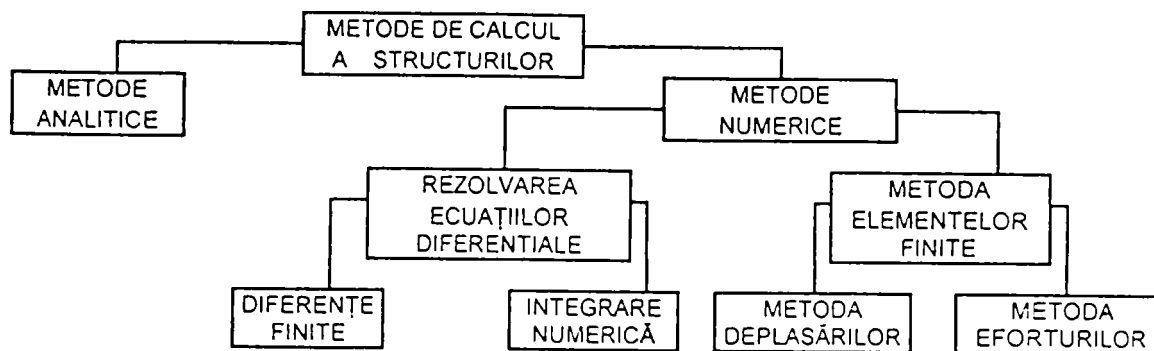


Fig.2.2 Clasificarea metodelor de calcul în mecanica structurilor

Cu acest program, conform manualului de utilizare, [129], poate fi analizată comportarea mecanică a structurilor, modelate printr-un ansamblu de elemente legate între ele prin noduri, acționate de sarcini statice ori dinamice. Utilizând o formă compactă de memorare a datelor și datorită posibilităților de alocare dinamică a memoriei, se pot rula structuri bi- și tridimensionale (2D/3D) complexe, cu până la 5000...256 000 noduri, și, ca ordin de mărime, același număr de elemente, amploarea problemei tratate fiind însă dependentă și de resursele sistemului de calcul folosit. Programul conține șase module de analiză între care transferul de date și operațiuni interne se execută automat. Aceste module sunt:

- **GEOSTAR** – modul de pre și postprocesare;
- **STAR** – modul de analiză statică liniară;
- **DSTAR** - modul de analiză dinamică;
- **ASTAR** – modul de analiză dinamică avansată;
- **HSTAR** – modul de analiză termică;
- **NSTAR** – modul de analiză neliniară;
- **FSTAR** – modul de analiză la solicitări variabile de oboseală ;
- **FLOWSTAR** – modul de analiză a curgerii laminare;
- **ESTAR** – modul de analiză a problemelor electromagnetice de frecvență joasă;
- **OPTSTAR** - modul de analiză a problemelor de optimizare.

În modulele menționate, structura de rezistență studiată, modelată fizic și geometric și având datele inițiale declarate în fișierul datelor de intrare este supusă analizelor globale ale căror rezultate, pentru fiecare din ipotezele de încărcare sau combinații ale acestora, pot fi consultate în următoarele moduri:

- Afișarea listelor de valori, pentru:
 - reacțiunile din reazeme,
 - tensiuni din bare, valorile extreme ale tensiunilor (maxime și minime);
 - deplasările nodurilor (distanța dintre două noduri corespunzătoare formei deformatate);
 - deformația structurii în ipotezele de încărcare analizate;

- Afișarea elementelor grafice pe ecran, respectiv:
 - desenul întregii structuri deformate sau nedeformate, ori a unei porțiuni din aceasta, cu posibilități de mărire sau micșorare;
 - numerotarea nodurilor și a elementelor;
 - vizualizarea reazemelor, a caracteristicilor mecanice și a încărcărilor;
 - vizualizarea deformației structurii, cu posibilitatea folosirii opțiunii de animație;
- tipărire la imprimantă.

2.1.2. Fundamentarea teoretică a metodei elementelor finite aplicată în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice

Metoda elementelor finite a devenit un instrument de lucru cu o largă utilizare în toate domeniile ingineresti, datorită faptului că a înlăturat toate barierele legate de nivelul de complexitate al problemei studiate. Astfel, pot fi studiate sub aspect teoretic probleme oricât de complexe, cu luarea în considerație atât a fenomenelor liniare, cât și al celor neliniare. În același timp, metoda elementelor finite permite analiza în regim dinamic, analiza termică, analiza curgerii fluidelor sau studiul câmpurilor electromagnetice. Utilizarea acestei metode, cu parcurgerea tuturor etapelor de calcul necesare, nu reprezintă o garanție asupra corectitudinii rezultatelor obținute. Pentru a obține rezultate cât mai corecte, un rol esențial îl reprezintă elaborarea **modelului de calcul**.

2.1.2.1. Alegerea modelelor de calcul în analiza cu elemente finite

În mecanica structurilor nu există fenomene izolate. Întotdeauna, împreună cu fenomenul studiat, se desfășoară un număr însemnat de alte fenomene cu care acesta se află în interacțiuni reciproce. De aceea, în cazul în care se dorește studierea unui fenomen este necesar ca la început să se delimiteze aria de analiză, în scopul eliminării influențelor ne semnificative pentru scopul urmărit. Toate acestea presupun de fapt, emiterea unor ipoteze, elaborarea unor scheme sau conceperea unor modele care descriu fenomenul în cauză și care în final constituie model de calcul.

Modelul de calcul trebuie să îndeplinească condiția de a fi adecvat scopului propus, deoarece în cazul în care se alege un model de calcul excesiv de complicat care își propune să aibă în vedere toate aspectele posibile ale fenomenului, acesta poate deveni costisitor, uneori chiar inoperant, iar un model simplist, poate fi incorect, ca urmare a neglijării unor fenomene și aspecte importante ale problemei.

După modul cum poate fi conceput un model de calcul, se disting următoarele tipuri de modele:

a) Modelul funcțional este un model structural, teoretic sau experimental care pune în evidență diferitele componente ale fenomenului ilustrând calitativ legăturile reciproce ale acestora.

b) Modelul de calcul este un model teoretic care pornind de la un ansamblu de ipoteze, stabilește o schemă de calcul, pe baza unor relații de calcul care descriu cantitativ și calitativ fenomenul analizat.

c) **Modelul experimental** este un obiect fizic, un dispozitiv sau o instalație care reproduce în anumite condiții fenomenul studiat.

Cele trei modele sunt complementare în descrierea unui fenomen, fiecare având avantaje și dezavantaje. Pentru investigații complete se pot utiliza serii succesive de diverse modele. Pe măsură ce se culeg date despre fenomenul studiat, modelele se perfecționează, situație ce poate duce la o simplificare a modelului de calcul adoptat.

În vederea efectuării calculului unei structuri de rezistență se elaborează modele de calcul, acest lucru fiind posibil numai după ce s-au analizat condițiile generale și de principiu privind performanțele ansamblului din care face parte structura, tehnologia de execuție a acesteia, materialul din care este fabricată, durata sa de viață și condițiile de exploatare.

2.1.2.2. Etape în alegerea modelului de calcul

În general, în alegerea unui model de calcul se parcurg următoarele etape:

1. *Stabilirea nivelului la care se face modelarea.* Pentru o anumită fază a proiectării modelarea se poate face la nivelul întregii structuri (mașină sau utilaj), la nivelul substructurilor (ansamble) sau la nivelul componentelor acestora (elemente sau organe de mașini).

2. *Alegerea metodei de calcul.* Structura care se calculează trebuie să satisfacă cerințele de funcționalitate, siguranță și economicitate. Așa cum s-a arătat în paragraful 2.1.1, metodele deterministe de calcul iau în considerare o siguranță absolută, care acoperă toate incertitudinile printr-un coeficient de siguranță. Concepțiile moderne de calcul țin cont de caracterul aleatoriu al parametrilor care intervin în ansamblul structurii. Astfel, siguranța structurii fiind măsurată prin probabilitățile diferitelor comportări posibile pe o durată de timp dată.

3. *Modelarea geometriei structurii* constă în aproximarea structurii reale printr-un sistem echivalent de bare, plăci sau învelișuri. Modelul geometric trebuie să reproducă cât mai fidel dimensiunile, rigiditățile și deplasările impuse structurii de rezistență.

4. *Determinarea sarcinilor sau încărcărilor și a caracterului acestora* se face prin determinări experimentale sau prin calcule, pe baza datelor și parametrilor de exploatare cunoscuți sau impuși. Cunoașterea completă a sarcinilor presupune evidențierea următoarelor aspecte:

- cunoașterea modului de variație în timp a acestora, cu precizarea caracterului static sau dinamic, staționar sau determinist, simultaneitatea apariției sarcinilor și a combinațiilor posibile ale acestora;

- cunoașterea regimului de exploatare, cu precizarea regimului nominal, maxim, de probă, de rodaj, transport, avarie etc.

- analiza cazurilor de încărcare cu precizarea celor mai dezavantajoase situații.

5. *Schematizarea distribuției sarcinilor sau schematizarea încărcării.* Solicitarea structurii poate fi produsă de un sistem de sarcini masice (greutate, forțe de inerție) sau de sarcini de suprafață, care sunt transmise structurii prin intermediul pieselor de legătură cu care interacționează (bolțuri, lagăre, suporturi, tije, racorduri, flanșe, fundații, șuruburi, pârgă și altele).

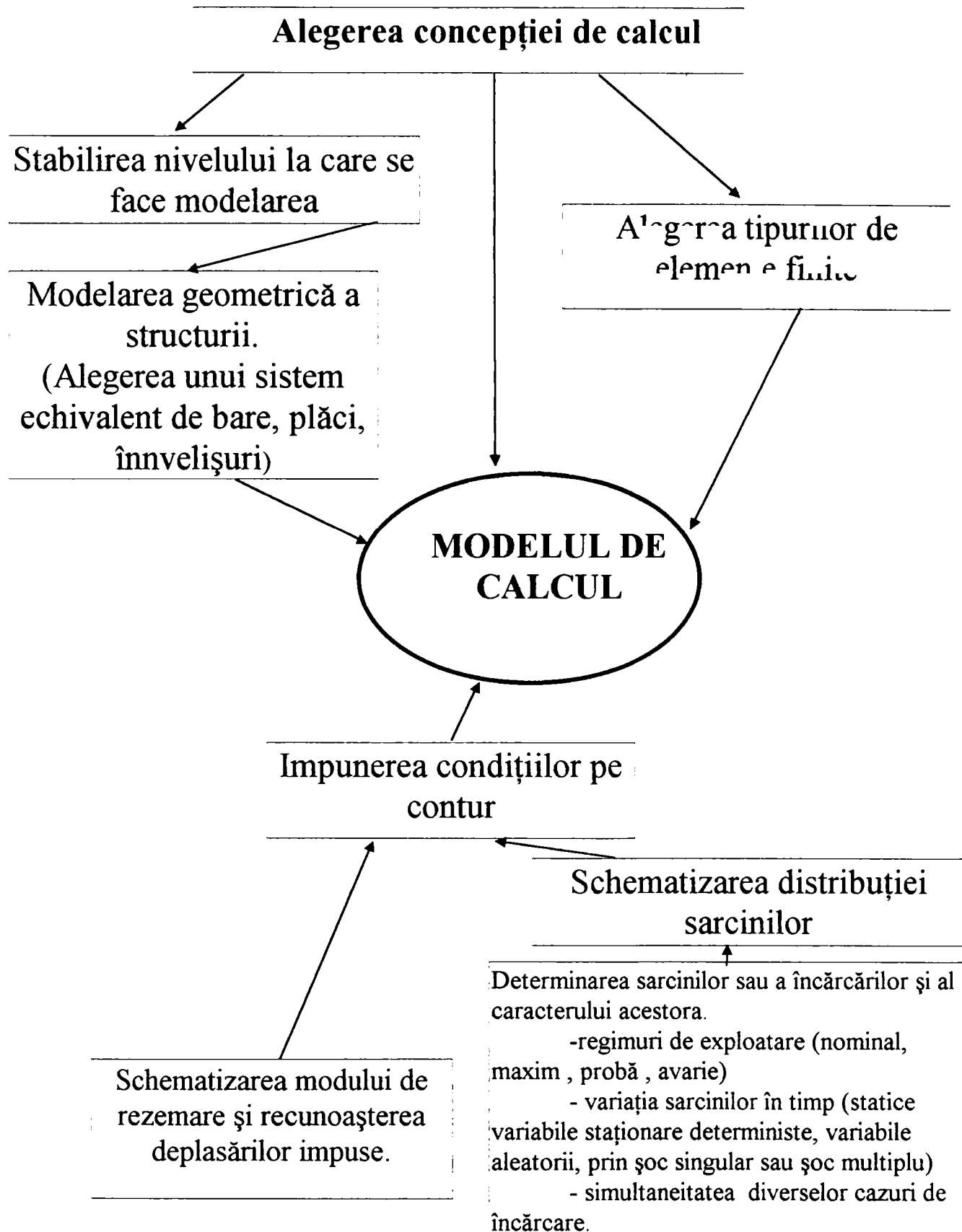


Fig. 2.3. Interdependența dintre etape în elaborarea modelului de calcul

Așa cum se arată în literatura de specialitate [57], una dintre caracteristicile de bază a structurilor de rezistență este *deformabilitatea* acestora. Din acest punct de vedere, se poate afirma că deformarea structurilor de rezistență conduce în mod inevitabil la o altă lege de distribuție a sarcinilor, care este diferită de distribuția teoretică acceptată. În foarte multe situații însă, întrucât determinarea distribuției reale a sarcinilor este foarte dificil de realizat, se apelează la *schematizări*, ceea ce înseamnă implicit acceptarea unor *ipoteze simplificatoare* care conservă esența încărcării reale, dar care prezintă marele avantaj că simplifică considerabil volumul și dificultatea calculelor ulterioare. Interdepența dintre etapele de alegere a modelului de calcul al unei structuri de rezistență este prezentată în mod sintetic în fig.2.3.

2.1.2.3. Principalele tipuri de elemente finite folosite în calculul structurilor de rezistență

În vederea efectuării calculului structurilor de rezistență, utilizând programe automate de calcul, cum este și metoda elementelor finite, un rol deosebit îl are operația de **discretizare**. Prin aceasta se înțelege împărțirea structurii studiate într-un număr oarecare de **elemente finite** interconectate în noduri, [57], [86]. În cadrul acestei operații se aleg tipurile de elemente finite utilizate și se stabilește repartizarea lor pe domeniul studiat, rezultând astfel numărul, dimensiunea și forma acestora.

La structurile de rezistență alcătuite numai din bare, modelul de calcul obținut în urma discretizării structurii asigură satisfacerea condițiilor de compatibilitate și de echilibru atât în interiorul elementelor finite, cât și pentru întreaga structură.

La structurile bi și tridimensionale, modelul de calcul rezultat prin discretizare satisface aceste condiții în mod parțial, datorită faptului că forțele nodale care depind de gradele de libertate ale nodurilor nu au corespondență fizică în interiorul structurii, [57]. Din această cauză, pentru ca rezultatele obținute pe aceste modele să aproximeze cât mai bine soluția problemei, discretizarea trebuie să aibă la bază o analiză atentă a stării de tensiuni și deformații din structură, care să țină seama de particularitățile de formă, de material, de rezemare și de încărcările care solicită structura. Aceasta, deoarece topologia rețelei de elemente finite este condiționată atât de prezența unor variații în geometria structurii respectiv calitatea materialului, cât și de existența unor încărcări concentrate sau distribuite după diverse legi de variație.

În cazul structurilor bidimensionale se pot utiliza pentru modelare *elemente finite triunghiulare* sau *patrulatere*. Elementele triunghiulare asigură posibilități mai largi în aproximarea geometriei conturului structurilor de rezistență, în timp ce elementele patrulatere reproduc mai corect distribuția tensiunilor, [57].

În cazul existenței unor concentratori de tensiune sau a unor forțe concentrate, în zona respectivă este necesară o creștere a fineței de discretizare sau, se pot folosi elemente de ordin superior care dispun, în locul deplasărilor din nodurile intermediare, de derivatele de ordinul doi și trei în mijlocul elementelor finite și după direcția laturilor, [86]. Contururile curbe se modelează prin *elemente finite cu laturi drepte* sau *elemente finite izoparametrice cu contur curb*.

Numerotarea nodurilor rețelei de discretizare trebuie făcută astfel încât profilul matricei de rigiditate al structurii de rezistență să fie minim.

În ceea ce privește rezultatele obținute în urma folosirii acestei metode, adică tensiunile și deplasările, acestea depind de soluția de discretizare aleasă. Datorită acestui fapt apar situații, în special în cazul structurilor de rezistență complexe, când structura supusă analizei cu elemente finite trebuie investigată în mai multe variante de discretizare. În această situație există posibilitatea selectării rezultatelor și alegerii în final a unui **model de calcul optim**.

Datorită complexității mari, în cazul calculului structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, *alegerea elementelor finite* reprezintă o problemă care ridică dificultăți legate în special de asigurarea continuității dintre ele. Astfel, un calcul cât mai exact presupune folosirea în modelare a unor elemente finite care să aproximeze cât mai bine structura de rezistență. În acest sens, programele moderne de analiză cu elemente finite dispun de diverse tipuri de *elemente finite*, dintre care cele mai evaluate sunt cele *de tip placă subțire*. La acest tip de elemente nu sunt suficiente, ca și grade de libertate, numai valorile deplasărilor din noduri utilizate în teoria elasticității pentru elaborarea calculului analitic. În acest caz, pe lângă componenta deplasării liniare $w(x,y)$ după

direcția normalei z la suprafața mediană a plăcii și ale deplasărilor unghiulare, fig.2.4, $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$ și $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$, în sistemul de axe cartezian drept xyz , mai este necesar să se introducă și alte grade

libertate suplimentare, ca de exemplu derivatele de ordinul doi ale deplasării $w(x,y)$, $(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 w}{\partial y^2};$

$\frac{\partial^2 w}{\partial x \cdot \partial y})$. În acest caz însă, la nivelul suprafețelor inter-elemente se pot înregistra discontinuități de

modelare a răsucirii sau curbării. Dacă se impune ca și grad de libertate curbura, continuitatea acesteia se realizează forțat ceea ce nu este în concordanță cu realitatea [104], [129].

Compatibilitatea dintre elemente a fost soluționată de Clough și Tocher pentru elementul finit triunghiular și de către Clough și Felippa pentru elementul patrulater, obținut prin dezvoltarea primului, și sunt încorporate în pachetele de programe din familia SAP. Aceste elemente au ca grade de libertate deplasarea și rotațiile din noduri, și au fost propuse plecând de la intuiția fenomenului fizic

de deformare suferit de element. Pe lângă rotațiile $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$ și $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$, Clough și Tocher au

propus ca grad de libertate rotirea din nod $\varphi_n = \frac{\partial w}{\partial n}$, unde „ n ” reprezintă normala la suprafața mediană deformată a plăcii.

Este cunoscut că, [104] în cazul modelării cu elemente finite de tip placă subțire, compatibilitatea dintre elemente poate fi asigurată de un polinom cubic complet de forma:

$$w(x,z) = c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2 + c_7x^3 + c_8x^2y + c_9xy^2 + c_{10}y^3 \quad (2.1)$$

unde coeficienții polinomului, $c_1 \dots c_{10}$, reprezintă gradele de libertate generalizate ale elementului, care asigură compatibilitatea elementelor.

Întrucât deplasările w ; $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$; $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$ și $\varphi_n = \frac{\partial w}{\partial n}$, propuse de Clough și Tocher,

conduc la 12 grade de libertate pe elementul triunghiular cu trei noduri, s-au creat macroelemente, alcătuite din trei sub-triunghiuri, fig.2.4 a, conectate în nodul comun C, poziționat în centrul de greutate al elementului.

Pentru aceste elemente s-au introdus nodurile suplimentare (de la 4 la 9) plasate la mijlocul laturilor (fig.2.4a). În aceste condiții, utilizându-se un polinom cubic, relația 2.1, rezultă în total pentru cele trei elemente componente ale elementului triunghiular inițial un număr de 30 de grade de libertate generalizate.

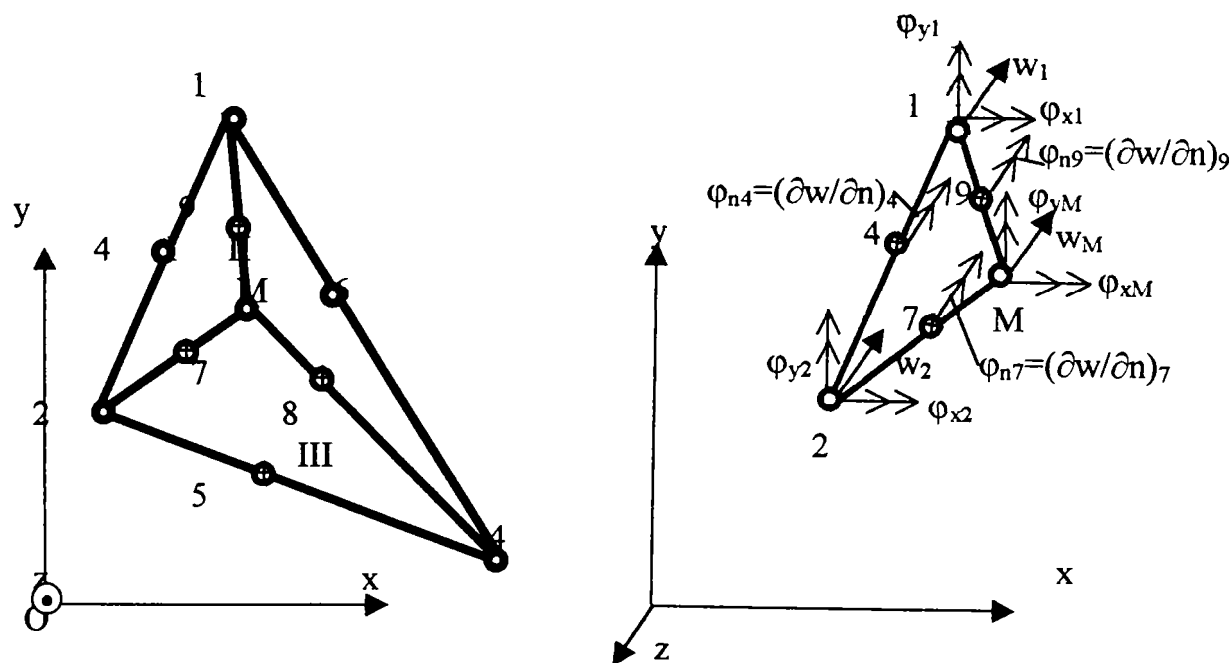


Fig.2.4 Elemente finite de tip placă subțire
a – element triunghiular cu trei noduri; b – grade de libertate

Pentru determinarea acestor grade de libertate, se folosesc următoarele *condiții de margine*:

Valorile nodale pentru deplasările w ; $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$ și $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$, ținând cont că în fiecare nod sunt conectate câte două sub-triunghiuri, deci în total vor fi:

- 3 noduri x 3 condiții/nod x 2 elemente comune în nod = 18 condiții de margine ;

Rotirile normale $\varphi_n = \frac{\partial w}{\partial n}$ din nodurile intermediare 4, 5 și 6, deci:

- 1 nod x 3 condiții /nod = 3 condiții de margine;

Continuitatea deplasărilor w : $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$; $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$ din nodul interior M, ținând cont că în acest nod sunt conectate 3 sub-triunghiuri, deci :

- 1 nod x 3 condiții/nod x 3 elemente comune în nod = 9 condiții de margine;

În acest fel se obțin 30 de ecuații cu 30 de necunoscute, ceea ce permite determinarea funcțiilor de aproximare (2.1) în formă explicită. În conformitate cu fig.2.4.b, numărul de grade de libertate pe element este de 12, reprezentate de panta normală din nodurile intermediare, deplasarea w și rotațiile $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$; $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$ în nodurile de vârf. Acest tip de element se numește LCCT-12

(Linear Curvature Compatible Triangle) și asigură compatibilitatea inter-elemente, dar are dezavantajul prezenței nodurilor intermediare plasate la mijlocul laturilor. Prin impunerea unei condiții și anume: ca variația curburii să fie liniară în lungul laturii respective se pot elimina nodurile intermediare de pe aceea latură. În acest fel curbura din nodul intermediar va avea valoarea mediei aritmetice a curburilor din nodurile care definesc latura. Prin eliminarea consecutivă a câte unui nod intermediar se obțin celelalte variante de elemente finite Clough – Tocher: LCCT-11, LCCT-10 respectiv LCCT-9.

Plecând de la elementul Clough – Tocher de tip LCCT-11, Clough - Felippa realizează elementul patrulater Q12, obținut prin asamblarea a patru elemente finite LCCT –11, pentru care prin condensare statică se elimină gradele de libertate corespunzătoare nodurilor interioare fig.2.5.

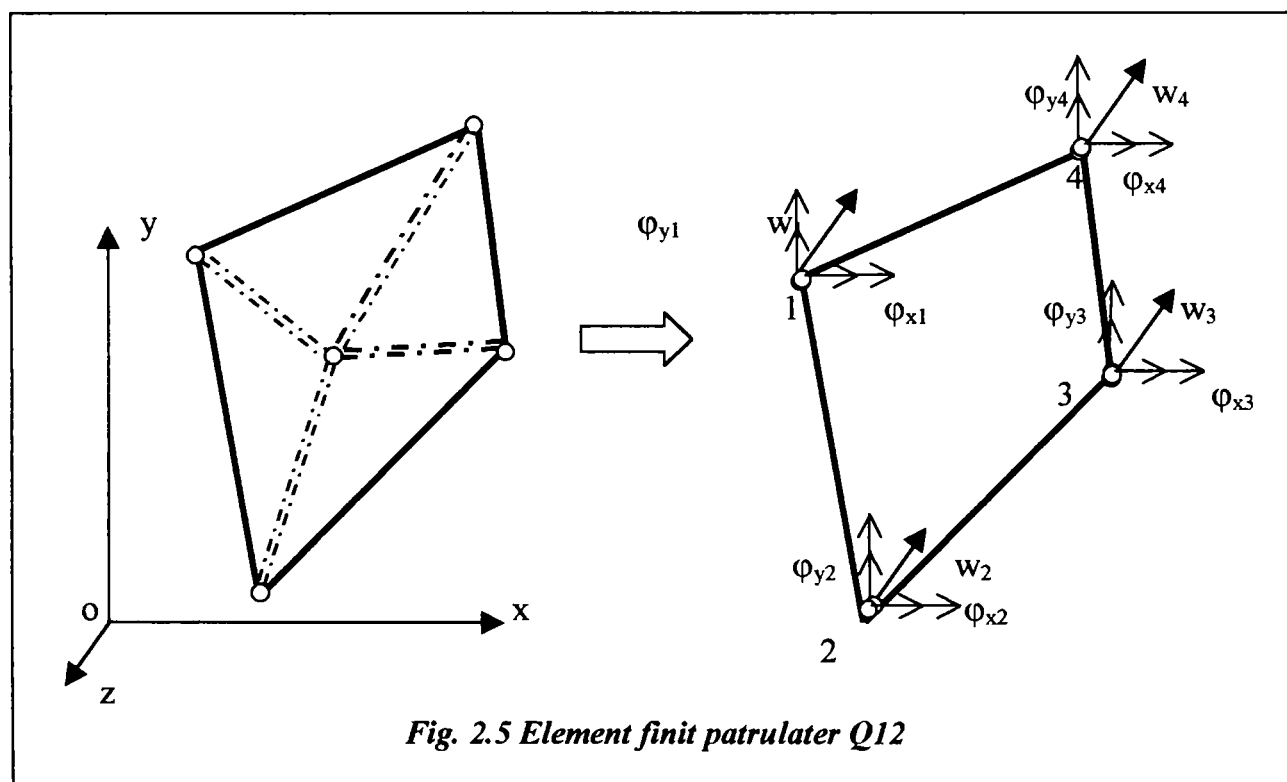


Fig. 2.5 Element finit patrulater Q12

Elementul finit patrulater Q12 are 12 grade de libertate adică 3 grade de libertate pe nod, reprezentate de deplasarea $w(x,y)$ și rotațiile: $\varphi_x = \frac{\partial w}{\partial x}$ și $\varphi_y = \frac{\partial w}{\partial y}$.

Programele moderne de analiză cu elemente finite utilizează *elemente finite de tip placă subțire evoluate*, capabile să asigure compatibilitatea inter-elemente pentru în toate cazurile de solicitare. În cazul pachetului de programe COSMOS/M, el dispune în biblioteca de elemente finite, de elemente de tip placă subțire (SHELL) cu trei sau patru noduri pe element și câte 6 grade libertate pe nod, reprezentate de 3 translații și 3 rotații. În fig.2.6 se prezintă cazul unei probleme de verificare pentru un element de rezistență de tip placă, în care rezultatele analitice au fost

cu cele determinate numeric, obținute printr-o analiză cu elemente finite. S-au utilizat elemente de tip SHELL 3, iar rezultatele comparative sunt prezentate în tabelul 2.1. Placa a fost considerată omogenă și izotropă, din oțel, având modulul de elasticitate longitudinal $E = 2,0689655 \text{ N/mm}^2$, și coeficientul de contracție transversală $\nu = 0,3$.

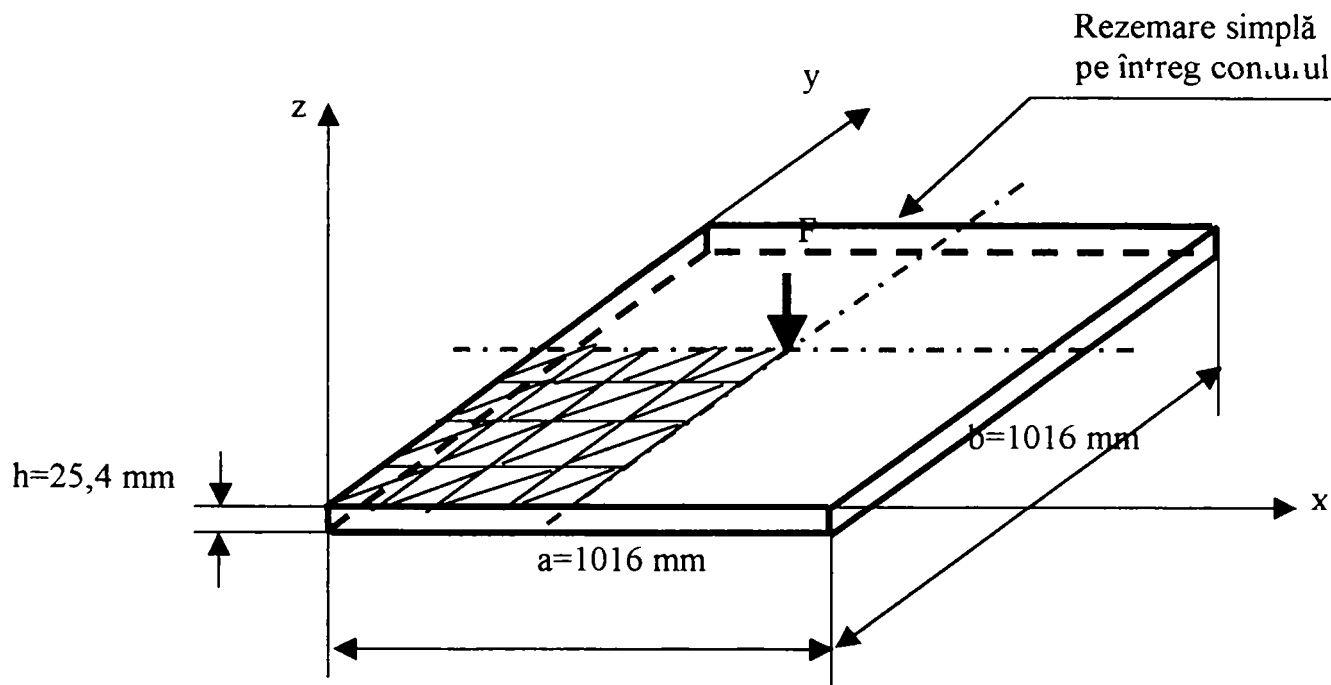


Fig.2.6 Element de rezistență de tip placă subțire

Tabel 2.1

Prezentarea comparativă a rezultatelor privind modul de încărcare a unei plăci, în două variante de calcul, analitic și numeric

Cazul de încărcare	Felul încărcării	Valorile deplasării w_t în centrul plăcii (analitic) [mm]	Deplasarea w_n în centrul plăcii (numeric) [mm]	Abateră procentuală $\frac{w_t - w_n}{w_t} \cdot 100[\%]$
1.	Forță concentrată aplicată în centrul plăcii, normală pe placă $F = 1780 \text{ N}$	0,691642	0,6889242	0,39
2.	Sarcină uniform distribuită, normală pe placă, $p = 6,8956 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$	0,0175677	0,0174986	0,39

Se remarcă faptul că abaterea procentuală, între metoda de calcul analitic și cea numerică bazată pe analiza cu elemente finite de tip SHELL, este de 0,39 %, ceea ce reprezintă din punct de vedere tehnic o precizie foarte bună.

În conformitate cu [129], elementul finit de tip placă subțire cu denumirea de SHELL 3 sau SHELL 4, (după cum are 3 sau 4 noduri pe element), de care dispune biblioteca de elemente finite a pachetului de programe COSMOS/M, realizează *modelarea cu momente* a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, deformațiile produse de forțele tăietoare fiind neglijate. Numerotarea

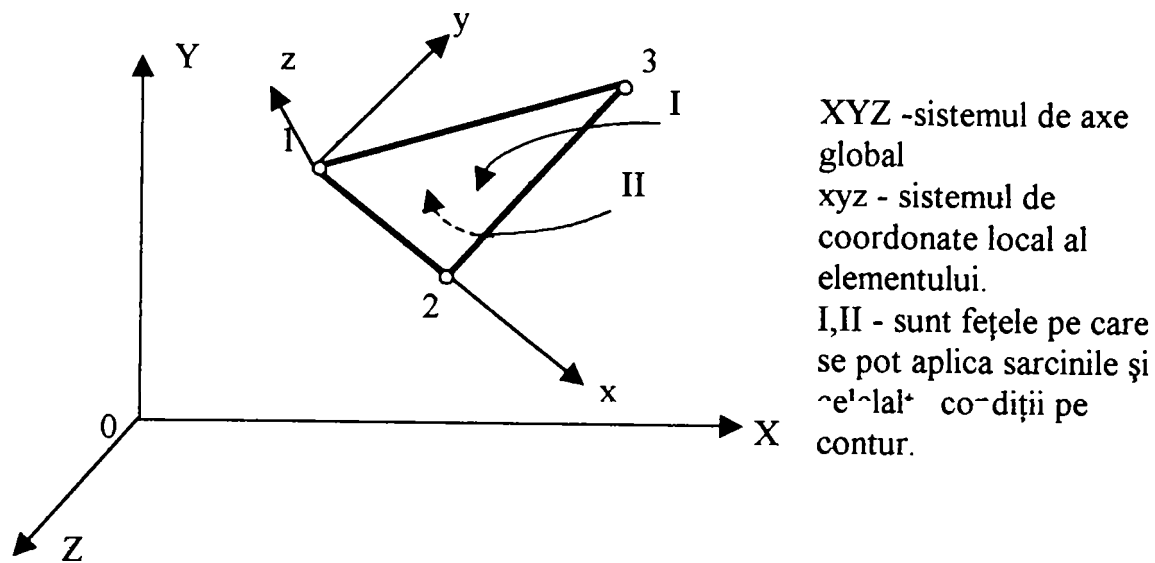


Fig. 2.7 Reprezentarea sistemelor de axe de coordonate pentru elementul finit de tip placă subțire

nodurilor este permisă atât în sens trigonometric cât și în sens invers. Sistemul de coordonate local al elementului, fig.2.7, are axa x orientată de la primul spre al doilea nod. Axa y este cuprinsă în planul elementului, perpendiculară pe axa x orientată spre cel de-al treilea nod. Axa z completează sistemul de axe cartezian drept.

2.1.2.4. Formularea ecuațiilor în elemente finite

Aplicarea principiului metodei elementelor finite, în analiza structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice constă în determinarea stării de tensiune și deformație în elementele acestora, în condițiile unor încărcări din exploatare, situația fiind similară cu studierea stării de tensiune și deformație într-un solid deformabil, (fig.2.8.a). Aceste încărcări pot fi date de forțe masice, de presiune și ele pot fi concentrate sau distribuite.

Starea de tensiune este descrisă de componentele tensorului tensiune $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ fig. 2.8 b, iar starea de deformație de valorile deformațiilor specifice $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$.

Ecuațiile care descriu fenomenul sunt ecuațiile lui Navier, care se obțin din studiul echilibrului unui element infinitezimal decupat din structură:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + f_z = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

în care: f_x, f_y, f_z – forțe masice care acționează asupra unității de volum pe direcțiile x, y și z.

Acestor ecuații li se asociază relațiile de legătură dintre deformațiile specifice și deplasări, respectiv relațiile de legătură dintre tensiuni și deformațiile specifice.

Dacă punctul M, fig.2.8.b aparținând structurii, ocupă după deformarea acesteia, poziția M_1 , vectorul deplasare $d(x,y,z)$ are componentele u,v și w pe axele sistemului xOy. Deformațiile specifice

sunt exprimate în funcție de aceste deplasări prin relațiile:

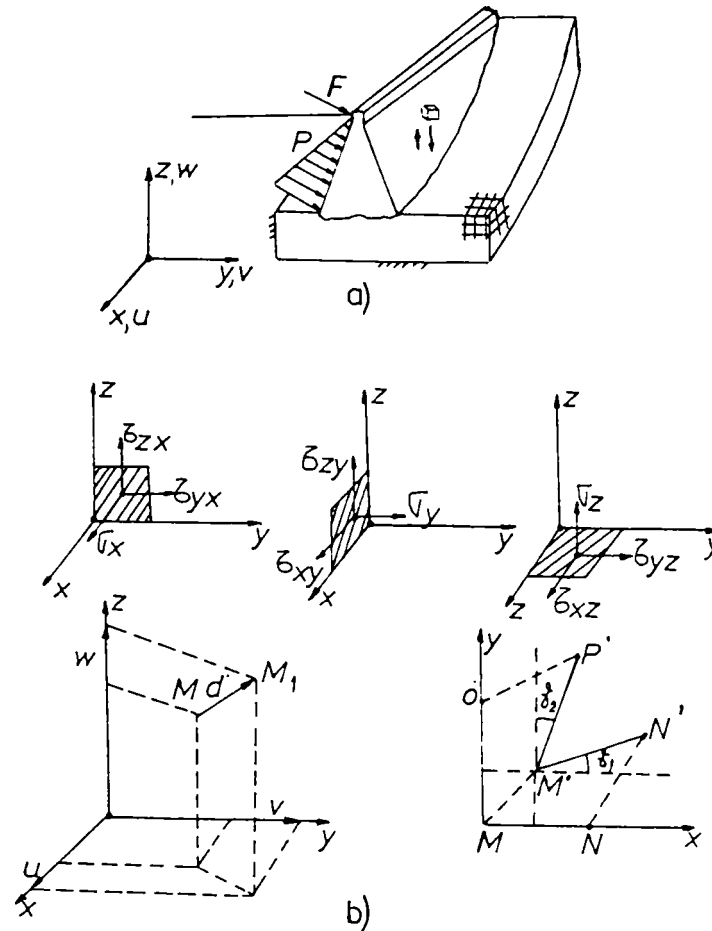


Fig. 2.8 Starea de tensiune a solidului rigid
 a – domeniul de studiu și condiții de margine;
 b – convenții de semn pentru tensiuni și deformații specifice

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.3a)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.3b)$$

Sub formă matriceală, aceste relații se pot scrie:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [\partial] \cdot \{d\} \quad (2.5)$$

în care: $\{\varepsilon\}$ - vectorul deformațiilor specifice;

$\{d\}$ - vectorul componentelor deplasărilor;

$[\partial]$ - operator conținând combinații ale derivatelor parțiale de ordinul I.

În fig.2.8b se arată interpretarea fizică a mărimilor ε_x și γ_{xy} , unde ε_x reprezintă lungirea specifică în direcția axei Ox a unui segment MN din structură, iar γ_{xy} reprezintă deformația unghiulară a unghiului drept ($\gamma_{xy} = \gamma_1 + \gamma_2$).

În cazul comportării elastice a structurii, relațiile dintre tensiuni și deformații se exprimă prin legea lui Hooke generalizată, care matriceal are forma:

$$\{\sigma\} = [E] \cdot \{\varepsilon\} \quad (2.6)$$

în care: $\{\sigma\}$ - matricea tensiunilor normale;

$[E]$ - matrice simetrică de constante elastice.

În general, problemele mecanicii structurilor, au două formulări: o *formulare diferențială și una variațională*. Metoda elementelor finite pornește de la formularea variațională a acestor probleme. O problemă care apare în cazul acestei formulări este legată de definirea funcțiilor de aproximare. Pentru înlăturarea acestui inconvenient, domeniul de studiu se împarte într-o serie de subdomenii, denumite elemente finite, conectate între ele prin noduri. Astfel, pentru determinarea ecuațiilor, care definesc starea de tensiune și deformație, în elemente finite, funcția de aproximare este energia potențială totală a structurii.

$$E_p = \int_V \frac{1}{2} \cdot \{\varepsilon\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV + \int_V \{\varepsilon\}^T \cdot \{\sigma\}_0 \cdot dV - \int_V \{d\}^T \cdot \{f\} \cdot dV - \int_S \{d\}^T \cdot \{p\} \cdot dS \quad (2.7)$$

Primii doi termeni reprezintă energia de deformare produsă de tensiunile σ și de tensiunile inițiale σ_0 , termenul al treilea reprezintă energia potențială dată de lucrul mecanic al forțelor masice f , iar ultimul termen reprezintă energia potențială dată de lucrul mecanic al presiunilor exterioare p care acționează pe suprafața structurii. În această relație V - reprezintă volumul structurii domeniului analizat, iar S - reprezintă suprafața încărcată cu presiuni exterioare.

La trecerea în elemente finite, funcția deplasare $d(x, y, z)$ se exprimă pe domeniul unui element finit în funcție de valorile nodale δ , prin intermediul funcțiilor de aproximare:

$$\{d(x, y, z)\} = \{uvw\}^T = [N(x, y, z)] \cdot \{\delta\}_e \quad (2.8)$$

în care: $[N]$ – matricea funcțiilor de aproximare

$\{\delta\}_e$ – vectorul deplasărilor nodale asociate elementului finit.

Din relațiile (2.8) și (2.4) se obțin deformațiile specifice din interiorul elementului finit exprimate în funcție de valorile deplasărilor nodale, (2.9):

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{\delta\}_e \quad (2.9)$$

în care: $[B]$ – matricea derivatelor de ordinul I ale funcțiilor de aproximare.

Relația (2.6), între tensiuni și derformațiile specifice, permite exprimarea tensiunilor funcție de deplasările nodale, (2.10):

$$\{\sigma\} = [E] \cdot [B] \cdot \{\delta\}_e \quad (2.10)$$

Înlocuind relațiile (2.8), (2.9) și (2.10) în relația (2.7) se obține energia potențială totală a

unui element finit care cuprinde: matricea de rigiditate a unui element finit $[k]$, relația (2.11) și vectorul forțelor care acționează în nodurile elementului $\{r\}$, relația (2.12):

$$[k] = \int_{V_e} [B]^T \cdot [E] \cdot [B] \cdot dV \quad (2.11)$$

$$\{r\} = - \int_{V_e} [B]^T \cdot \{\sigma_0\} \cdot dV + \int_{V_e} [N]^T \cdot \{f\} \cdot dV + \int_{S_e} [N]^T \cdot \{p\} \cdot dS \quad (2.12)$$

Expresia funcționalei elementelor finite este:

$$E_p|_e = \frac{1}{2} \cdot \{\delta\}_e^T \cdot [k] \cdot \{\delta\}_e - \{\delta\}_e^T \cdot \{r\} \quad (2.13)$$

Energia potențială a întregii structuri se obține prin însumarea energiilor potențiale ale tuturor elementelor finite în care s-a discretizat structura. Prin această metodă, structura reală a fost înlocuită cu un model discret, cu energia potențială totală guvernată de cele $\{\delta\}$ grade de libertate, iar sistemul de ecuații algebrice liniare care descrie starea de tensiune și deformație este :

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{R\} \quad (2.14)$$

în care: $[K]$ - matricea de rigiditate a structurii de rezistență ;

$[R]$ - vectorul forțelor nodale.

2.1.3. Observații critice. Concluzii

Analiza posibilităților de modelare fizică și matematică, în vederea calculului structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, a fost realizată pe baza studiului bibliografic referitor la următoarele probleme:

- prezentarea procedeeilor și a metodelor utilizate în calculul structurilor de rezistență, aflate în exploatare;
- posibilitățile de modelare fizică și matematică a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.

În ceea ce privește calculul structurilor de rezistență, acesta poate fi condus, luând în considerare și conceptul de optimizare, fie în manieră deterministă, fie probabilistă.

Adoptarea în manieră deterministă a calculului structurilor de rezistență presupune:

- considerarea datelor inițiale ca având valori certe (de exemplu: proprietățile materialului structurii, caracteristicile geometrice, acțiunile care solicită elementele structurii);

- determinarea tensiunii maxime din elementele structurii de rezistență, astfel încât aceasta să nu depășească o anumită fracțiune din valoarea limitei de curgere a materialului din care este confecționată structura.

În aceste condiții, datele inițiale au valori fixate prin prescripții de proiectare și reprezintă valori medii acoperitoare, cu caracter convențional. Datorită specificului lor afectat de incertitudine, datele menționate trebuie însă privite ca mărimi aleatoare, și de aceea, este mai potrivit să fie definite statistic. După cum s-a observat din studiul bibliografic, încercările de îmbunătățire a metodelor de proiectare pe baza conceptului determinist, și în consecință de obținere a unei mai bune definiții a

încărcărilor și rezistențelor admisibile, au arătat că, în practică, datele inițiale ale problemei și rezultatele obținute sunt dispersate. Această dispersie are o importanță deosebită în cazul elementelor tipizate și standardizate, cum este cazul celor folosite la confecționarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.

Prin adoptarea acestor considerente se trece de la concepția deterministă, abordată în calculul structurilor, la cea probabilistă, care stă la baza teoriei moderne a calculului structurilor. Un asemenea mod de abordare presupune, la ora actuală, rezolvarea unor dificultăți ce derivă în principal din lipsa unor date statistice suficiente privind elementele ce intervin în calcul și deci, nici această abordare nu poate fi aplicată integral.

Datorită acestui fapt, în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice se operează cu mărimi dintre care unele au un caracter determinist și altele au un caracter probabilist, deci se acceptă **conceptul semiprobabilist de calcul**, iar metoda de calcul aferentă acestui concept este **metoda stărilor limită**.

Folosirea în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice a acestei metode implică:

- respectarea regulilor de alcătuire constructivă și de calcul (dimensionare și verificare) a structurilor;
- execuția corectă a elementelor structurii, în conformitate cu reglementările în vigoare (confecționare, transport, montaj);
- exploatarea corespunzătoare a structurii de rezistență, în concordanță cu condițiile admise la proiectare;
- verificarea periodică a comportării structurii metalice, conform regulilor stabilite la proiectare.

Deci, calculul structurilor de rezistență sub aspectul optimizării deterministe este mai restrictiv decât în cazul celei probabiliste și reprezintă un punct de vedere îngust în procesul de optimizare, deoarece proiectarea probabilistă, efectuată sub forma unui proces iterativ, este mai dificil de realizat decât cea deterministă, din două considerente:

- datorită complexității analizei probabiliste, care este amplificată în proiectare, proporțional cu numărul iterațiilor;

- numărul mare al relațiilor ce se stabilesc implică existența unui număr mare de variabile din cauza parametrilor suplimentari care descriu variațiile încărcărilor și ale caracteristicilor de rezistență.

Adoptarea metodei stărilor limită, în calculul structurilor de rezistență implică modelarea fizică și matematică a structurii reale în exploatare în vederea evaluării răspunsului acesteia la acțiunile exterioare din punct de vedere cantitativ și calitativ.

Elaborarea modelului fizic și matematic al unei structuri metalice presupune adoptarea unor ipoteze simplificatoare care, conduc la simplificarea calculelor însă conferă rezultatelor un anumit grad de aproximare.

Din analiza datelor bibliografice se poate concluziona că elaborarea modelului fizic presupune:

- evaluarea acțiunilor care solicită structura în exploatare;

- definirea comportării materialelor din care sunt confecționate elementele structurii;
- stabilirea configurației structurii,

iar elaborarea modelului matematic care se atașează modelului fizic, căruia îi descrie comportarea are în vedere:

- stabilirea schemei de calcul;
- schematizarea comportării materialului;
- schematizarea comportării structurii.

Calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, sub aspectul analizei teoretice a răspunsului acestora la acțiunile exterioare, poate fi efectuat fie în domeniul elastic, fie în domeniul plastic. Analiza globală a structurilor în domeniul elastic este cea mai frecvent utilizată și se bazează pe un comportament tensiune-deformație liniar care, din punct de vedere matematic, presupune rezolvarea unor probleme de programare liniară.

După cum s-a arătat în subcapitolul 2.1.1, acest mod de rezolvare nu reprezintă totdeauna fidel fenomenul real al deformării structurii sub acțiunea solicitărilor exterioare și, din acest motiv, acest mod de abordare al calculului structurilor duce la **supradimensionarea** acestora. Datorită acestui fapt, la ora actuală se recurge la analiza în domeniul plastic, care abordează forme de rezolvare neliniară a acestor probleme. Analiza structurilor de rezistență în acest domeniu presupune abordarea a două metode, conform cărora calculul poate fi condus strict în domeniul plastic (caz în care deformațiile elastice ale elementelor structurii se neglijează, iar deformațiile plastice sunt concentrate în dreptul articulațiilor plastice) sau elasto-plastic (secțiunile transversale ale elementelor structurii de rezistență au o comportare perfect elastică până când se atinge în fibra extremă limita de elasticitate, după care se consideră că secțiunile se plastifiază gradat, pe măsură ce momentul crește).

Elaborarea modelului de calcul al unei structurii de rezistență, în vederea aprecierii răspunsului acesteia la acțiunile din exploatare, trebuie riguros corelat cu metoda de calcul folosită. Astfel, în urma studiului bibliografic, putem concluziona că, în mecanica structurilor există două categorii de metode și anume:

- metode analitice;
- metode aproximative.

Metodele analitice au un câmp restrâns de aplicabilitate în calculul structurilor de rezistență, datorită dificultăților care apar în cazul integrării ecuațiilor diferențiale ale problemei. Aceste dificultăți sunt generate, pe de o parte de configurația geometrică a structurii, și de modul uneori foarte complex de încărcare și rezemare a acesteia, respectiv pe de altă parte de varietatea proprietăților mecanice ale materialelor componente. Din acest motiv, un calcul analitic al stării de tensiuni și deformații dintr-o structură de rezistență se conduce, în general, pe o structură simplificată geometric, mecanic și uneori chiar și fizic, iar rezultatele obținute, supuse unei analize prin prisma simplificărilor introduse sunt comparate cu alte valori controlate experimental sau prin alte procedee de calcul.

Soluțiile aproximative, obținute în urma aplicării în calculul structurilor a metodelor aproximative, sunt mult mai eficiente din punct de vedere practic decât cele obținute în urma aplicării

metodelor analitice.

Eficiența folosirii metodelor aproximative derivă din faptul că acestea s-au dezvoltat pe metode numerice de calcul care conferă următoarele avantaje:

- restrâng, în mod considerabil, diversitatea cazurilor ce trebuie rezolvate prin transferarea analizei de la nivelul structurilor la cel al unor elemente de formă standard;
- permit formularea matriceală a algoritmilor, asigurând suportul matematic necesar folosirii programelor de calcul automat;
- oferă un algoritm de calcul general, unic, pentru structurile alcătuite din bare sau elemente continue bi- și tridimensionale;
- permit abordarea unitară a analizei statice și dinamice a structurilor;
- permit extinderea domeniului de analiză și în sfera comportării neliniare a structurilor.

Astfel, *metodele analitice* se folosesc la structurile de rezistență relativ simple, în cazul cărora rezolvarea ecuațiilor ce definesc comportarea modelului fizic al acestora se poate face prin integrare numerică sau diferențe finite, în timp ce *metodele aproximative* se folosesc la structurile complexe, (cum este cazul structurilor metalice ale utilajelor metalurgice), a căror comportare este descrisă (din punct de vedere matematic) matriceal și a căror rezolvare se efectuează cu ajutorul programelor de calcul automat, programe care oferă posibilitatea înlocuirii sistemelor de ecuații diferențiale prin sisteme de ecuații liniare.

2.2 CONSIDERAȚII PRIVIND OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ

Optimizarea, în general este definită, [94], ca fiind operația de studiere a unei probleme, finalizată cu un rezultat care, în comparație cu alte rezultate posibile este cel mai bun, iar în baza acestuia se poate lua o decizie cu caracter tehnic și economic.

Subiectul optimizării are particularități pentru fiecare disciplină în parte și, în general, cele mai multe probleme de optimizare nu au o soluție unică. Ca procedeu uzual însă, orice operație de optimizare constă în stabilirea unei mulțimi a condițiilor, necesare și suficiente pentru obținerea soluției optime respectiv a unui algoritm ce poate conduce la obținerea unor soluții care să satisfacă condițiile impuse. Există totuși posibilitatea ca mai multe soluții să satisfacă condițiile impuse, situație când se pune întrebarea care din multitudinea de soluții reprezintă optimul absolut? Această incertitudine asupra naturii optimului absolut a condus la dezvoltarea a numeroși algoritmi de optimizare, fiecare dintre aceștia rezolvând o anumită clasă de probleme. În practică însă s-a constatat că nici un algoritm nu rezolvă problemele de optimizare integral și cu aceeași eficiență.

În prezent, se consideră că o soluție rațională pentru o problemă de optimizare poate fi obținută doar dacă se ține cont în egală măsură de multitudinea factorilor ce o condiționează. În acest sens, se remarcă faptul că, structurile de rezistență nu pot fi privite independent de construcția din care fac parte, deoarece există o interdependență evidentă între acestea și restul construcției, interdependență ce trebuie exprimată în procesul optimizării. De asemenea, se constată că, cel puțin **în etapa actuală, nu este posibilă efectuarea unei optimizări de ansamblu** care să conducă la o soluție generală, capabilă să satisfacă toate aspectele și cerințele impuse, și de aceea cercetările care

se întreprind vizează doar optimizarea anumitor aspecte tehnice, tehnologice și economice.

Deși rezolvarea strict matematică a problemei de optimizare oferă avantaje remarcabile, o astfel de abordare nu este însă întotdeauna acceptabilă, îndeosebi în cazul structurilor de rezistență, deoarece presupune considerarea a numeroși factori obiectivi și subiectivi. Aceștia pot avea caracteristici și influențe contradictorii asupra optimizării, funcție de condițiile în care se găsește structura respectivă, iar din acest motiv, la ora actuală, se acceptă și metode de optimizare mai puțin riguroase. De asemenea, în urma constatării că direcțiile de dezvoltare și formele concrete pe care le pot lua aceste metode de optimizare nu sunt încă îndeajuns definite, în etapa actuală este pe deplin justificată orice încercare de a proiecta cât mai rațional o structură de rezistență, chiar dacă se utilizează metode matematice simplificate.

Simplificarea problemei optimizării constă, în etapa actuală, în aceea că se recurge la schematizarea situațiilor reale prin introducerea unor ipoteze simplificatoare cu caracter acoperitor. Având în vedere acest aspect, o parte din studiile efectuate până în prezent și-au găsit aplicarea în practică, datorită faptului că au fost finalizate sub formă de algoritmi și programe de calcul.

2.2.1 Aspecte generale ale problemei optimizării

Rezolvarea unei probleme de optimizare presupune definirea, pentru cazul analizat, a următoarelor elemente:

- a) Variabile de proiectare;
- b) Restricții de proiectare;
- c) Funcția obiectiv.

a) Variabilele de proiectare reprezintă cantități numerice reale care trebuie determinate la proiectarea unei structuri de rezistență. Acestea sunt mărimi independente care descriu anumite aspecte specifice problemei, cum ar fi: caracteristicile geometrice ale elementelor componente, configurația structurii (mărimea deschiderilor, raportul dintre înălțime și deschidere), proprietățile fizico - mecanice ale materialelor din care este confecționată structura.

Variabilele de proiectare se prezintă sub forma unui vector $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, ale cărui componente pot fi mărimi constructive, tehnologice și economice. În formularea problemei de optimizare, numărul acestor variabile trebuie să fie cât mai redus, deoarece în raport cu ele se efectuează întregul proces de optimizare.

Așa cum se arată în literatura de specialitate [94], [90], [57], pentru structurile de rezistență variabilele de proiectare se referă la:

- configurația geometrică a structurii;
- distribuția materialului în cuprinsul structurii.

Procesul de optimizare urmărește atât concepția, alcătuirea de ansamblu a structurii de rezistență și stabilirea formei ei, cât și dimensionarea elementelor care o compun. Pentru a simplifica rezolvarea problemei, modul de alcătuire a structurii și parametri ei geometrici generali se fixează în prealabil, rămânând de optimizat doar parametrii fizico-mecanici, ca de exemplu distribuția

materialului în elementele componente ale structurii de rezistență. În această situație, drept parametri de optimizare intervin anumite dimensiuni ce definesc secțiunile transversale ale elementelor, precum și caracteristicile geometrice ale acestora.

Parametri menționați pot varia, fie prin valori continue, fie discrete, conducând astfel la un număr infinit, respectiv finit de combinații posibile. Reducerea volumului problemei de optimizare este posibilă prin folosirea în alcătuirea structurilor de rezistență a unor elemente standardizate și tipizate, precum și prin impunerea anumitor considerații constructive. Astfel, se elimină variația numărului acestor parametri care caracterizează secțiunile transversale ale elementelor de rezistență, ei putând avea un număr restrâns de valori, ceea ce duce la micșorarea numărului combinațiilor acestora.

În general, deși variabilele de proiectare sunt parametri independenți, așa cum se arată în [94], există situații în care variabilele nu pot fi considerate independente. Acestea din urmă corespund cazului când variabilele satisfac fie anumite ecuații de condiție (specifice metodei eforturilor sau a deplasărilor), fie relații ce exprimă echilibrul mecanic în diferite stadii de lucru. În situațiile menționate, variabilele de proiectare reprezintă practic condiții restrictive și vor fi considerate în procesul de optimizare ca atare.

b) Restricțiile de proiectare. Condițiile care trebuie îndeplinite astfel încât o structură de rezistență să poată fi realizată din punct de vedere practic, definesc restricțiile de proiectare. Numărul acestor condiții restrictive ale problemei de optimizare deși se stabilește în funcție de variabilele de proiectare, [90], nu este obligatoriu egal cu numărul variabilelor de proiectare, iar în cele mai multe cazuri, numărul restricțiilor este mai mare decât cel al variabilelor de proiectare.

Condițiile restrictive reprezintă limitări valorice referitoare fie la dimensiunile unor elemente din componența structurilor de rezistență sau ale secțiunilor acestora, fie la o stare de tensiuni admisibilă pentru o structură metalică. De exemplu, ultimul caz implică condiționări sau limitări în ceea ce privește mărimea tensiunilor generate în structura respectivă, care nu trebuie să depășească o anumită valoare prestabilită în nici unul din punctele structurii. Totodată, pot fi impuse restricții și în ceea ce privește deformabilitatea structurii de rezistență, ori pot fi necesare condiționări care să asigure structura împotriva pierderii stabilității sau împotriva manifestării fenomenului de rezonanță.

Restricțiile de proiectare delimitează astfel domeniul soluțiilor admisibile al problemei de optimizare, iar în urma rezolvării lui, soluția optimă se alege din acest domeniu. Având în vedere acest aspect, condițiile restrictive trebuie stabilite, pentru fiecare problemă de optimizare, cu mult discernământ.

În practica optimizării structurilor de rezistență se întâlnesc în general, două tipuri de restricții: 1. Restricții de comportament;

2. Restricții de mărginire.

1. *Restricțiile de comportament* provin din cerințele de rezistență și rigiditate ale structurii de rezistență și determină domeniul în care se realizează optimizarea. De exemplu, restricțiile de comportament pot fi formulate pentru o comportare a materialului structurii în domeniul elastic, în aceste condiții optimizarea făcându-se în domeniul elastic, iar dacă restricțiile formulează condiții de

plasticitate, procesul de optimizare se conduce în domeniul plastic.

2. *Restricțiile de mărginire* provin din condițiile de limitare a unor variabile de proiectare.

Restricțiile de proiectare, exprimate analitic prin egalități ori inegalități, impun anumite limitări unei singure variabile sau unui grup de variabile și decurg din analiza situațiilor limită ce apar în etapa de realizare sau în cea de exploatare a structurii de rezistență respective.

c) Funcția obiectiv. Unul dintre cele mai importante aspecte ale procesului de optimizare îl reprezintă *alegerea funcției obiectiv*.

Aceasta se prezintă ca o funcție matematică de forma $F(x) : R^n \rightarrow R^n$, cu valori reale, care exprimă o relație liniară ori neliniară între variabilele de proiectare alese. Ea caracterizează, din punct de vedere cantitativ, criteriul de optimizare adoptat și oferă posibilitatea de a lua o decizie dintre diferitele soluții existente.

Practic, după [94], esența procesului de optimizare constă în determinarea extremelor funcției obiectiv, astfel încât să fie satisfăcute condițiile restrictive impuse.

Alegerea funcției obiectiv, care caracterizează modelul matematic al problemei de optimizare, presupune analiza amănunțită a fenomenului studiat, deoarece scrierea eronată ori omiterea unora dintre condiții poate conduce la rezultate inaplicabile în proiectare, deși din punct de vedere matematic, ele pot fi justificate.

Odată stabilite elementele ce intervin în procesul de optimizare este necesară exprimarea lor sub formă matematică. Astfel, parametrii independenți ce au fost reținuți pentru caracterizarea problemei studiate se exprimă sub forma unui vector, de forma $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Se trece apoi la formularea condițiilor restrictive care derivă din condiționările referitoare la anumite situații limită în comportarea structurii. Ele se exprimă analitic prin inegalități ori prin egalități și se pot prezenta sub următoarele forme:

1. *Ecuatii de echilibru dinamic sau static*

În cazul deformațiilor mici, tensiunile σ_{ij} ale structurii de rezistență trebuie să satisfacă ecuația de echilibru dinamic:

$$\sigma_{i,j} + f_i = \rho \cdot \ddot{u}_i \quad i, j = x, y, z \quad (2.15)$$

în care: $\sigma_{i,j}$ - componentele tensorului tensiune;

f_i - componentele vectorului forțelor masice; $\{f\} = \{X \ Y \ Z\}^T$

$\rho \cdot \ddot{u}_i$ - forțele inerțiale ale lui D'Alambert corespunzătoare unității de volum;

ρ - masa specifică;

\ddot{u}_i - componentele vectorului accelerație;

Dacă $\rho \cdot \ddot{u}_i = 0$ atunci $\sigma_{i,j} + f_i = 0$ și reprezintă ecuația de echilibru static.

2. *Condițiile de compatibilitate a deformațiilor*

Deformațiile structurii de rezistență trebuie să satisfacă condițiile de compatibilitate ale lui Saint - Venant:

$$\varepsilon_{ij,kk} + \varepsilon_{kk,ij} - \varepsilon_{ik,jk} - \varepsilon_{jk,ik} = 0 \quad i, j, k = x, y, z \quad (2.16)$$

3. *Condiții de margine*

Pentru un element al unei structuri de rezistență pot fi date, pentru o parte a suprafeței sale S_u deplasările $u_i = u_i$, iar pentru altă parte a suprafeței sale notată cu S_T , forțele exterioare T_i . Condițiile de compatibilitate cer, în acest caz, satisfacerea egalității $T_i \cdot u_i = 0$, pe suprafața $S_u \cap S_T = \emptyset$. De asemenea condițiile de margine pot apărea și sub forma unor inegalități date de expresiile:

$$u_i \leq u_i \leq u_i \quad (2.17)$$

ori

$$T_i \leq T_i \leq T_i \quad (2.18)$$

4. Restricții geometrice

Aceste restricții se referă la unele dimensiuni ale structurii de rezistență care nu trebuie să depășească anumite valori, iar formularea restricțiilor se efectuează sub forma unor încadrări ale variabilelor între o limită inferioară și alta superioară, de forma:

$$L_{\text{inf}} \leq h_i(x_1, x_2, \dots, x_p) \leq L_{\text{sup}} \quad (2.19)$$

5. Condiții de limitare a tensiunilor și deplasărilor

În optimizarea structurilor de rezistență, se poate apela la îndeplinirea unei condiții de forma

$$g_i(x) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq a_i \quad (2.20)$$

Această condiție se referă la faptul că tensiunile și deplasările care apar într-o structură de rezistență nu trebuie să depășească anumite valori limită.

6. Legi de comportare a materialului

Aceste legi stabilesc corespondența dintre tensiuni și deformații pentru elementele structurii de rezistență. Alegerea lor trebuie să corespundă proprietăților mecanice stabilite experimental și condițiilor de lucru ale structurii.

În final se formulează funcția obiectiv care, așa cum se arată în [11], în cazul calculului structurilor de rezistență are întotdeauna caracterul unei condiții de minim (de exemplu: preț de cost minim, greutate minimă) și are următoarea formă, $F(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Formal, nu există nici o deosebire între minimizarea și maximizarea funcției obiectiv, deoarece minimul lui $F(x)$ este atins pentru maximul lui $-F(x)$.

Funcția obiectiv se poate defini și printr-o funcție compusă, de exemplu:

$$F(x) = a_1 \cdot F_1(x) + a_2 \cdot F_2(x) \quad (2.21)$$

în care: a_1, a_2 - constante de pondere;

$F_1(x), F_2(x)$ - funcții obiectiv.

Problema de optimizare, din punct de vedere matematic, poate fi o problemă de programare liniară sau neliniară.

După cum se observă din cele anterior prezentate, optimizarea structurilor de rezistență se realizează în cadrul unui proces iterativ. Cercetând rezultatele obținute la fiecare iterație, se apreciază modificările ce se impun în vederea îmbunătățirii soluției finale. În condițiile unui calcul manual însă, numărul iterațiilor este relativ redus și există posibilitatea ca soluția aleasă să nu fie cea bună. Odată cu apariția calculatoarelor electronice, situația s-a îmbunătățit, existând posibilitatea realizării într-un mod mult mai eficient a unor calcule repetate, care pot duce în final la soluția optimă. La ora actuală,

optimizarea se poate realiza fie variind parametrii ce caracterizează structura de rezistență analizată, fie folosind metodele programării matematice.

2.2.2 Etape și criterii de optimizare a structurilor de rezistență

Având în vedere cele prezentate în paragraful 1.3, definirea procesului de optimizare al unei structuri de rezistență presupune considerarea unui număr mare de parametri, datorită aspectelor multiple și variate care intervin în construcția și exploatarea acestora. Din acest motiv, abordarea procesului de optimizare se efectuează în etape succesive, deoarece numai în acest mod se pot analiza eșalonat toate elementele problemei.

Etapele programului urmat, în vederea optimizării unei structuri de rezistență, implică: *formularea problemei de optimizare și rezolvarea ei.*

Formularea problemei de optimizare presupune determinarea variabilelor de proiectare, a restricțiilor de proiectare și a funcției obiectiv, pe baza cărora se poate trece la rezolvarea problemei optimizării care presupune parcurgerea următoarelor secvențe:

- a). Evaluarea încărcărilor ce trebuiesc preluate de structura metalică și gruparea lor în una sau mai multe ipoteze de încărcare;
- b). Selectarea parametrilor independenți ce caracterizează soluția optimă și stabilirea condițiilor restrictive în funcție de acești parametri. În cazul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, aceștia se referă la:
 - configurația geometrică a structurii metalice;
 - distribuția materialului în cuprinsul structurii;
- c). Stabilirea criteriului pe baza căruia se efectuează optimizarea;
- d). Definirea, pe baza criteriului ales, a funcției obiectiv care oferă posibilitatea luării unei decizii între mai multe soluții optime posibile;
- e). Alegerea, din multitudinea soluțiilor admisibile, a soluției optime care satisface condițiile restrictive impuse.

Din prezentarea acestor etape rezultă că, **legătura dintre variabile, restricții și funcția obiectiv se poate realiza prin intermediul unui criteriu de optimizare** care oferă posibilitatea alegerii celei mai potrivite soluții pentru problema analizată. Deci, în general, problemele optimizării unei structuri de rezistență sunt legate de satisfacerea unui anumit criteriu de performanță în condițiile impuse structurii metalice.

Din punct de vedere al criteriilor de optimizare, proiectarea structurilor de rezistență, după cum se arată și în [6], a cunoscut, de-a lungul timpului, o dezvoltare în mai multe etape, care se pot grupa în trei perioade distincte a căror evoluție este prezentată în fig. 2.9.

Primele criterii de proiectare au fost cele empirice care au dus la construcția unor structuri de rezistență fără efectuarea unui calcul prealabil, numai pe baza experienței și a aplicării intuitive a legilor mecanicii. Acest mod de proiectare a structurilor de rezistență a fost acceptat până în secolul al XVIII-lea și chiar mai târziu. În această perioadă s-au realizat construcții remarcabile și uneori de mare durabilitate, dar cu un cost foarte ridicat. După cum se observă din fig. 2.9 în această perioadă raportul dintre costul efectiv al construcției K și costul optim K_{optim} depășește cu mult coeficientul de

siguranță care la rândul său, nu era definit și controlat [3]. În cadrul acestei etape, începând cu secolul al XV-lea, proiectarea structurilor de rezistență, sub aspectul conceptului de optimizare, s-a realizat pe baza criteriilor tehnice, adoptate în urma studiilor efectuate de Leonardo da Vinci, privitoare la posibilitățile de optimizare a unor probleme de rezistență (folosind principiile mecanicii), fără însă a le formula ori încadra în metodele matematice. Bazele teoretice ale acestor criterii au fost puse mult mai târziu, de către R.Hooke, L.Euler, D.Bernoulli, L.Navier care au efectuat cercetările experimentale și au elaborat relațiile de calcul ce au condus la formularea teoriei optimizării, valabilă și astăzi. Folosirea criteriilor tehnice în proiectarea structurilor de rezistență, sub aspectul

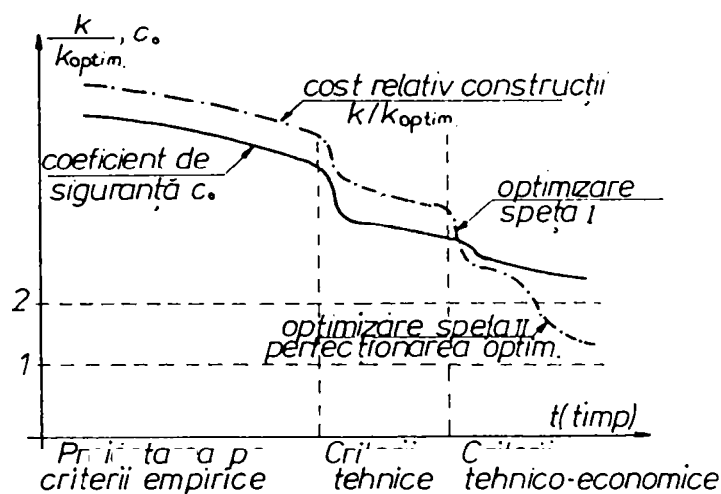


Fig. 2.9. Evoluția criteriilor de optimizare

conceptului de optimizare, a avut ca efect obținerea, pentru structurile analizate, a unui grad de siguranță egal sau mai mare decât cel impus prin calcule, rezultând o mulțime de soluții care corespund criteriilor tehnice date. În aceste condiții, costul relativ al structurii de rezistență, reprezentat de raportul K/K_{optim} , înregistrează o îmbunătățire față de perioada precedentă, îmbunătățire evaluată prin apropierea valorii raportului mai sus menționat de cea a coeficientului de siguranță folosit în proiectare.

La mijlocul secolului XX, odată cu elaborarea primelor studii, care au vizat aspecte legate de greutatea proprie a structurilor de rezistență, cantitatea de material folosită la confecționarea lor, prețul de cost al materialelor și al manoperei încorporate, topologia structurii, precum și distribuția materialelor în secțiunea transversală a elementelor structurale, se poate aprecia că, proiectarea s-a efectuat deja pe baza unor criterii tehnico-economice de optimizare. Această perioadă este considerată ca etapă superioară în evoluția criteriilor de optimizare, fundamentate pe teoriile moderne de optimizare, prin aplicarea cărora au fost realizate structuri de rezistență eficiente, obținute cu un efort economic mai mic pentru același grad de siguranță impus de norme. După cum se observă din fig. 2.9, pe măsura perfecționării metodelor de proiectare economică, costul relativ al structurilor realizate, tinde spre valoarea ideală, respectiv raportul K/K_{optim} tinde să se apropie de valoarea unitară a procesului de optimizare, [6].

Evoluția și perfecționarea continuă a teoriilor de optimizare a avut drept rezultat, așa cum se arată în [94], ca în momentul de față să fie formulate următoarele criterii generale de optimizare:

- a. Criteriul tehnic;
- b. Criteriul economic;

c. Criteriul eficienței în exploatare.

a. Criteriile tehnice, folosite în optimizarea structurilor de rezistență, iau forma unei probleme de extrem (maxim sau minim) a unei caracteristici a acestora și duc la stabilirea soluțiilor de alcătuire a structurilor metalice.

După cum am arătat la punctul 2.1.1, optimizarea structurilor de rezistență se poate realiza prin calcul efectuat atât în domeniul elastic, cât și în domeniul plastic.

În domeniul elastic, principalele criterii tehnice de optimizare, așa cum se arată în [90], sunt:

- determinarea structurilor de greutate minimă, având rigiditatea dată;
- determinarea structurilor de rigiditate maximă, având greutatea cunoscută;
- determinarea repartiției optime a materialului din care este alcătuită structura, astfel încât energia potențială să fie minimă, pentru un volum dat de material;
- determinarea structurilor de rezistență de volum minim având energia potențială de deformație cunoscută;
- determinarea structurilor de egală rezistență;
- determinarea sarcinii critice maxime la pierderea stabilității structurii de rezistență;
- determinarea structurii de rezistență astfel încât fiabilitatea acesteia să fie maximă;
- determinarea frecvenței propriie de vibrație a structurii astfel încât acesta să fie minimă.

În ceea ce privește criteriile tehnice de optimizare în domeniul plastic, după [90], ele se referă la:

- determinarea structurilor de greutate minimă la atingerea stării limită de pierdere a capacității portante;
- determinarea structurilor având capacitatea portantă maximă sau coeficientul de siguranță maxim în momentul atingerii stării limită, pentru un volum dat de material;
- determinarea structurilor de egală rezistență din condiția de tensiune pătratică minimă.

Aceste criterii corespund unei singure scheme de optimizare și anume: determinarea formei și a dimensiunilor structurii corespunzătoare unor anumite tipuri de încărcări, care să conducă la parametrii optimi din punct de vedere al unuia dintre criteriile de rezistență sau rigiditate.

b. Criteriile economice folosite în optimizarea structurilor de rezistență pot fi multiple, fiecare dintre ele putând conduce la un optim diferit în raport cu același parametru.

Cercetările întreprinse până la ora actuală, în scopul aplicării criteriilor economice la dimensionarea structurilor de rezistență, pornesc, în principiu, de la ideea minimizării greutății proprii a structurii sau de la cea a obținerii unor cheltuieli de producție cât mai mici, [94]. În acest caz, funcția obiectiv este prețul de cost al structurii.

Cel de-al treilea criteriu menționat în literatura de specialitate, referitor la eficiența în exploatare, are o sferă de aplicabilitate mai restânsă în cazul optimizării structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, deoarece în scopul obținerii unor reduceri semnificative ale greutății proprii, se admit costuri inițiale sporite, iar din această cauză, folosirea lui este justificată doar pentru anumite categorii de structuri, de exemplu, pentru proiectarea structurilor aerospațiale.

Decizia de alegere a unui criteriu sau de stabilire a unei priorități în alegerea acestora, este în funcție de conjunctura în care se află utilajul din care face parte structura de rezistență analizată.

Indiferent însă de criteriul ales, procesul de optimizare presupune existența unor implicații și conexiuni multiple, care trebuie să țină seama de totalitatea aspectelor și a condițiilor ce definesc fenomenul studiat. În caz contrar, concluziile care rezultă pot fi eronate, dar totuși există situații în care conducerea procesului de optimizare a structurilor de rezistență pe baza unui criteriu singular, fără considerarea corelațiilor cu alți parametri, nu duce la obținerea soluției optime. **Criteriile folosite în optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice sunt, în general, cele de ordin tehnic și economic.**

Deoarece alegerea criteriului de optimizare depinde de o multitudine de condiții pe care trebuie să le îndeplinească structura de rezistență, oricare dintre criteriile anterior prezentate, pot avea o influență hotărâtoare asupra rezultatului final al optimizării. Deocamdată însă nu există un criteriu de optimizare absolut care să fie valabil în toate situațiile. În ultimul timp se manifestă tendința de a folosi noi criterii de apreciere care să ia în considerare atât aspectele funcționale, cât și aspectele legate de exploatarea și întreținerea utilajului din care face parte structura de rezistență. Se menționează însă că, **în activitatea de proiectare a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, criteriile de optimizare se referă în special la reducerea cantității de material (oțel) și a prețului de cost al acestuia, precum și la reducerea consumului de muncă și a duratei de execuție.**

De asemenea, trebuie remarcat că, **tendința actuală în abordarea criteriilor de optimizare se manifestă atât în sens cantitativ**, prin majorarea continuă a ariei problemelor de proiectare cuprinse, **cât și în sens calitativ**, prin perfecționarea algoritmilor de optimizare și a limbajelor de programare.

2.2.3. Metode de optimizare a structurilor de rezistență

Metodologia optimizării este, [81], un ansamblu de tehnici matematice și statistice, utilizate pentru modelarea sistemelor, în care un răspuns de interes este influențat de câteva variabile, iar obiectivul ei este acela de optimizare a răspunsului, din punct de vedere al unor criterii prestabilite. Aceste criterii, după cum s-a prezentat anterior, sunt dictate de relația dintre funcția obiectiv și condițiile restrictive impuse, relația lor de legătură, exprimată matematic, la modul cel mai general la punctul 2.2.1, duce la obținerea răspunsului în problema analizată. Dacă răspunsul estimat se notează cu $E(F) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = F$, atunci $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ generează o suprafață de răspuns care este dependentă de nivelele variabilelor x_1, x_2, \dots, x_n .

În majoritatea problemelor de optimizare, forma relației de legătură dintre funcția obiectiv și condițiile restrictive este necunoscută. Frecvent, relația de legătură se exprimă prin funcții polinomiale de forma:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + e \quad (2.22)$$

ori funcții polinomiale de ordin superior, de forma:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + e \quad (2.23)$$

în care: e - eroarea de calcul în determinarea răspunsului funcției $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Problemele de optimizare, utilizează fie una, fie ambele aproximări polinomiale (2.22), (2.23), însă nici una din ele nu oferă un răspuns pentru întregul domeniu de valori ale variabilelor, ci doar pentru o regiune de dimensiuni relativ mici. Pentru rezolvarea acestor probleme, în practica optimizării structurilor de rezistență există numeroase metode de optimizare care se pot clasifica după cum urmează:

a). În funcție de restricțiile de proiectare

Metode de optimizare necondiționată

Metode de optimizare condiționată

b). În funcție de numărul variabilelor de proiectare

Metode dependente de o variabilă

Metode dependente de mai multe variabile

c). În funcție de numărul criteriilor de optimizare folosite

Metode de optimizare monocriteriale

Metode de optimizare multicriteriale

Metodele de optimizare necondiționată, se folosesc doar în rezolvarea problemelor în care nu apar restricții de proiectare, iar determinarea vectorului variabilelor de proiectare, X , se face astfel încât valoarea funcției obiectiv, $F(x)$ să fie minimă.

Dacă există restricții de proiectare, atunci problemele se rezolvă prin *metode de optimizare condiționată* care, la rândul lor, se împart în două categorii: dacă restricțiile de proiectare se înglobează în funcția obiectiv sau dacă se elimină integral.

Alegerea uneia dintre aceste metode este determinată, de eficiența procedurii de rezolvare, procedeu care se studiază pe probleme test, având grade de dificultate diferite. Analiza eficienței procedurii se face pe tot parcursul procesului de optimizare și depinde de eroarea de rotunjire introdusă de calculator și de numărul variabilelor de proiectare care caracterizează problema.

În cazul rezolvării *problemelor de optimizare dependente de o singură variabilă*, minimul funcției obiectiv $F(x)$ se determină prin rezolvarea unei ecuații de forma:

$$\frac{dF(x)}{dx} = 0 \quad (2.24)$$

care reprezintă condiția necesară ca „ x ”, să fie un punct de extrem. Această categorie de metode este aplicabilă numai dacă funcția obiectiv este derivabilă, iar ecuația ei (2.24) are o formă relativ simplă.

Metodele de optimizare dependente de mai multe variabile se folosesc atunci când, în situațiile practice, este necesară determinarea minimului unei funcții $F(x)$, fără a avea alte condiții suplimentare impuse variabilelor x_1, x_2, \dots, x_n ale vectorului „ x ”. În aceste condiții este necesară determinarea vectorului „ x^* ”, pentru care gradientul funcției obiectiv este nul, adică:

$$\nabla F(x^*) = 0 \quad (2.25)$$

unde gradientul funcției obiectiv este vectorul derivatelor parțiale de ordinul întâi. Din punct de vedere practic, rezolvarea acestei ecuații este mai complicată, deoarece componentele gradientului funcției obiectiv pot fi funcții implicite, dependente de x și neliniare [14]. În acest caz, pentru rezolvarea problemei se apelează la o metodă numerică de determinare a minimului funcției $F(x)$,

printr-o metodă iterativă.

La baza metodelor de optimizare dependente de mai multe variabile și cu condiții restrictive stă programarea matematică. Astfel, dacă funcția obiectiv și restricțiile sunt liniare, rezolvarea se face prin programare liniară, iar dacă funcția obiectiv și restricțiile sunt neliniare, se utilizează programarea neliniară.

Deși majoritatea problemelor practice de optimizare nu pot fi rezolvate prin programare liniară, totuși studierea acestor metode este justificată prin aceea că:

- stau la baza dezvoltării problemelor de programare neliniară și a conceptelor matematice de optimizare;

- pot rezolva problemele din programarea neliniară cu condiția ca acestea să fie liniarizate.

Majoritatea problemelor practice de optimizare pot fi rezolvate cu ajutorul metodelor de optimizare prin programare neliniară sau combinații ale acestora:

- metoda diferențierii;
- metoda variabilelor dublate;
- metoda multiplicatorilor lui Lagrange;
- metode numerice;
- metode de programare liniară;
- metode de calcul variațional.

În continuare se prezintă principiile generale de calcul ce stau la baza acestor metode:

a) Metoda diferențierii

În condițiile în care restricțiile funcționale lipsesc, iar cele de ordin spațial pot fi temporar neglijate, optimul parametrilor poate fi determinat direct, din anularea derivatelor funcției obiectiv, F , funcție de parametrii x_1, x_2, \dots, x_n :

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial F}{\partial x_2} = 0, \quad \dots, \quad \frac{\partial F}{\partial x_n} = 0 \quad (2.26)$$

În cazul unui singur parametru, x_1 , metoda este echivalentă din punct de vedere grafic cu găsirea unui punct de pe curba $F = F(x_1, x_2) = 0$, în care tangenta are unghiul de înclinare zero.

În cazul a doi parametri, x_1 și x_2 , metoda este echivalentă grafic cu găsirea unui punct de pe suprafața $F(x_1, x_2, x_3) = 0$, în care planul tangent are înclinarea zero, fig. 2.10.

Pe această bază, în unele cazuri, când se cunosc curbele experimentale, $F(x_1) = 0$, $F(x_2) = 0 \dots F(x_n) = 0$, iar ele admit maxime sau minime, valorile optime ale parametrilor x_1, x_2, \dots, x_n se determină direct de pe aceste curbe, ca valori care asigură extremul funcției.

b) Metoda variabilelor dublate

În conformitate cu această metodă, fundamentată de C. Zener, optimizarea se reduce în condițiile lipsei restricțiilor funcționale și spațiale la minimizarea unei funcții (de cele mai multe ori prețul de cost) compuse din „n” membri: $F = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n$

În acest caz, variabilele dublate u_i pot fi definite astfel: $u_i = a_i x_i$

În continuare, se folosește teorema

$$\sum a_i x_i \geq x_1^{a_1} \cdot x_2^{a_2} \cdot \dots \cdot x_n^{a_n}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 df_1 = \sum_1^n \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_i} dx_i = 0 \\ \lambda_2 df_2 = \sum_1^n \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial x_i} dx_i = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \lambda_m df_m = \sum_1^m \lambda_m \frac{\partial f_m}{\partial x_i} dx_i = 0 \end{array} \right. \quad (2.32)$$

Din relațiile (2.30) cu (2.32) se obține:

$$dF + \lambda_1 df_1 + \lambda_2 df_2 + \dots + \lambda_m df_m = 0$$

sau:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} + \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_i} + \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial x_i} + \dots + \lambda_m \frac{\partial f_m}{\partial x_i} \right) dx_i = 0 \quad (2.33)$$

Întrucât variabilele „ x_i „ sunt independente, fiecare din cei „ n ” termeni ai sumei cuprinși în paranteză trebuie să se anuleze separat

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} + \lambda_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_i} + \lambda_2 \frac{\partial f_2}{\partial x_i} + \dots + \lambda_m \frac{\partial f_m}{\partial x_i} = 0. \quad (2.34)$$

în care $i = 1, 2, 3 \dots, n$.

Din sistemul (2.23) de „ n ” ecuații, combinat cu cele „ m ” ecuații (2.20) de restricție funcțională, se pot determina parametrii „ x_i ” și multiplicatorii lui Lagrange „ λ_i ”. Ansamblul acestor parametri reprezintă soluția optimă din punctul de vedere al criteriului de optimizare folosit. De regulă, problemele de optimizare sunt însă mult mai complexe, în special datorită creșterii numărului și complexității restricțiilor; în asemenea cazuri, pentru rezolvarea sistemului de ecuații trebuie folosite mijloacele automate de calcul.

d) Metode numerice de optimizare

În cazul problemelor practice de optimizare, extremele funcției obiectiv nu se pot determina analitic din cauza complexității lor și de aceea se utilizează metode numerice aproximative dintre care amintim : - metoda căutării unilaterale alternative;

- metoda gradientului maxim.

Ambele metode extremează funcția scop în condițiile inexistenței restricțiilor.

Dacă funcția obiectiv conține un singur parametru x_1 , extremul se regăsește ușor, direct de pe curbele de variație, care au forma din fig.2.10. Dacă funcția obiectiv conține două variabile, $F = F(x_1, x_2)$ atunci minimul sau maximum acestei funcții se găsesc pe „vârful văii” respectiv pe „fundul movilei”, [111], fig.2.10, extremele astfel găsite fiind extreme locale.

d.1 Metoda căutării unilaterale alternative

În cadrul acestei metode, se aleg valorile inițiale x_{10} și x_{20} , ale celor doi parametri, considerând că extremul căutat este $F_{00}(x_{10}, x_{20})$ fig. 2.10. Dacă se păstrează x_2 constant, atunci $x_2 = x_{20}$, și se caută extremul pe curba $F(x_1)$. Se găsește astfel punctul $F_{10}(x_{11}, x_{20})$. Dacă x_1 este constant, atunci $x_1 = x_{11}$, și se caută extremul pe curba $F(x_2)$, punctul de extrem fiind $F_{11}(x_{11}, x_{21})$.

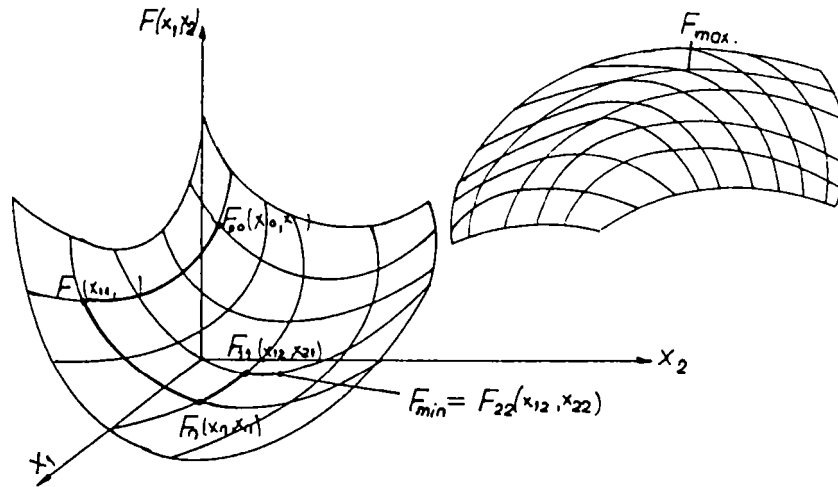


Fig. 2.10 Determinarea geometrică a minimului și maximumului funcției obiectiv prin metoda căutării unilaterale alternative

Se face apoi din nou x_2 constant, adică $x_2 = x_{21}$ și se găsește minimumul funcției $F(x_1) = F_{22}(x_{12}, x_{21})$. În final, dacă $x_1 = x_{12}$, se găsește minimumul de pe curba $F(x_2)$, care corespunde punctului $F_{22}(x_{12}, x_{22})$. Dacă se continuă căutările pe curba $F(x_1)$, la $x_2 = x_{22}$, se constată că mergând în ambele sensuri funcția F crește. Prin urmare, punctul F_{22} este un minim și din punct de vedere al parametrilor x_1 . În cazul acestei metode de regulă, sunt necesare multe încercări până la aflarea extremele funcției obiectiv F .

d.2 Metoda gradientului maxim

Pentru o căutare mai rapidă, trebuie scurtat drumul de la F_{00} la F_{min} . Astfel, în locul principiului folosit la metoda căutării unilaterale alternative, se folosește metoda prezentată în continuare.

Dacă funcția scop $F = F(x_1, x_2)$ este derivabilă, iar în punctul inițial (x_{10}, x_{20}) derivatele au valorile $\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)_0$ și $\left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)_0$, pentru ca deplasarea rezultată să se producă după direcția liniei celei mai abrupte, $F_{00} - F_{11}$ (fig. 2.11), componentele deplasării pe direcțiile x_1 și x_2 trebuie să fie:

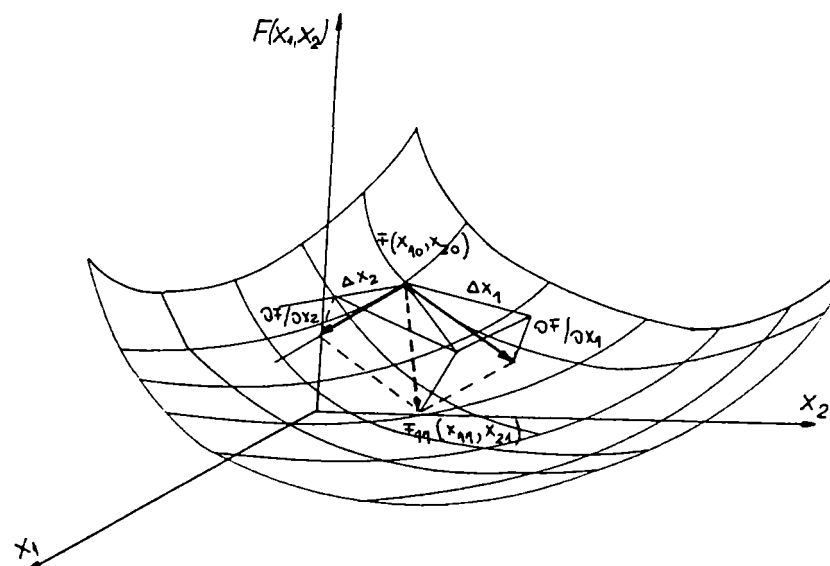


Fig. 2.11 Determinarea geometrică a minimului și maximumului funcției obiectiv prin metoda gradientului maxim

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &\approx -\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)_0 \\ \Delta x_2 &\approx -\left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)_0\end{aligned}\quad (2.24)$$

Pentru un coeficient de proporționalitate y , noile coordonate ale funcției $F = F_{11}$ vor fi:

$$\begin{aligned}x_{11} &\approx x_{10} - y\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)_0 \\ x_{21} &\approx x_{20} - y\left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)_0\end{aligned}\quad (2.25)$$

Funcția obiectiv este:

$$F_{11} = \left\{ \left[x_{10} - y\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)_0 \right] \left[x_{20} - y\left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)_0 \right] \right\} \quad (2.26)$$

Coeficientul de proporționalitate (distanța necesară a fi parcursă pe direcția cea mai abruptă - de gradient maxim) rezultă din condiția de minim pentru funcția obiectiv, dată de relația (2.27).

$$\frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (2.27)$$

Această valoare F_{11} , a funcției obiectiv și parametrii x_{11} și x_{21} devin puncte de plecare pentru următoarea iterație, procesul continuând până când derivatele $\frac{\partial F}{\partial x_1} = 0$ și $\frac{\partial F}{\partial x_2} = 0$ devin foarte apropiate de zero. În mod similar se tratează și funcția obiectiv cu mai mult de doi parametri.

e) Optimizarea prin calcul variațional

Uneori prin optimizare nu se cere găsirea unor valori optime a unor parametri, ci însăși repartiția optimă a acestora pe domeniul studiat, adică funcția optimă. Rezolvarea unor astfel de probleme presupune folosirea calculului variațional.

Problema constă în găsirea funcției $y = y(x)$ care optimizează integrala I (funcțională).

$$I = \int_{x_1}^{x_2} F\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) dx \quad (2.28)$$

funcția F fiind dublu derivată.

Funcția căutată $y(x)$ trebuie să satisfacă condiția lui Euler

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y'} = 0 \quad (2.29)$$

Atunci când trebuie determinat minimul integralei I , în condițiile unei restricții funcționale J :

$$J = \int_{x_1}^{x_2} G\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) dx = K \quad (2.30)$$

pentru minimizarea integralei din relația (2.31):

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[F\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) - G\left(x, y, \frac{dy}{dx}\right) \right] dx \quad (2.31)$$

condiția lui Euler are forma:

$$\frac{\partial F}{\partial y} - y \frac{\partial G}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y'} + \lambda \frac{d}{dx} \frac{\partial G}{\partial y'} = 0 \quad (2.32)$$

coeficientul λ - multiplicatorul lui Lagrange.

2.2.4. Evaluarea fazelor și analiza factorilor care influențează optimizarea unei structuri de rezistență

Realizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, solicită, în mod direct, două compartimente principale, și anume pe cel al proiectării și pe cel al execuției.

Procesul de proiectare al unei structuri de rezistență este un proces complex care presupune conceperea și stabilirea elementelor necesare realizării temei de proiectare propuse, astfel încât, în final, structura realizată să corespundă scopului propus.

În acest sens, proiectarea are de rezolvat numeroase și variate probleme care intervin în legătură cu rezistența, stabilitatea, siguranța, durabilitatea, calitatea și destinația utilajului din care face parte structura de rezistență proiectată. În cadrul acestei activități, informațiile care intervin permanent și soluțiile intermediare care rezultă se intercondiționează făcând ca proiectarea, atât concepția cât și calculul, să fie reluată parțial sau total. Se dovedește astfel că, proiectarea unei structuri de rezistență este un proces iterativ, susceptibil la îmbunătățiri pe baza studiilor permanente de optimizare. Cercetarea în teoria structurilor este îndreptată spre obținerea de informații privind metodele de calcul, tehnologiile de execuție cele mai eficiente, precum și necesitățile și cerințele economice generale.

Prima etapă în procesul de proiectare este *studierea temei* și stabilirea soluției de ansamblu pe baza datelor inițiale ce definesc structura de rezistență. În această fază a proiectării, se stabilesc toate legăturile dintre elementele structurii și se precizează schema generală de alcătuire a acesteia. Pe baza schemei se stabilesc solicitările din diferitele elemente ale structurii de rezistență, se analizează rezultatele obținute, după care se trece la verificări prin calcule a soluțiilor adoptate. Cunoscând valorile solicitărilor, natura lor, grupările acestora și condițiile în care structura lucrează în exploatare, se alege marca și clasa de calitate a oțelului din care aceasta este confecționată.

Se precizează că, la ora actuală, în domeniul construcției structurilor de rezistență nu pot fi folosite metode de proiectare care să permită determinarea directă a formei, a dimensiunilor și a celor mai eficiente materiale. În mod obișnuit, forma, dimensiunile și materialele din care se execută elementele structurii de rezistență se aleg anticipat pe baza unor criterii, după care se verifică prin calcule modul de comportare al structurii și al elementelor acesteia, făcându-se apoi corectări care să permită elaborarea mai multor variante de soluții constructive, dintre care, în final, se va alege soluția optimă.

Tot în faza de proiectare, se analizează posibilitățile de eliminare sau reducere a influențelor defavorabile care periclitează siguranța construcției și se iau măsuri în ceea ce privește economia de material, urmărindu-se în acest fel reducerea costului inițial al investiției, inclusiv cheltuielile de întreținere și exploatare.

Deci, se urmărește o optimizare care, în ansamblu, apare ca un proces de „*triere sistematică a soluțiilor posibile ale unei probleme*”. Această activitate are ca scop selectarea acelei soluții care în limitele unui cadru de referință definit prin condițiile admise sau impuse inițial, conduce la folosirea cea mai avantajoasă a resurselor de care se dispune, [76].

Realizarea unei structuri de rezistență care să corespundă scopului urmărit **este în primul rând, rezultatul activității de proiectare care**, încă de la stabilirea primei variante de soluție constructivă, **trebuie să aibă în vedere modul în care structura respectivă se va executa și apoi exploata**. Astfel, activitatea prin care se execută structura de rezistență are rolul de a materializa ceea ce este conceput prin proiectare.

Activitatea de execuție constă într-o înlănțuire de operații care duc în final la realizarea efectivă a proiectului. După cum am arătat în paragraful 1.1, structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice sunt alcătuite din elemente care se confecționează în întreprinderi, specializate în astfel de lucrări, pe baza desenelor de execuție elaborate în faza de proiectare. Înainte însă de începerea execuției acestor elemente, se examinează în întreprinderea producătoare desenele de execuție, listele cu materialele necesare, condițiile tehnice prevăzute în proiect, iar în cazul în care se constată existența unor erori se sesizează întreprinderea care a realizat proiectul.

În general, o întreprindere producătoare de elemente metalice pentru structurile de rezistență, rațional organizată, cu personal bine calificat și utilaje corespunzătoare este în măsură să asigure structurilor metalice realizate, calitatea și gradul de siguranță prevăzute prin proiect.

De asemenea, trebuie remarcat faptul că orice greșeală de execuție, chiar dacă în urma activității de proiectare a dus la obținerea unei soluții optime, poate duce la reducerea calității structurii de rezistență în ansamblu. În acest sens, se observă că cele mai bune rezultate se obțin atunci când activitatea de proiectare și execuție se desfășoară în mod coordonat.

În ceea ce privește exploatarea structurii de rezistență, aceasta se face respectând destinația, modul și condițiile de lucru stabilite prin tema de proiectare. În timpul activității de exploatare, structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice sunt supuse uzării, datorită acțiunilor mediului exterior sau a solicitărilor provenite din acțiunile normale sau accidentale, toate acestea putând avea repercursiuni negative asupra durabilității și siguranței construcției. Evitarea acestor fenomene sau micșorarea efectului lor se poate face prin acțiuni de întreținere, în urma cărora, se pot pune în evidență defectele de execuție și montaj, ce nu au fost depistate la verificările anterior făcute. Deci, o exploatare corectă contribuie la menținerea calității structurii de rezistență și prelungirea duratei de viață a utilajului din care face parte.

Problema optimizării unei structuri de rezistență presupune, așa cum rezultă și din subcapitolele 2.1, 2.2, soluționarea dificultăților majore care derivă îndeosebi din existența unor multitudini de parametrii, condiții și relații ce descriu comportarea structurii metalice sub acțiunea încărcărilor din exploatare.

Existența acestor dificultăți, impune ca **cea mai indicată cale de rezolvare a problemei de optimizare să fie cea de soluționare pe faze**, adică o rezolvare:

- în etapa de proiectare a structurii de rezistență;

- în cursul procesului tehnologic de execuție al elementelor structurii;
- la organizarea activităților de transport, montaj, întreținere și exploatare.

Acest mod de abordare al problemei derivă și din faptul că, la ora actuală, nu dispunem de suficiente date pentru a putea rezolva o optimizare de ansamblu și nici nu există suficiente elemente pentru stabilirea unei funcții generale de optimizare.

În ceea ce privește **optimizarea în faza de proiectare a unei structuri de rezistență**, aceasta se poate realiza, [76], luând în considerare:

- tipul de structură și materialul din care este confecționată;
- acțiunile reale aplicate structurii metalice;
- metoda de calcul.

Optimizarea pe seama tipului de structură se face operând asupra configurației acesteia, a dimensiunilor elementelor și a formei secțiunilor; în ceea ce privește optimizarea pe seama materialului structurii, aceasta se concretizează în exploatarea eficientă a caracteristicilor fizico-mecanice reale ale acestuia.

Optimizarea pe seama acțiunilor reale care solicită structura de rezistență, presupune ca pentru calculul acesteia, evaluarea calitativă și cantitativă a acțiunilor exterioare să modeleze cât mai fidel modul de lucru real al structurii în exploatare.

În ceea ce privește metoda de calcul utilizată, la ora actuală, optimizarea structurilor de rezistență se poate conduce prin aplicarea celor mai avansate teorii de calcul, pe baza cărora este posibilă soluționarea numerică cât mai exactă a problemei.

După cum se observă din cele anterior prezentate, **rezolvarea problemei optimizării în faza de proiectare a unei structuri de rezistență se poate realiza eșalonat, prin analiza etapizată a caracteristicilor structurii**. Astfel, într-o primă etapă, se găsește soluția optimă luând în considerare variația elementelor geometrice ce definesc structura. Extinzând analiza la nivelul fiecărui element al structurii, rezultă noi posibilități de a obține economii de material prin schimbarea modului său de alcătuire. Una dintre cele mai importante etape ale procesului de optimizare, în faza de proiectare o reprezintă *studiul secțiunii transversale a elementelor structurii*. Cu toate acestea, din considerente practice și pentru a urgenta aflarea soluției optime a problemei optimizării, de regulă se recurge la fixarea prealabilă a configurației geometrice a structurii și a parametrilor săi caracteristici, rămânând de optimizat, în această fază, doar distribuția materialului pe secțiunea transversală și în lungul elementelor structurii.

În ceea ce privește **optimizarea în faza de execuție a structurii de rezistență**, aceasta este condiționată de:

- specificul și caracteristicile procesului tehnologic;
- modul de realizare a elementelor structurii;
- particularitățile soluției constructive alese.

Scopul optimizării în faza de execuție a structurii metalice este același ca și în faza de proiectare și anume, alegerea soluției optime pentru structura de rezistență analizată care să se justifice din punct de vedere tehnic și economic. Astfel, optimizarea în această fază presupune:

- adaptarea soluțiilor constructive la posibilitățile de fabricație ale întreprinderii în care se realizează structura;
- stabilirea rațională a tipodimensiunilor elementelor, în vederea reducerii pierderilor de materiale;
- folosirea elementelor tipizate și standardizate pentru reducerea duratei de execuție, a consumurilor de materiale și manoperă;
- organizarea rațională a activităților de transport și montaj.

În cele mai multe cazuri, cheltuielile efectuate pentru realizarea unei structuri de rezistență nu depind numai de cantitatea de material folosit, ci și de specificul și totalitatea operațiilor de prelucrare, transport și montare a elementelor componente, de alcătuirea structurii respective, de cheltuielile de exploatare și întreținere. Astfel, pentru aplicarea acestui criteriu trebuie să se realizeze o ierarhizare a parametrilor care influențează structura respectivă, astfel încât în procesul optimizării să se țină seama doar de acei parametri a căror influență este esențială.

Referitor la execuția în atelier a elementelor structurilor de rezistență, măsurile tehnologice care se impun în vederea reducerii consumului de manoperă, se referă la:

- introducerea sudării, ca mijloc de asamblare a elementelor structurii de rezistență;
- aplicarea metodelor automate sau semiautomate de sudare sub strat de flux și a metodelor rapide de sudare cu topire adâncă;
- introducerea metodelor manuale și automate de tăiere cu gaze;
- folosirea mașinilor de găurit și perforat multiple.

S-a dovedit, [90], că o structură de greutate minimă nu este întotdeauna cea mai economică., deoarece, în multe cazuri, realizarea unei astfel de structuri costă mai scump decât o structură care consumă o cantitate mai mare de material, dar care permite o execuție cu un consum redus de manoperă, astfel încât în ansamblu, structura de rezistență să fie mai economică.

Acest lucru explică faptul că, de cele mai multe ori, în afara condiției principale de optimizare se impun și condiții secundare ce definesc clasa de funcții în care trebuie căutată soluția optimă. Acestea pot fi dictate de tehnologia de execuție, funcționalitatea structurii, considerații de ordin estetic, exploatare și întreținere.

Astfel, **gradul de industrializare al întreprinderii în care se realizează structura, durata de execuție, consumurile de materiale și manoperă, durata de amortizare a investiției, caracterizează suficient de bine procesul de optimizare în faza de execuție**, deoarece îmbunătățirea continuă a acestora conduce la obținerea unor efecte utile maxime, cu un efort economic minim.

În analiza detaliată a problemei optimizării utilajelor metalurgice trebuie avut în vedere atât faptul că acestea generează încărcări, a căror acțiune complexă se manifestă asupra structurii de rezistență proprii, a halelor industriale și a căilor de rulare, cât și că au rol de consumator important de energie. Astfel, reducerea consumurilor materiale necesare la realizarea utilajelor metalurgice, nu înseamnă numai consum minim de metal pentru fabricarea acestora, ci și consumuri mai reduse de energie electrică.

Dintre posibilitățile de reducere a consumului de metal folosit la confecționarea utilajelor metalurgice se menționează:

- efectuarea unor calcule de optimizare;
- reconsiderarea numărului anexelor utilajului;
- propunerea de noi soluții constructive.

În ceea ce privește reducerea consumului de energie, acest lucru se poate realiza atât în procesul de execuție al utilajului cât și în exploatarea acestuia. Reducerea consumului de energie necesară execuției utilajului se realizează prin:

- reducerea numărului subansamblelor componente;
- scăderea numărului și a lungimii cusăturilor sudate;
- micșorarea numărului decupajelor și a tăieturilor, prin prevederea tablelor și a profilelor la dimensiunile de laminare.

În procesul de exploatare al utilajului, micșorarea consumului de energie se poate obține prin reducerea greutateilor proprii ale diferitelor subansamble, aceasta realizându-se prin:

- proiectarea optimă a structurii de rezistență a utilajului;
- dimensionarea economică a mecanismelor de acționare și a elementelor anexe.

După cum s-a arătat în cele prezentate la punctul 2.2.2, *optimizarea pe baza criteriilor tehnice* duce la stabilirea soluțiilor constructive ale structurii de rezistență, soluții care asigură acesteia rezistență și stabilitate în exploatare, iar *optimizarea pe baza criteriilor economice* duce la ideea minimizării greutății proprii a structurii sau la obținerea unor cheltuieli de producție cât mai reduse și reprezintă o măsură a eficienței economice. Mult timp, în optimizarea structurilor de rezistență, criteriile tehnice s-au bucurat de o mare atenție din partea specialiștilor, în timp ce criteriile economice, fără a fi neglijate total, au vizat doar unele aspecte secundare ale problemei optimizării. În prezent, se consideră că o soluție rațională pentru o structură de rezistență poate fi obținută numai dacă se ține cont, în egală măsură, de multitudinea factorilor ce o condiționează, acest lucru impunând îmbinarea armonioasă a celor două tipuri de criterii.

Interdependența dintre acestea se explică prin faptul că prețul de cost al unei structuri de rezistență este alcătuit din costurile materialelor din care se execută elementele acesteia, costurile de fabricație, transport și montaj, precum și din costul operațiilor de întreținere pe durata existenței construcției din care face parte structura. În ansamblul lor, costurile materialelor sunt practic proporționale cu greutatea acestora, adică orice micșorare a prețului materialelor duce la o scădere a greutății structurii metalice. Există situații când structurile de rezistență sunt executate din două sau mai multe materiale, iar minimizarea costurilor conduce la minimizarea ponderată a greutății lor, factorii de pondere fiind prețurile materialelor, care apar explicit în procesul de optimizare.

La structurile de rezistență executate dintr-un singur material, cum este cazul celor întâlnite la utilajele metalurgice, minimizarea greutății lor asigură implicit minimizarea costului în procesul de optimizare.

Dacă cantitatea de material reprezintă elementul determinant în stabilirea costului structurii, criteriul capătă forma *condiției de greutate minimă*. Această situație este frecvent întâlnită în cazul

structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, care sunt alcătuite din elemente standardizate, și la care costul operațiilor de prelucrare și asamblare se evaluează de obicei în funcție de greutate. Astfel se explică atenția deosebită acordată, în literatura de specialitate, structurilor de greutate minimă.

Se observă că **procesul de optimizare al structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice este un proces deosebit de complex care se realizează pe faze (proiectare, execuție, exploatare)**, iar calitatea soluțiilor obținute în urma optimizării depinde de modul de coordonare a celor trei faze și nu în ultimul rând de interdependența dintre ele.

După cum a rezultat din studiul bibliografic, în condițiile economiei actuale, cerințele cele mai importante care stau la baza concepției construcțiilor metalice ale utilajelor metalurgice sunt:

- realizarea unor utilaje care să satisfacă condițiile impuse de siguranța în funcționare;
- realizarea unor utilaje a căror greutate să fie cât mai redusă, ceea ce presupune un consum minim de metal;
- realizarea unor utilaje pentru a căror exploatare consumul de energie să fie cât mai redus.

Având în vedere cele anterior enunțate, **proiectarea economică a utilajelor metalurgice necesită luarea în considerare a numeroși factori obiectivi și subiectivi**. Unii dintre aceștia au influențe contradictorii asupra utilajului în cauză, iar în aceste condiții, o soluție rațională poate fi obținută numai dacă se ține cont în egală măsură de multitudinea acestor factori.

În acest sens, optimizarea în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice este influențată de următorii factori:

1. Caracterul spațial al structurilor și conlucrarea dintre elementele acestora

Acesta derivă din faptul că toate structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice au o configurație spațială, iar considerarea fenomenului de conlucrare tridimensională dintre elementele structurale duce la o dispunere rațională a materialului, obținându-se în final un maxim de eficiență sub aspect economic și din punct de vedere al rigidității obținute. În multe cazuri, calculul spațial al acestor structuri de rezistență prezintă dificultăți deosebite, datorită numărului foarte mare de necunoscute ce intervin în rezolvarea sistemelor de ecuații liniare care exprimă condițiile de continuitate sau echilibru static

2. Configurația generală a structurii metalice și materialul folosit la confecționarea ei

Alegerea tipului de structură de rezistență trebuie corelat cu cerințele procesului de producție, în care este implicat utilajul metalurgic din care face parte structura respectivă, care determină gradul de complexitate necesar în exploatarea acestuia. În acest sens, în alcătuirea structurii metalice se vor utiliza materiale corespunzătoare, elemente tipizate și standardizate, în soluții constructive eficiente, care împreună asigură structurii de rezistență o configurație generală care satisface condițiile de proporție impuse. În ceea ce privește materialul structurii, acesta are o importanță deosebită în optimizarea structurilor de rezistență, concretizat în exploatarea caracteristicilor reale ale structurii de rezistență.

3. Încărcările care solicită structura și combinațiile acestora

Evaluarea corectă a încărcărilor constituie o problemă esențială, atât ca importanță cât și ca

răspundere, în activitatea de proiectare, execuție și exploatare a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, deoarece o evaluare incorectă a acestora poate conduce la fenomene cu urmări imprevizibile. Prin urmare, stabilirea încărcărilor și a grupărilor acestora trebuie analizată, clasificată și utilizată în calculul structurii de rezistență în funcție de modul de manifestare, distribuția în spațiu, evoluția în timp și specificul condițiilor de lucru ale utilajului metalurgic din care face parte structura de rezistență.

4. Tehnologia de fabricație a structurii de rezistență

Alegerea celei mai eficiente soluții de execuție a structurii metalice presupune:

- adaptarea soluțiilor constructive la posibilitățile de fabricație a întreprinderii producătoare, prin stabilirea rațională a tipodimensiunilor elementelor structurii, în scopul reducerii pierderilor materiale la uzinare și pentru efectuarea unei aprovizionări mai eficiente cu materiale;

- reducerea duratei de montaj prin micșorarea duratei de execuție a elementelor structurii, organizarea procesului de producție, pentru o utilizare eficientă a utilajelor care participă la realizarea structurii și a forței de muncă;

5. Întreținerea și exploatarea structurii metalice

Asigurarea unei întrețineri corespunzătoare și a unei durate de exploatare corespunzătoare, evitarea uzării fizice, care se manifestă prin epuizarea capacității portante, oboseală, coroziune, respectiv evitarea uzării morale, care se manifestă prin incapacitatea structurii metalice de a putea fi adaptată la modificările condițiilor de exploatare, conduc la conservarea și prelungirea duratei de viață a utilajului metalurgic, în deplină siguranță.

După cum se observă, **îmbunătățirea și modernizarea permanentă a concepțiilor de proiectare și execuție ale structurii de rezistență are implicații directe asupra procesului de exploatare a acesteia**. Aceasta se explică prin faptul că, orice îmbunătățire a proiectării și execuției afectează următoarele caracteristici ale structurii de rezistență: configurația, caracteristicile materialului, natura și valorile încărcărilor, metodele de calcul pentru tensiuni și deformații, metodele de dimensionare, costul materialelor și al execuției, ele fiind cele care definesc comportarea structurii în exploatare.

La ora actuală, calculul structurilor de rezistență, efectuat ca un proces iterativ, este supus continuu unor îmbunătățiri bazate pe permanente studii de optimizare îndreptate spre obținerea de noi informații privind:

- perfecționarea metodelor de calcul;
- asimilarea de materiale noi, cu caracteristici superioare;
- stabilirea de soluții constructive îmbunătățite pentru elementele structurii de rezistență și pentru aceasta în ansamblul ei;
- omologarea unor noi tipuri de elemente și structuri de rezistență.

2.3. CONCLUZII ASUPRA POSIBILITĂȚILOR ACTUALE DE OPTIMIZARE A STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

2.3.1 Oportunitatea optimizării în faza de proiectare

Indiferent de modul de organizare a activităților de proiectare și execuție, obiectivul în realizarea unor structuri de rezistență cu performanțe tehnico-economice ridicate este același și vizează obținerea unor structuri metalice cu greutate redusă, economie de material, adaptarea la posibilitățile de execuție, transport și montaj disponibile și nu în ultimul rând, asigurarea condițiilor și a duratei de exploatare impuse. În acest sens, creșterea eficienței tehnico-economice, [51] este asigurată, în general, de tipizare și standardizare. Dar, cu toate acestea, obiectivele anterior enunțate și care sunt urmărite prioritar la proiectarea unei structuri metalice, nu pot fi întotdeauna optimizate concomitent printr-o soluție constructivă tipizată. Deoarece, la ora actuală, nu există o tehnică de optimizare care să rezolve aceste probleme în ansamblu, se recurge la elaborarea unor metodologii de proiectare optimală.

Obiectivul proiectării optime a structurilor de rezistență se referă la specificarea variabilelor de proiectare astfel încât acestea să satisfacă condițiile restrictive impuse și să minimizeze funcția obiectiv pe baza căreia se realizează optimizarea. De cele mai multe ori, funcția obiectiv exprimă fie volumul, fie greutatea, fie cantitatea de material încorporată în structura de rezistență respectiv prețul de cost al acesteia, care este considerat legat funcțional de aceste mărimi. Din punct de vedere teoretic, [94], proiectarea optimă se face numai pe bază de unicate. În acest sens, dimensiunile minime ale unui singur element structural trebuie să satisfacă restricțiile referitoare la tensiuni, deplasări, deformații etc. Pe de altă parte, producția industrială de elemente specifice structurilor de rezistență urmează o altă cale, care are la bază standardizarea. Astfel, o proiectare este considerată optimă atunci când toate elementele se grupează în câteva clase, în care aceste elemente sunt identice.

În practică, însă, așa cum se arată în [94], se acceptă o situație intermediară și anume: standardizarea este privită ca rezultatul adoptării unei funcții obiectiv (de minimizat), iar costul ei depinde nu numai de cantitatea de material folosită la confecționarea structurii de rezistență, ci și de numărul de elemente identice folosite în proiectarea optimală. În acest sens, pentru determinarea dimensiunilor minime ale unui element din structura de rezistență analizată se folosesc metodele tradiționale ale mecanicii structurilor, în timp ce pentru determinarea combinațiilor minime ale acestora se folosesc metodele cercetării operaționale.

Necesitatea abordării acestui mod de proiectare a structurilor de rezistență derivă și din faptul că metodele de calcul ale acestor structuri s-au dezvoltat mai rapid decât cele de optimizare, deoarece cele din urmă, necesită cunoașterea unor relații între configurația structurii, dimensiunile elementelor ce o alcătuiesc și proprietățile fizico-mecanice ale materialului din care sunt confecționate, relații care la rândul lor, au la bază o serie de ipoteze privind adoptarea valorilor coeficienților de siguranță precum și ipoteze legate de funcționalitatea structurii, [90].

În concluzie, **dacă aceste metode de calcul sunt abordate sub aspectul conceptului de optimizare, activitatea de proiectare a structurilor de rezistență capătă forma unei proiectări optime.**

Factorul fundamental atât în proiectarea curentă, cât și în cea optimală este reprezentat de relația care există între tensiunile care apar în structura de rezistență și configurația acesteia, această dependență fiind folosită în două moduri și anume [90]:

- determinarea configurației structurii, cunoscându-se valorile tensiunilor;
- determinarea valorilor tensiunilor, cunoscându-se configurația structurii de rezistență.

În primul caz, dacă valorile tensiunilor satisfac criteriul de rezistență admis, structura de rezistență obținută este sigură, dar motivele pentru care se acceptă o anumită formă nu sunt justificate și în aceste condiții metoda verificării rezistenței constituie un element de nesiguranță și eroare. Spre deosebire de acest caz, în cel de-al doilea, configurația structurii de rezistență fiind intuitivă, rămâne de verificat doar rezistența ei. Astfel se poate afirma că, alegerea configurației structurii de rezistență depinde de condițiile care trebuie satisfăcute de structura de rezistență, fiecare dintre ele având o influență decisivă asupra rezultatului alegerii.

În afară de condiția principală de optimizare (de exemplu: greutate minimă, rigiditate maximă, egală rezistență), în cazul structurilor de rezistență se pot impune și alte condiții secundare care pot face obiectul unei probleme de optimizare, cum ar fi: sarcina critică maximă la pierderea stabilității, frecvența maximă a vibrațiilor libere sau cele dictate de tehnologia de execuție și montaj, funcționalitatea structurii sau alte condiții de ordin estetic. În aceste condiții, unul dintre principalele obiective ale proiectării optime îl constituie măsura în care structura de rezistență analizată satisface condițiile impuse de procesul tehnologic, atât în perioada pentru care structura este proiectată, cât și pentru o perioadă ulterioară în care trebuie avută în vedere schimbarea rapidă a procesului tehnologic.

Primele încercări de proiectare optimală, [90], au fost realizate pe modele la scară redusă sau naturală de către Leonardo da Vinci, Michelangelo, Galilei, Euler și mai târziu de Z. Wasintynski și A. Brandt [112].

La ora actuală, activitatea de proiectare optimală se dezvoltă prin aplicarea metodelor numerice de calcul și pe cale analitică, însă **problemele de optimizare a structurilor complexe, folosesc de cele mai multe ori tehnici iterative de calcul. Acestea sunt cele care duc la un proces de proiectare iterativă a acestor structuri.**

În cadrul acestui proces se adoptă un anumit tip de structură de rezistență pentru care se admit anumite valori ale parametrilor ce definesc configurația acesteia și anumite dimensiuni ale elementelor componente, efectuându-se apoi analiza structurii pentru încărcările date. Analizând structura se obțin o serie de rezultate asupra cărora se pot efectua unele modificări în vederea îmbunătățirii soluției finale, putându-se astfel corecta diverși parametri sau dimensiuni ale structurii, după care se efectuează o nouă analiză. Procedul va continua până când rezultatele obținute duc la obținerea soluției optime. În condițiile unui calcul manual, numărul unor asemenea iterări este redus și procedul se oprește atunci când se consideră, pe baza experienței, că s-a ajuns la o soluție

judicioasă.

O asemenea apreciere este influențată, în cele mai multe cazuri, și de factori subiectivi, datorită cărora există posibilitatea ca, în condițiile prescrise, soluția adoptată să nu fie cea mai bună. În trecut, problema nu putea fi pusă în acest mod, deoarece căutarea unei soluții optime nu era realizabilă în timp util cu mijloacele de calcul disponibile la momentul respectiv. Odată cu răspândirea mijloacelor de automatizare a calculelor, situația s-a schimbat, aducând și în această direcție o altă orientare. Astfel, a devenit posibilă efectuarea, în mod eficient, de calcule repetate, variind anumiți parametri ori a unei optimizări prin metodele programării matematice. În acest sens, de remarcat este faptul că s-a trecut la efectuarea prin calcul a optimizării încă din faza de proiectare a structuri de rezistență.

Pentru exemplificare, se prezintă problema optimizării structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, alcătuite din bare, iar unele dintre ele obținute prin asamblarea altor elemente, ca în cazul grinzilor cu inimă plină de tip cheson. Secțiunea transversală a unor astfel de elemente este definită prin mai mulți parametri independenți: înălțimea inimii, lățimea tălpilor, grosimea tălpilor și a inimii. În aceste condiții, numărul parametrilor ce intervin în optimizarea structurii este ridicat și se impune folosirea unor metode de optimizare, [57] care duc la un calcul excesiv. O cale de simplificare constă în reducerea dimensiunilor problemei prin micșorarea numărului parametrilor independenți. Aceasta se poate realiza prin proiectarea prealabilă a unor subprobleme, reprezentate de optimizarea diferitelor bare ce compun structura dată, folosind pentru fiecare dintre acestea același criteriu de optimizare (de exemplu greutatea minimă).

Considerând o asemenea bară, supusă unei anumite solicitări, ea poate fi caracterizată prin anumiți parametri proprii, reprezentați de dimensiunile ce definesc un anumit tip de secțiune transversală. Condiția de optimizare impusă elementului corelează parametrii și permite reținerea din multitudinea acestora doar a unuia, considerat drept parametru independent. Astfel, pentru o anumită valoare a acestuia, se pot determina valorile celorlalți.

În literatura de specialitate, [103], s-a studiat în acest sens, optimizarea unor categorii de elemente uzuale (de exemplu elemente supuse la solicitare axială, încovoiere etc.) obținându-se atât formule cât și grafice care sintetizează corelarea acestor parametri. Rezultatul studiului este că acești parametri sunt exprimați prin relații neliniare, în funcție de mărimile solicitărilor ce acționează asupra elementului considerat izolat, solicitări care depind însă de comportarea structurii de rezistență în ansamblu. Acest mod de abordare a problemei presupune însă o rezolvare a ei pe cale iterativă.

2.3.2 Concluzii asupra stadiului actual al optimizării

Optimizarea este considerată, [12], o activitate „*de triere sistematică a soluțiilor posibile a unei probleme*”, având ca scop final selectarea acelei soluții care, în prezența unor restricții impuse, conduce la folosirea cea mai avantajoasă a resurselor de care dispunem pentru materializarea ei în practică.

În prezent, **optimizarea oricărui tip de structură poate fi efectuată prin optimizarea separată a elementelor ei componente, a subansamblelor acesteia sau a părților constitutive**

distincte. În cazul utilajelor metalurgice, procesul optimizării vizează motoarele, mecanismele de acționare, elementele anexe (podeste, scări, platforme), căile de rulare și nu în ultimul rând structura de rezistență a utilajului respectiv. În ceea ce privește structurile de rezistență, optimul spre care tind toate activitățile legate de conceperea, proiectarea și executarea acestora, vizează realizarea unor structuri de rezistență care, pentru un anumit grad de siguranță, asigură îndeplinirea tuturor cerințelor impuse de o exploatare normală, la prețuri de cost minime și cu consumuri de materiale cât mai scăzute.

Din studiul materialului bibliografic, [4], [107] se remarcă faptul că procesul optimizării își are originea cu mult timp în urmă și a cunoscut o dezvoltare continuă, odată cu apariția teoriei optimizării. Față de trecut, când optimizarea se realiza pe baza unor criterii empirice, în afara unor reguli științifice stabilite, la ora actuală, procesul optimizării a dobândit un caracter explicit, datorită dezvoltării teoriilor de optimizare a sistemelor și proceselor, teorii la baza cărora stau criteriile tehnico-economice de optimizare. Interdependența dintre cele două tipuri de criterii duce la obținerea unor soluții raționale pentru structurile de rezistență, datorită faptului că îmbină în egală măsură multitudinea factorilor ce o condiționează. Spre exemplu, s-a constatat că prețul de cost al elementelor unei structuri este proporțional cu greutatea proprie a acestora, ceea ce, în cazul structurilor de rezistență alcătuite din bare solicitate predominant la încovoiere (cum sunt structurile metalice ale utilajelor metalurgice) duce la minimizarea greutății lor. În aceste condiții, în paragraful 2.2.1 s-a arătat că optimizarea structurilor metalice poate fi realizată fie în domeniul elastic, fie în domeniul plastic de comportare al materialului sub încărcări, funcție de criteriul de cedare pe care se bazează proiectarea lor. De asemenea, este cunoscut faptul că **optimizarea în domeniul elastic duce la rezolvarea unor probleme de programare neliniară, iar optimizarea în domeniul plastic poate fi formulată, în cazul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, ca o problemă de programare liniară.**

Creșterea complexității lucrărilor, necesitatea de a proiecta utilaje mai sigure și fiabile, creșterea exactității calculului în vederea reducerii consumului de metal au contribuit la utilizarea, pe scară largă, a calculatorului electronic în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice.

Formularea problemei optimizării structurii se face în funcție numai de parametrii reținuți pentru caracterizarea barelor, la care se adaugă, eventual, atât parametrii ce caracterizează configurația geometrică de ansamblu a structurii, cât și cei ce definesc starea de tensiuni produsă de sarcinile date.

Date fiind acestea, la structurile static determinate cu configurația dată, starea de tensiune ce caracterizează structura respectivă în exploatare este independentă de distribuția materialului, astfel că **soluția optimă pentru structura metalică în ansamblu rezultă din suma soluțiilor optime ale barelor, separat studiate.** Această situație se poate schimba, dacă configurația structurii se modifică, datorită faptului că distribuția tensiunilor se modifică în funcție de parametrii respectivi.

În cazul structurilor static nedeterminate, cum este cazul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, apar în procesul optimizării o serie de parametrii suplimentari, care sunt obligați să satisfacă ecuația ce exprimă condiția de compatibilitate, aceștia adăugând un număr de

condiții restrictive exprimate sub forma unor egalități [57].

Acest mod de abordare al metodei optimizării poate fi extins, înlocuind separarea structurii în elemente prin separarea acesteia în substructuri. În aceste condiții, optimizarea se tratează la nivelul acestor substructuri, ceea ce reduce considerabil numărul parametrilor independenți.

Calculul structurilor static nedeterminate sub aspectul conceptului de optimizare constituie obiectul unei vaste literaturi științifice din studiul căreia rezultă orientarea spre o mare varietate de procedee de calcul particulare, specifice diferitelor probleme tratate sau unor anumite tipuri de structuri. Stabilirea acestor metode derivă de obicei din particularitățile categoriilor de structuri de rezistență studiate, lipsind în general o concepție teoretică unitară [57]. În acest sens, se utilizează uneori *elemente teoretice disparate*, iar alteori *elemente intuitive* ceea ce explică numărul foarte mare de procedee și variante de calcul propuse pentru rezolvarea pe cale iterativă a structurilor static nedeterminate. O asemenea orientare a fost favorizată și de modul de aplicare al metodelor de calcul a structurilor în condițiile efectuării manuale a calculelor numerice. O schimbare radicală de orientare în considerarea metodelor de calcul a structurilor de rezistență static nedeterminate, cum este cazul celor specifice utilajelor metalurgice, s-a produs odată cu extinderea mijloacelor automate de calcul. Astfel, **metodele de calcul ce au la bază particularizările adaptabile cazurilor individuale sunt înlocuite cu procedee de calcul concepute pentru utilizarea cu caracter general.**

Eliminarea limitărilor privitoare la volumul calculelor numerice, permite ca formularea generală a metodelor de calcul a structurilor să nu-și limiteze utilizarea doar la domeniul staticii liniare a structurilor alcătuite din bare, ci să-și extindă aplicabilitatea și în domeniul calculului structurilor alcătuite din elemente uni-, bi- sau tridimensionale, supuse la solicitări statice sau dinamice în domeniul elastic sau elasto-plastic, prin abordarea calculului de ordinul I sau II.

În aceste condiții, efectuarea în mod adecvat a calculului, specific structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, cu ajutorul calculatoarelor electronice aduce următoarele avantaje:

- posibilitatea efectuării unui calcul spațial, cu o exactitate sporită;
- posibilitatea efectuării calculelor în numeroase variante de soluții constructive dintre care se poate apoi alege soluția optimă;
- operativitate sporită în execuția calculelor, care duce la dinamizarea procesului de proiectare;
- posibilitatea operării cu un număr mare de variabile de proiectare și restricții;
- rezolvarea mai multor tipuri de probleme folosind aceeași metodă de optimizare prin utilizarea programelor de calcul automat.

2.4 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Analiza posibilităților privind calculul și optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice a fost realizată pe baza studiului bibliografic referitor la următoarele probleme:

- prezentarea modalităților de modelare fizică și matematică în vederea calculului structurilor de rezistență a utilajelor metalurgice;

- prezentarea unor modalități de alegere a modelelor de calcul și a etapelor de rezolvare a acestora în analiza cu elemente finite;
- prezentarea celor mai evaluate tipuri de elemente finite existente la ora actuală în biblioteca cu elemente finite a programelor automate de calcul și a principalelor ecuații care descriu starea de tensiune și deformare specifică mecanicii structurilor;
- definirea conceptului de optimizare al structurilor de rezistență;
- prezentarea etapelor, a criteriilor și a metodelor de optimizare;
- oportunitatea optimizării în faza de proiectare.

Drept contribuții personale se menționează:

- întocmirea și sistematizarea sintezei documentare cuprinzând aspectele menționate;
- evaluarea fazelor și analiza factorilor care influențează optimizarea unei structuri de rezistență;
- finalizarea analizei privind posibilitățile de calcul și optimizare, prin stabilirea programului de calcul adoptat în studiul unui utilaj metalurgic.

CAPITOLUL 3

STUDII TEORETICE PRIVIND COMPORTAREA SUB ÎNCĂRCĂRI A STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

3.1 CONSIDERAȚII GENERALE. DOMENIUL ABORDAT

În general, optimizarea unei structuri de rezistență a unui utilaj metalurgic se poate efectua, conform celor prezentate în cap.2, paragraful 2.3.1, atât în faza de proiectare, cât și ulterior, după o perioadă de exploatare a utilajului; ambele situații menționate necesitând însă, efectuarea unei modelări geometrice și fizice cât mai fidele a structurii studiate, fapt ce implică analiza critică a factorilor care influențează modul de comportare sub încărcări a structurii respective.

Optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice impune analiza factorilor care derivă din rolul funcțional, caracteristic proceselor tehnologice la care participă, și care în faza de proiectare condiționează soluționarea alcătuirii structurale, iar în perioada de exploatare, constituie un factor generator de acțiuni specifice care, prin efectul lor, evidențiat în cap.1, paragraful 1.3, influențează modul de comportare sub încărcări al structurii de rezistență.

În industria siderurgică și metalurgică, cum sunt procesele desfășurate în oțelării, laminoare, turnătorii, se desfășoară procese tehnologice ale căror caracteristici determină încadrarea utilajelor care participă la realizarea acestora, în categoria utilajelor cu regim greu și foarte greu de funcționare. Tehnologia după care se desfășoară un proces de producție determină fluxul tehnologic, ale cărui caracteristici impun folosirea anumitor utilaje metalurgice și mașini de ridicat și transportat.

Cele mai utilizate utilaje metalurgice folosite în acest domeniu de activitate sunt *podurile rulante*. Acestea sunt frecvent folosite în aceste domenii de activitate datorită avantajelor pe care le prezintă folosirea lor, cum ar fi:

- pot fi adaptate la orice fel de proces tehnologic;
- pot ridica și transporta o gamă variată de sarcini;
- nu ocupă spațiu la sol;
- au o rază mare de acțiune permițând deplasarea sarcinilor prin translații reciproc perpendiculare.

Ca principiu de alcătuire ele diferă de la o industrie la alta, dar și în cadrul aceleiași industrii de la un sector la altul, în funcție de caracteristicile procesului tehnologic la care participă. Astfel, alegerea configurației generale a unui pod rulant (geometria și tipul structurii) trebuie corelată cu cerințele procesului tehnologic în care este implicat utilajul și condițiile de exploatare ale acestuia.

Ținând seama de considerentele anterior prezentate, principalii factori care influențează modul de comportare sub încărcări a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice și

implicit optimizarea acestora sunt:

- tipul structurii de rezistență;
- capacitatea de ridicare;
- regimul de lucru;
- condițiile de exploatare.

În studiile teoretice ce se vor efectua în cadrul acestui capitol, în scopul calculului spațial al unei structurii de rezistență aparținând unui utilaj metalurgic, în vederea optimizării dimensionale, se vor face referiri concrete asupra unui pod rulant metalurgic, cu capacitatea de ridicare de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m care, datorită condițiilor de exploatare este supus unui *regim greu de lucru*. Datorită tendinței actuale, orientată spre cuprinderea cât mai completă a tuturor factorilor ce intervin în comportarea structurilor de rezistență a podurilor rulante aflate în exploatare; studiile teoretice privind calculul și optimizarea acestora vor fi abordate în condițiile extinderii folosirii programelor de calcul automat, pe baza metodei elementelor finite.

Analiza teoretică efectuată asupra podului rulant luat în studiu va aborda următoarele probleme:

- a) Alcătuirea structurală a podului rulant sub aspectul geometriei structurii și a elementelor acesteia, a secțiunilor transversale și a legăturilor dintre elementele componente.
- b) Analiza schemelor statice de încărcare a structurii de rezistență.
- c) Prezentarea programului de studii și cercetări privind modelarea structurii de rezistență a podului rulant în scopul efectuării calculului spațial al acesteia.
- d) Modelarea structurii de rezistență a podului rulant
- e) Analiza stării de tensiune și deformație în elementele structurii metalice a podului rulant.

Rezultatele studiilor teoretice efectuate vor permite evaluarea modului de comportare sub încărcări, sub aspectul posibilităților de optimizare, a structurii de rezistență a podului rulant.

3.2. STUDII TEORETICE ASUPRA STĂRII DE TENSIUNE DIN ELEMENTELE STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PODULUI RULANT DE 100KN - 17,3m PE BAZA ANALIZEI CU ELEMENTE FINITE

3.2.1 Programul de studii și cercetări. Probleme abordate

Evaluarea modului de comportare în exploatare a structurilor de rezistență ale podurilor rulante sub acțiunea încărcărilor, precum și optimizarea acestora, așa cum s-a arătat în cap.2, se poate realiza atât în faza de proiectare, cât și după o anumită perioadă de exploatare a utilajului. În acest sens, un rol deosebit îl are cunoașterea stării de tensiune și deformație din structura de rezistență a acestuia, ceea ce implică necesitatea unei modelări fizice cât mai apropiate de structura reală aflată în exploatare.

Programul de studii și cercetările efectuate în acest sens, au avut ca obiectiv obținerea datelor necesare modelării structurii de rezistență a podului rulant și efectuarea calculelor, în vederea analizei stării de tensiune și deformație din elementele acesteia, cu scopul efectuării unei optimizări dimensionale. Conform acestor cerințe, programul de studii și cercetări a urmărit:

1. Analiza privind alcătuirea structurală și legăturile dintre elementele componente ale structurii de rezistență .
2. Stabilirea caracteristicilor dimensionale necesare estimării geometriei structurii de rezistență a podului rulant.
3. Specificarea încărcărilor și a combinațiilor acestora provenite din exploatarea utilajului.
4. Modelarea cu elemente finite a structurii de rezistență a podului rulant în vederea calculului spațial.
5. Calculul spațial și de conlucrare dintre elemente, efectuat cu un program automat de calcul ce are la bază metoda elementelor finite.
6. Analiza calculelor efectuate și a rezultatelor obținute.

3.2.2 Alcătuire structurală. Analiza geometriei elementelor componente și a ansamblului structurii de rezistență

Așa cum s-a arătat în paragraful 3.1, soluționarea alcătuirii structurilor de rezistență și comportarea acestora în exploatare, sub încărcări, sunt condiționate de rolul lor funcțional, de satisfacerea cerințelor procesului tehnologic la care participă utilajul căruia îi aparține. Astfel, un rol important revine regimului de lucru, condițiilor de exploatare și capacității de ridicare.

Podul rulant analizat are capacitatea de ridicare de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m fiind alcătuit din următoarele elemente componente, fig.3.1:

- 1 - construcția metalică;
- 2 - căruciorul;
- 3 - mecanismul de translație;
- 4 - instalația electrică și elementele anexe.

Toate subansamblele acestui utilaj sunt montate pe construcția metalică, mecanismele sunt acționate electric dintr-o cabină de comandă fixată tot pe structura de rezistență, iar pentru ridicarea sarcinilor, podul rulant este dotat cu un sistem de prindere cu cârlig .

Așa cum se arată în literatura de specialitate, [1], în construcția podurilor rulante, cea mai mare parte din ansamblul acestor utilaje o constituie structura de rezistență, greutatea ei reprezentând aproximativ 60-80% din greutatea întregului utilaj [102]. Putem spune deci că, unul dintre subansamblele de o importanță deosebită în alcătuirea podurilor rulante este structura lor de rezistență, deoarece aceasta trebuie să confere utilajului, pe de o parte stabilitate, rigiditate la transport și montaj, respectiv întreținere ușoară în exploatare, iar pe de altă parte, elementele ei componente trebuie să se adapteze naturii și variațiilor tensiunilor care apar datorită încărcărilor care solicită utilajul. Forma și dimensiunile structurii de rezistență a podului rulant analizat, în plan și în secțiune transversală sunt exemplificate în continuare în cadrul acestui paragraf.

În general, structurile de rezistență ale podurilor rulante pot fi alcătuite, așa cum am arătat în cap.1, paragrafele 1.1.1 și 1.1.2 din grinzi cu inimă plină și din grinzi cu zăbrele. Acestea sunt elemente de construcție sollicitate la încovoiere, răsucire, respectiv întindere și compresiune, iar pentru realizarea lor rațională și economică este necesar ca secțiunea acestora să aibă o anumită

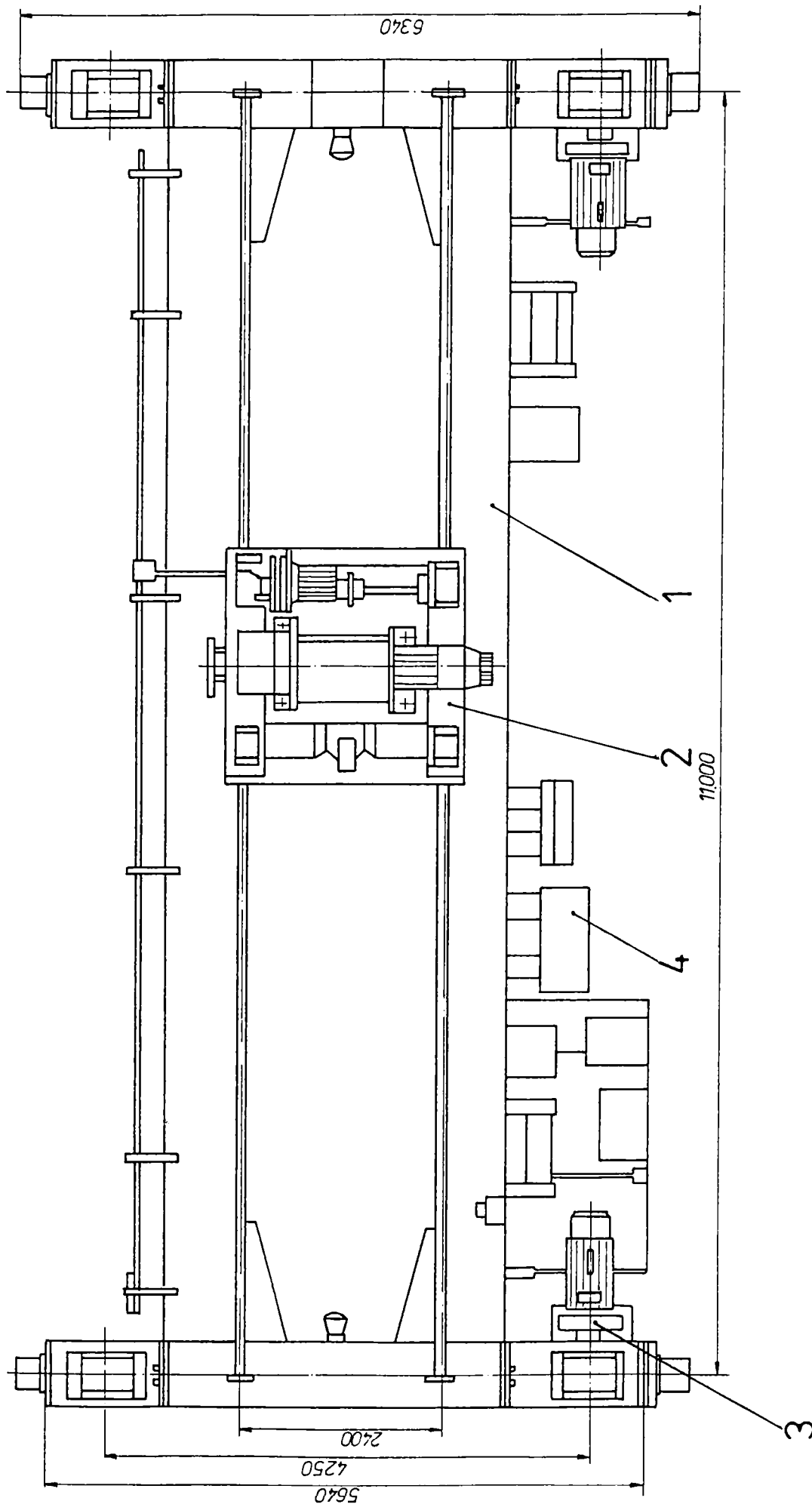


Fig. 3.1 Schema constructivă a podului rulant cu capacitatea de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m

configurație, iar între dimensiuni să existe anumite proporții, [54]. Din acest punct de vedere, în ceea ce privește forma secțiunilor este recomandabil ca grinzile ce alcătuiesc structura de rezistență a podurilor rulante să fie realizate din grinzi cu inimă plină, de tip cheson, deoarece acestea au o capacitate mai mare de a prelua momentul încovoietor și de răsucire, [49], [54].

În cazul podului analizat, structura de rezistență este alcătuită din grinzi de tip cheson, atât pentru cele două grinzi longitudinale (lonjeroane), cât și pentru cele două grinzi transversale (traverse). Acestea alcătuiesc un contur plan, închis, de formă dreptunghiulară care schematizat arată ca în fig.3.2. Principalele dimensiuni caracteristice ale acesteia sunt: *ecartamentul 11 000 mm* și *ampatamentul 4250 mm*, (pentru a servi în explicațiile ulterioare, lonjeroanele și traversele au fost numerotate în această figură cu I și II).

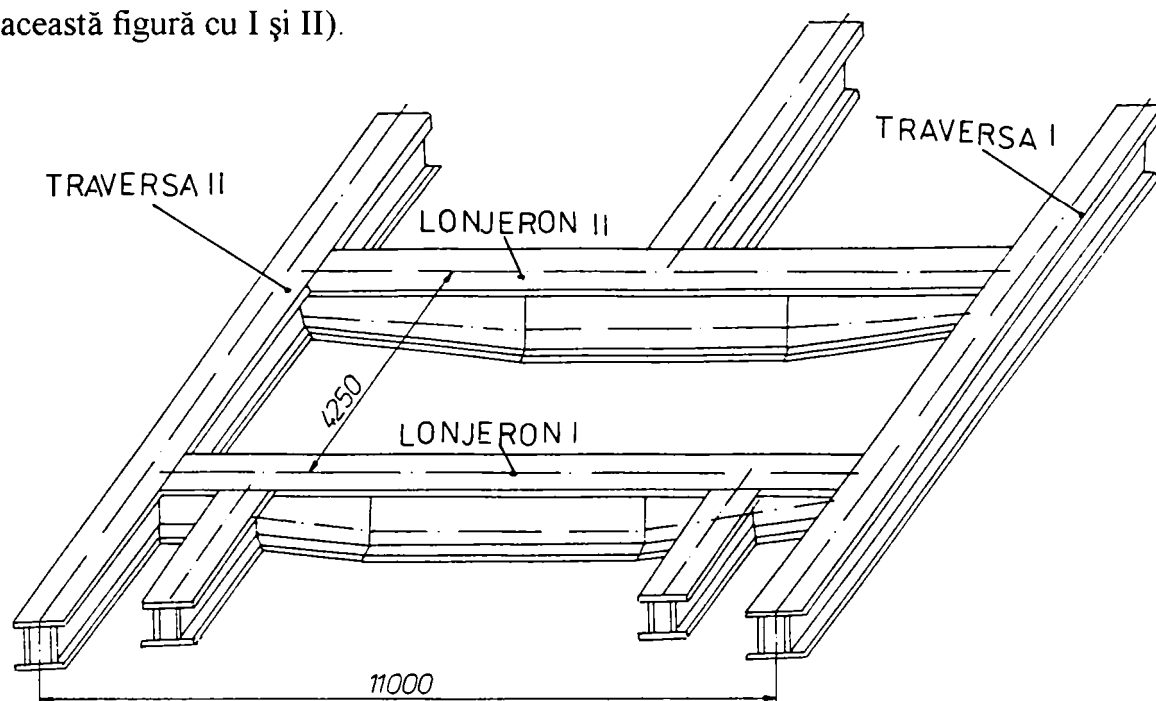


Fig.3.2 Schema structurii de rezistență a podului rulant cu capacitatea de 100KN și înălțimea de ridicare 17,3 m

În general, elementele din care sunt alcătuite structurile de rezistență ale podurilor rulante sunt supuse în timpul exploatării la încovoiere și, ca urmare, [87], au ca factor caracteristic al alcătuirii secțiunii lor, dezvoltarea acesteia în planul de acțiune al momentului încovoietor. Astfel, materialul din care sunt alcătuite trebuie distribuit cât mai departe de axa neutră a fiecărui element, această distribuție corespunde celei mai favorabile preluări a încărcărilor din exploatare. Teoretic, pentru ca aceste grinzi să rezulte economice din punct de vedere al materialului utilizat este necesar ca secțiunea lor să varieze continuu, urmărind diagrama de momente încovoietoare. Practic însă, acest lucru nu este posibil, și ca urmare a acestui fapt, la grinzile mai puternic solicitate și de lungime mare, cum este cazul grinzilor principale ale podului rulant, acestea s-au executat cu secțiune variabilă pe înălțimea inimii grinzii, fig. 3.3, asigurându-se în acest fel preluarea sarcinilor maxime cu un coeficient ridicat de siguranță pentru o anumită porțiune din ecartamentul podului. La extremitățile grinzilor principale, dimensiunile se reduc pe înălțime, astfel încât aceasta se apropie de comportamentul specific „barei de egală rezistență”, cu toate că și pentru această zonă, coeficientul de siguranță al grinzii este excesiv de mare. În acest mod s-a obținut o repartizare rațională a materialului structurii, atât în secțiunea transversală, cât și pe lungimea elementelor acesteia, deși

din analiza constructivă a podului rulant studiat rezultă că structura metalică, constituie aproximativ 75 % din greutatea totală a podului, ceea ce reprezintă un procent foarte mare.

În cazul grinziilor mai puțin solicitate și de lungime mai mică, cum sunt traversele, acestea s-au executat cu secțiune constantă pe înălțimea inimii grinzi, fig.3.4.

Secțiunile transversale ale lonjeroanelor sunt de tip cheson, alcătuite din două inimi laterale și două tălpi, superioară și inferioară, formând astfel un element de rezistență cu rigiditate mare la încovoiere și răsucire, care asigură o conlucrare unitară între tablele componente, fig. 3.5. Tabla din care sunt confecționate tălpile are grosimea de 8 mm, iar inimile chesoanelor sunt alcătuite din tablă cu grosimea de 6 mm. Legătura dintre inimi și tălpi se realizează prin cordoane de sudură de colț, continui pe lungimea grinzi, datorită faptului că, aceste grinzi sunt supuse în exploatare la solicitări repetate, care generează apariția fenomenului de oboseală, iar o sudură discontinuă ar duce la concentrarea de tensiuni care micșorează rezistența la oboseală.

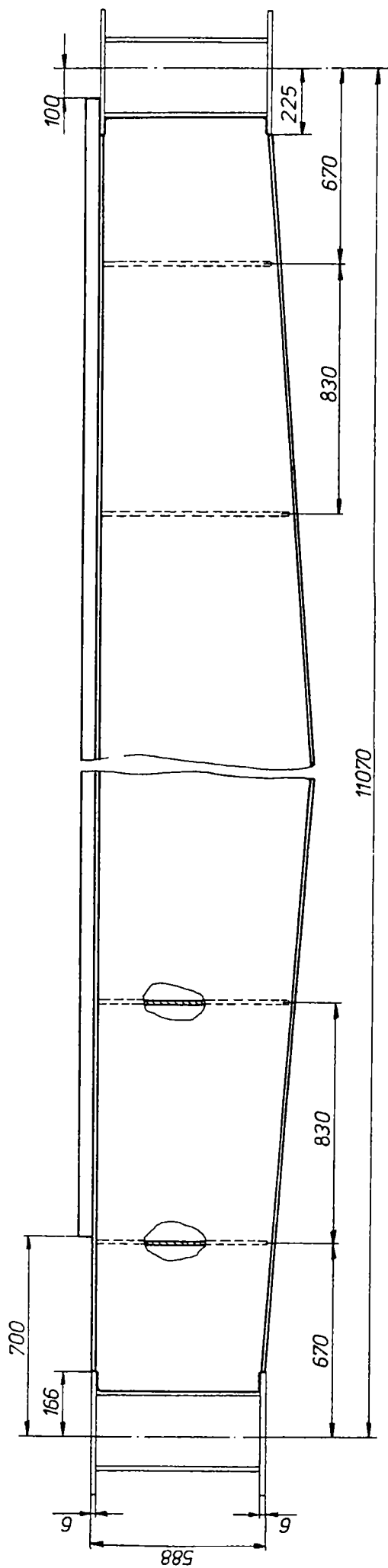
După [87], la acest tip de grinzi, forța tăietoare este maximă în dreptul reazemelor și este preluată în întregime de inima chesonului, iar în lungul grinziilor, hotărâtor pentru dimensionare este momentul încovoietor, care poate avea valoare maximă pentru situația cea mai defavorabilă de încărcare. Astfel, inima chesonului participă într-o măsură mai mică, la preluarea solicitărilor de încovoiere, decât tălpile grinzi, și datorită acestui fapt raportul dintre înălțime și grosime este mare. Sub acțiunea încărcărilor în lonjeroane apar tensiuni de întindere și compresiune. Aceste solicitări sunt preluate de inima și tălpile chesonului. În cazul solicitărilor de compresiune, există pericolul ca inima chesonului să fie supusă fenomenului de voalare. Așa cum se arată în [5], fenomenul de voalare mai poate fi provocat și de tensiunile tangențiale. Deoarece în practică, nu se admit structuri metalice în stadiul de voalare, în cazul lonjeroanelor structurii de rezistență a podului rulant analizat s-au introdus nervuri de rigidizare pentru evitarea acestui fenomen, fig.3.5.

În general, nervurile de rigidizare se amplasează în acea parte a peretelui grinzi care se comprimă, ele fiind executate din profile laminate amplasate în interiorul grinzi principale. În acest sens, grinziile principale din construcția metalică a podului rulant analizat sunt prevăzute pe interior cu nervuri de rigidizare longitudinale și transversale, aceasta ducând la o creștere a greutateii construcției metalice.

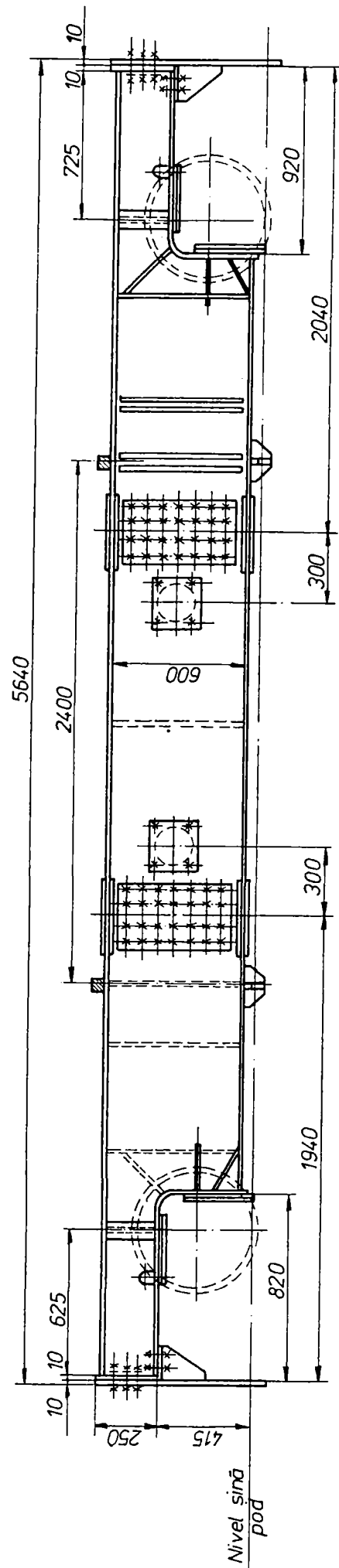
Nervurile de rigidizare transversale sunt eficiente în zonele în care tensiunile tangențiale au valori considerabile ele fiind realizate sub forma unor diafragme care nu se sudează de talpa întinsă și având rolul de a prelua încărcările transmise prin roți, grinzi și de a le repartiza uniform pe suprafața acestora. Astfel, rigidizările transversale asigură:

- transmiterea la inima chesonului a încărcărilor concentrate care acționează asupra tălpii grinzi;
- legarea celor două tălpi și creșterea rigidității la răsucire a grinzi principale;
- crearea unor reazeme suplimentare pentru inimă, precum și mărirea rezistenței critice la voalare.

Prinderea nervurilor de rigidizare transversale de talpa comprimată a grinzi se face direct, prin intermediul unor cusături de colț, dispuse pe ambele fețe și pe toată lungimea de contact, iar prinderea acestor nervuri de talpa întinsă se face cu ajutorul unor nervuri longitudinale, această metodă fiind cea mai simplă din punct de vedere al procedurii de execuție.



**Fig.3.3 Schema constructivă a unei grinzi principale (lonjeron) din structura de rezistență a podului rulant
cu capacitatea de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m**



*Fig. 3.4 Schema constructivă a unei grinzi de capăt (traversă) din structura de rezistență a podului rulant
cu capacitatea de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m*

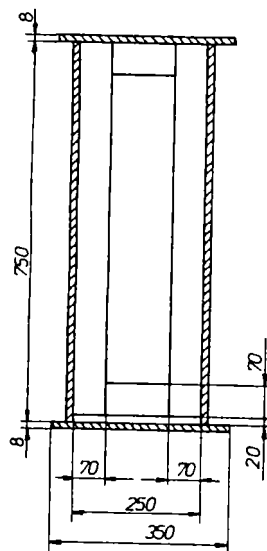


Fig.3.5 Secțiune transversală printr-un lonjeron

În ceea ce privește traversele, acestea sunt identice din punct de vedere constructiv și sunt executate din tablă sudată în construcție cheson, fig.3.6 a. Ele sunt solícitate la încovoiere în plan orizontal și asigură pe această direcție o rigiditate suficient de mare.

Ambele capete ale acestor grinzi sunt prevăzute cu plăci pentru fixarea lagărelor roților de rulare, precum și plăci de protecție împotriva deraierilor podului de pe șine sau a căderii acestuia, în urma uzării exagerate a roților de rulare, fig.3.6 b.

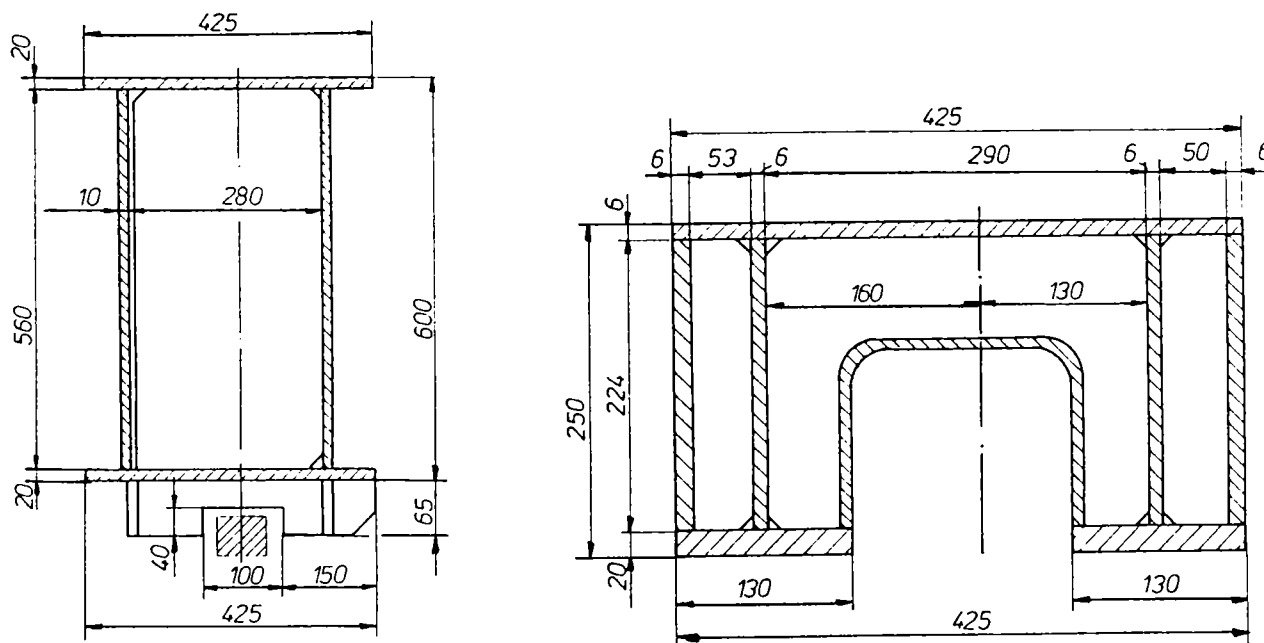


Fig.3.6 Secțiune transversală printr-o grindă de capăt
a - în zona centrală; b - în zona de capăt

Îmbinarea dintre grinzile principale și grinzile de capăt trebuie să fie suficient de rigidă pentru a putea prelua momentele încovoiătoare din capetele grinzilor, rezultate din acțiunea sarcinilor orizontale. Asamblarea grinzilor principale cu cele de capăt constituie un factor important care trebuie să asigure o rigiditate perfectă sistemului construcție metalică - pod rulant, motiv pentru care realizarea acestor îmbinări se face prin sudare, iar în zonele interioare (unghiulare) se introduc plăcuțe cu rol de rigidizare.

Legăturile dintre elementele componente ale structurii de rezistență, au rolul de a menține rigiditatea și stabilitatea ansamblului structural al utilajului și de a asigura condițiile corespunzătoare de transmitere a încărcărilor provenite din exploatare către fiecare element structural.

Aceste legături, necesare calculului structurii precum și verificării elementelor ei componente, se pot clasifica după diferite criterii, conform normei [117]. În funcție de rigiditatea, respectiv rezistența lor, legăturile pot fi:

- a) *Legături de tip articulată*, atunci când nu pot dezvolta momente sau când valorile acestora nu sunt semnificative în cazul exercitării unei influențe defavorabile asupra elementelor structurii.
- b) *Legături rigide*, atunci când deformațiile lor nu influențează semnificativ nici repartizarea solicitărilor în structură și nici deformația structurii în ansamblul ei.
- c) *Legături semirigide*, atunci când rigiditatea lor, variabilă în funcție de intensitatea momentului încovoietor, nu este nici nulă ca și în cazul legăturilor perfect articulate, nici infinită ca în cazul legăturilor de tip încastrare perfectă, ci are o valoare finită, după una din componentele legăturii.

În metodele de analiză elastică, ipotezele de calcul formulate în aceeași normă, [117], prevăd drept categorii de legături, cele de tip articulată, respectiv cele rigide, menționate ca fiind reprezentative pentru structurile alcătuite din bare [49], [54], [125]. De exemplu, după [49], în funcție de modul de realizare al legăturilor, acestea pot fi:

- *legături care transmit numai forțe (reacțiuni)* corespunzătoare unor rezemări simple ce permit rotirea elementelor componente în limitele valorilor rezultate din deformațiile elastice;
- *legături care transmit forțe și momente*, corespunzătoare unei rezemări cu continuitate.

Modelarea structurilor de rezistență a podurilor rulante în vederea analizei stării de tensiune și deformație din elementele acestora, presupune stabilirea schemelor statice de încărcare, ținând seama de tipul și natura legăturilor dintre elementele componente, precum și de modul de preluare al încărcărilor aferente fiecărui element al structurii.

Determinarea schemei statice de încărcare, necesară calculului spațial al structurii de rezistență al unui utilaj metalurgic, este exemplificată în paragraful 3.2.3 pentru un pod rulant pentru turnarea oțelului, cu capacitatea de ridicare de 100 KN, considerând următoarele aspecte:

- structura spațială a podului rulant rezultă din asamblarea a două grinzi principale și două grinzi de capăt, acestea fiind alcătuite la rândul lor din elemente plane dispuse ortogonal între ele, în plan vertical longitudinal (alcătuiind pereții laterali ai grinzilor) și în plan orizontal (alcătuiind tălpile superioară, respectiv inferioară a grinzilor);
- în ansamblul structurii de rezistență a podului rulant, fenomenul conlucrării spațiale se produce datorită existenței legăturilor dintre elementele situate în planele anterior menționate.

Necesitatea cunoașterii stării reale de tensiuni și deformații din elementele structurii de rezistență cu configurație spațială, cum sunt și cele specifice podului rulant analizat, implică considerarea *efectului de conlucrare tridimensională* dintre aceste elemente.

Aceasta a fost adoptată în urma analizei gradelor de libertate ale legăturilor dintre elementele

componente, respectiv a restricțiilor geometrice impuse sub forma unor rotiri sau deplasări, total sau parțial împiedecate, prin existența acestor legături.

Modul de declarare al gradelor de libertate corespunzătoare acestor legături, în sistemul de coordonate general XYZ fixat, s-a făcut conform cerințelor programului automat de calcul COSMOS/M utilizat pentru calculul structurii.

Schemele de încărcare ale structurii metalice a podului rulant rezultă, în general, din evaluarea acțiunilor prezentate în paragraful 1.3.1, cu menționarea repartizării lor specifice, corespunzătoare geometriei spațiale, în nodurile respectiv pe elementele structurii.

Analiza globală a structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m, s-a efectuat pentru pozițiile cele mai defavorabile ale încărcărilor. Încărcările aferente elementelor componente, respectiv cele ale ansamblului structurii de rezistență a podului rulant, au constituit elemente de bază pentru modelarea fizică a construcției metalice, în vederea determinării **modelului de calcul** necesar în studiul teoretic al stării de tensiune și deformație.

3.3. MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PODULUI RULANT DE 100 KN – 17,3 m

Utilizarea modelării în problemele de proiectare și, în particular în optimizarea unei structuri de rezistență necesită, așa cum s-a arătat în paragraful 2.1.1, elaborarea unui model de calcul obținut din modelul fizic al structurii, căruia pentru a-i descrie comportarea, i se atașează un model matematic.

Atât modelul fizic, cât și cel matematic, presupun acceptarea unor ipoteze simplificatoare cu privire la acțiuni, comportarea materialului și alcătuirea structurii care se obțin, în general, în urma unui proces de discretizare fizică și matematică a structurii studiate.

Eficiența unui model de calcul, pentru analiza cu metoda elementelor finite pe care sunt structurate majoritatea programelor de calcul automat cu caracter multifuncțional, cum este de exemplu și programul COSMOS/M, utilizat în prezenta lucrare, depinde de tipul elementelor finite folosite în modelare și de gradul de finețe al discretizării, corelate cu precizia necesară a rezultatelor în cadrul problemei studiate. Eficiența oricărei modelări a comportării unei structuri depinde, [3], de raportul între efortul de analiză depus efectiv și cel necesar pentru rezolvarea problemei modelate. Așa cum rezultă din fig.3.7, acest raport variază în funcție de evoluția prin care trece, în mod obișnuit, un model de calcul.

Acest program este deosebit de eficient în cercetarea științifică și în proiectare, având aplicații multiple și extrem de variate în diverse domenii de activitate, fiind o componentă principală a cercetării și proiectării asistată de calculator.

În sensul celor anterior prezentate, în acest paragraf s-a realizat modelarea structurii de rezistență a unui pod rulant în două variante de discretizare, cu scopul evidențierii influenței pe care o au tipurile de elemente finite și finețea discretizării asupra modelului de calcul. Astfel, modelarea structurii de rezistență a podului rulant s-a realizat în următoarele variante:

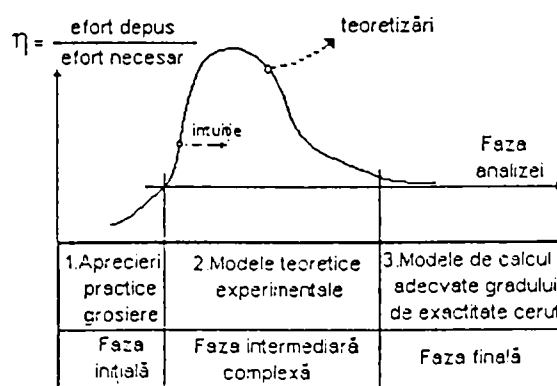


Fig. 3.7 Evoluția gradului de eficiență al modelării

- modelarea numerică cu **elemente finite de tip BEAM 3**;
- modelarea numerică cu **elemente finite de tip SHELL 3**.

Analiza cu elemente finite pentru o structură de rezistență atât de complexă cum este cea a podului rulant analizat care lucrează în hala unei oțelării, reprezintă o problemă deosebit de dificilă. Dificultățile sunt date de configurația geometrică a structurii, precum și de dimensiunile acesteia. În aceste condiții, efectuarea unei analize cât mai complete, care să evidențieze toate aspectele privind distribuția stării de tensiune și deformație din structură, presupune utilizarea unui model de calcul elaborat cu multă atenție, care să elimine aproximațiile care intervin în elaborarea modelului geometric și să permită utilizarea unor elemente finite corespunzătoare atât ca tip, cât și ca număr, deci implicit și ca mărime.

3.3.1 Modelul de calcul al structurii de rezistență al unui pod rulant utilizând elemente finite de tip bară (BEAM 3)

În cadrul acestui paragraf, se prezintă modelul de calcul al structurii de rezistență a podului rulant cu capacitatea de 100 KN, ecartamentul 11 m, ampatamentul 4,25 m și înălțimea de ridicare 17,3 m. Acesta permite efectuarea unei analize asupra stării de tensiune și deformație din structura de rezistență a utilajului analizat, utilizând programul de calcul COSMOS/M, versiunea 1.6. Scopul acestei analize este de a evidenția faptul că ea este supradimensionată, caz în care se va recurge la optimizarea acesteia, prin micșorarea grosimii tablei chesoanelor până la o limită acceptabilă din punct de vedere al tensiunilor admisibile.

Pentru modelarea structurii de rezistență în analiza cu metoda elementelor finite s-au parcurs următoarele etape:

1. Schematizarea geometrică a structurii, respectiv discretizarea ei într-un număr finit de elemente structurale, caracterizate prin forma și dimensiunile secțiunii transversale, precum și lungimea și orientarea axelor.
2. Stabilirea prin coordonate a poziției nodurilor de conexiune dintre elementele structurale și nodurile de reazem.
3. Schematizarea legăturilor dintre elementele structurale și legăturile exterioare, respectând

condiția de nedeformabilitate din punct de vedere geometric al structurii de rezistență și legarea ei invariabilă de baza de rezemare.

4. Schematizarea comportării materialului structurii, conform curbei caracteristice descrise prin relația dintre tensiune (σ) și deformație (ϵ), respectiv dintre forță (F) și deplasare (u).

5. Schematizarea acțiunilor ținând seama de modul de manifestare, de distribuția lor pe structură și de evoluția lor în timp, precum și de specificul condițiilor de exploatare ale construcției, elemente pe baza cărora se definesc caracteristicile de calcul ale fiecărei acțiuni: intensitatea, direcția, modul de aplicare (concentrată sau distribuită, fixă sau mobilă) și caracterul acțiunii (statică sau dinamică).

Etaplele anterior prezentate fac parte din etapa de preprocesare a programului de calcul, după care urmează postprocesarea, care include lansarea în execuție a programului și afișarea rezultatelor.

Pregătirea blocurilor de date de intrare, în conformitate cu secvențele 1 ÷ 5 anterior enunțate, s-a efectuat în concordanță cu cerințele programului de calcul automat utilizat pentru analiza structurii de rezistență. Ca date inițiale utilizate în vederea modelării structurii de rezistență a podului rulant, aflat în exploatare, au fost considerate cele aferente podului rulant supus studiului, rezultate din: analiza privind geometria elementelor structurii, a ansamblului acestuia, precum și a legăturilor dintre elemente, prezentate în paragraful 3.2.2.

Structura de rezistență a podului rulant este alcătuită, așa cum s-a arătat în paragraful precedent, din două lonjeroane și două traverse, care formează un contur plan închis, static nedeterminat. În modelare, prezența diferitelor agregate, a încărcărilor și a greutateilor proprii a elementelor constitutive a structurii de rezistență s-au materializat prin mase concentrate, schematizarea acestora făcându-se prin forțe concentrate, a căror poziționare pe structura de rezistență este prezentată în fig. 3.8. Valorile acestor forțe sunt:

$$F_1 = F_{26} = 2800 \text{ N}, F_3 = F_{13} = 4375 \text{ N}, F_7 = F_9 = 9700 \text{ N},$$

$$F_8 = 30\,807 \text{ N}, F_{17} = F_{24} = 4125 \text{ N}, F_{19} = F_{22} = 3375 \text{ N}, F_{20} = 15774,5 \text{ N}$$

$$R_1 = 15774,5 \text{ N}, R_{II} = 32\,000 \text{ N}, G_m = 9500 \text{ N}, G_c = 6150 \text{ N}.$$

Poziționarea lor pe structura de rezistență s-a realizat prin intermediul următoarelor dimensiuni :

$$a_1 = 1005 \text{ mm}, a_2 = 3315 \text{ mm}, b_1 = 850 \text{ mm}, b_2 = 400 \text{ mm},$$

$$b_3 = 3970 \text{ mm}, l = b_1 + b_2 + b_3, c_2 = 875 \text{ mm}, c_3 = 130 \text{ mm},$$

$$c_4 = 825 \text{ mm}, c_5 = 180 \text{ mm}, c_6 = 2 c_1 = 1120 \text{ mm}$$

Modelarea structurii de rezistență în programul de calcul s-a făcut prin folosirea elementelor finite de tip bară tridimensională (BEAM 3). Constantele reale ale acestor elemente, reprezentând principalele caracteristici geometrice ale secțiunilor transversale, au fost calculate după cum urmează : - ariile: $A(x) = 2\delta \cdot [B + H_x]$

$$\text{- momentele de inerție axiale: } I_z(x) = \frac{B \cdot \delta^3}{6} + 2 \cdot \delta \cdot B \cdot \left[\frac{H_x + \delta}{2} \right]^2 + \frac{\delta \cdot H_x^3}{6}$$

$$I_y(x) = \frac{\delta \cdot B^3}{6} + \frac{\delta^3 \cdot H}{6} + 2 \cdot \delta \cdot H_x \left[\frac{162}{x} \right]^2$$

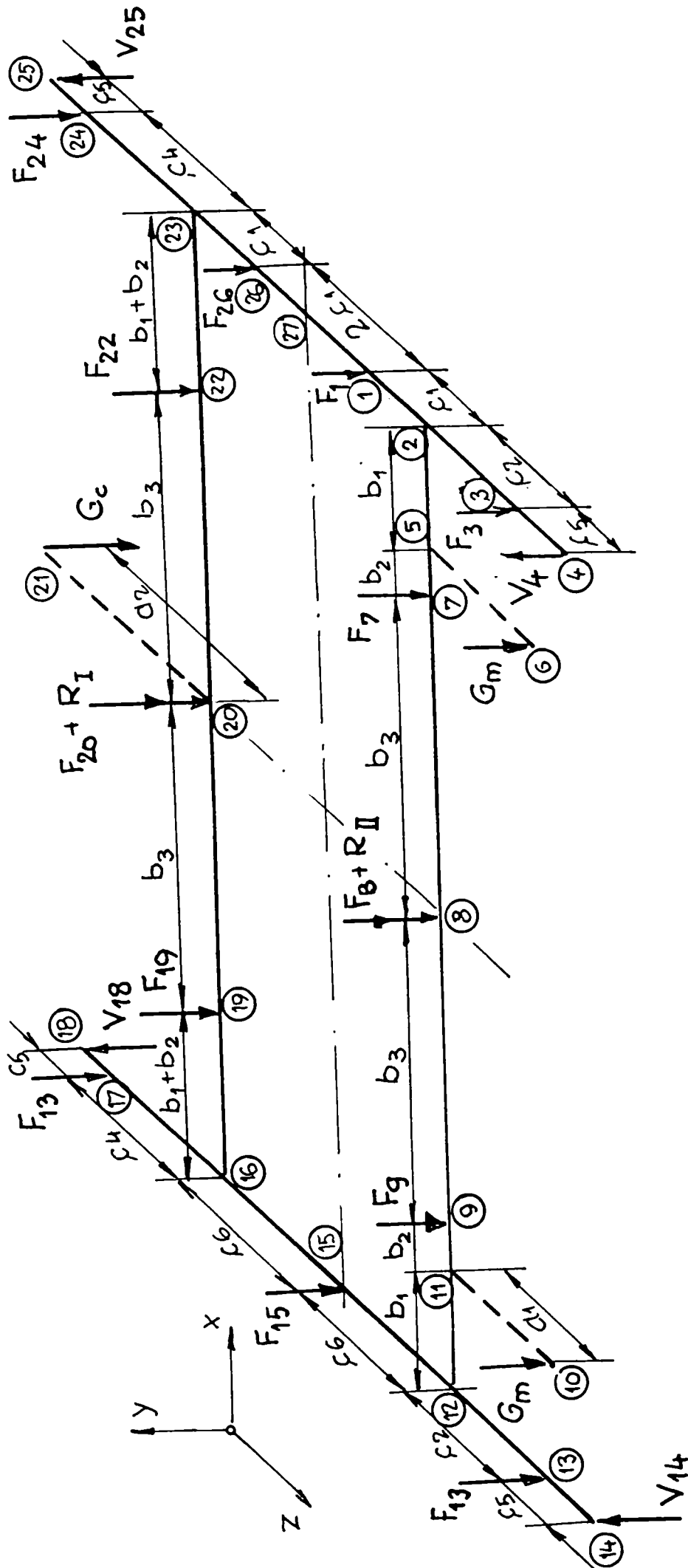


Fig. 3.8 Sistemul spațial al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN-17,3 m

$$\text{- moment de inerție la răsucire: } I_t(x) = \frac{2 \cdot \delta \cdot (B^* + \delta)^2 \cdot [H_x + \delta]}{B^* + H_x}$$

$$\text{- modul de rezistență la răsucire: } W_t(x) = 2 \cdot \delta \cdot B^* \cdot H_x$$

În relațiile anterioare, variabila „x” reprezintă poziția elementului față de capătul lonjeronului, iar lățimea B^* are valorile: $(290 + \delta)$ pentru traverse, respectiv $(240 + \delta)$ pentru lonjeroane, fig.3.9.

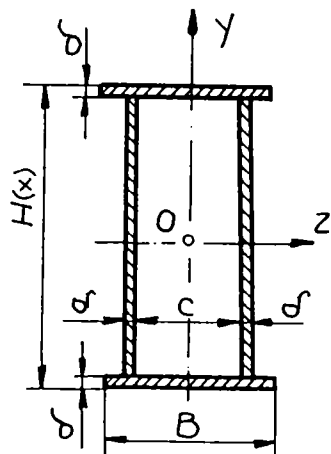


Fig.3.9 Dimensiunile secțiunilor grinzilor podului rulant considerate în modelare

Porțiunile cu înălțime variabilă au fost asimilate cu câte șase elemente de rigiditate constantă, care se modifică în trepte de la un element la altul. Caracteristicile geometrice au fost determinate pentru opt seturi de elemente (I,II,III,IV,V,VI) prezentate în tabelul 3.1. Setul I de valori corespunde traverselor, setul II porțiunilor de mijloc a lonjeroanelor, iar seturile III, IV, V,VI, VII, VIII, porțiunilor de înălțime variabilă.

Pe baza datelor anterior prezentate s-a elaborat modelul de calcul al structurii de rezistență a podului rulant analizat care este prezentată în fig.3.10.

Tabelul 3.1.

Caracteristicile geometrice ale secțiunilor lonjeroanelor și traverselor

Nr. set elemente	B [mm]	H [mm]	A [mm ²]	$I_z \cdot 10^8$ [mm ⁴]	$I_y \cdot 10^8$ [mm ⁴]	$I_t \cdot 10^8$ [mm ⁴]
I (1,2,...,10)	425	600	12 156	6,531	2,313	4,168
II (11,...,17,45)	350	762	13 200	10,22	1,903	4,441
III (19,...,22)	350	614	11 568	6,35	3,363	3,451
IV (23,...,26)	350	642	11 898	7,042	1,69	3,651
V (27,...,32)	350	669	12 224	7,77	1,744	3,846
VI (33,...,36)	350	695	12 544	8,525	1,796	4,040
VII (37,...,40)	350	722	12 863	9,357	1,848	4,235
VIII(41,...,44)	350	749	13 138	10,01	1,901	4,432

Modelul de calcul elaborat permite efectuarea unui studiu de ansamblu asupra modului de comportare al structurii de rezistență a podului rulant, fără însă să evidențieze aspecte legate de fenomenele de concentrare a tensiunilor sau o studiere în detaliu a distribuției stării de tensiuni și deformații.

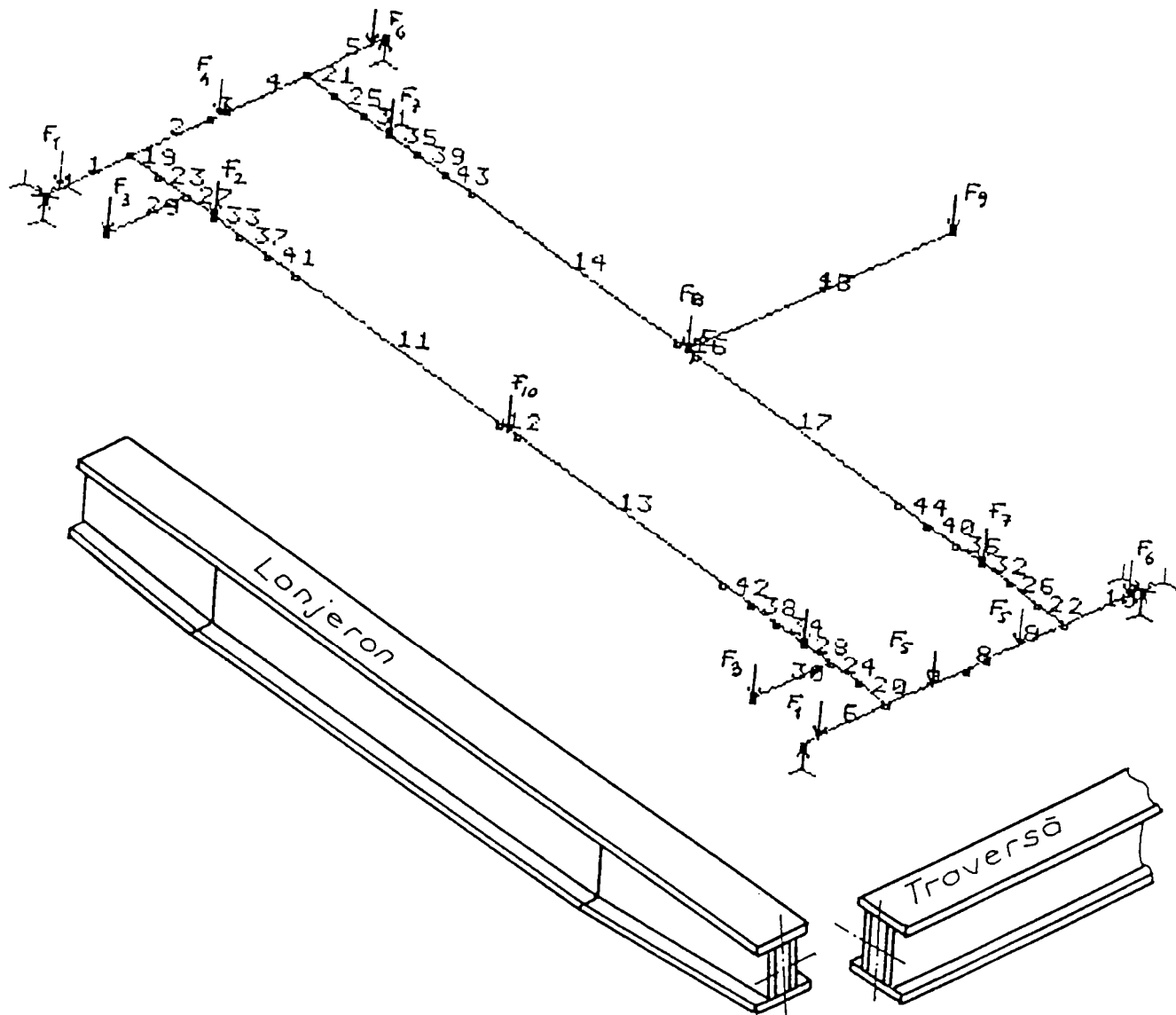


Fig.3.10 Modelul de calcul al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN - 17,3 m în analiza cu elemente finite de tip BEAM 3

Ținând cont de cerințele constructive și de soluțiile alese în proiectarea podurilor rulante, un rol deosebit de important îl are cunoașterea zonelor în care apar concentrări ale tensiunilor. Cunoașterea acestor zone presupune studiul stării de tensiuni și deformații pe baza unor modele de calcul la care aproximațiile introduse în modelarea geometrică să fie neglijabile.

3.3.2 Rezultate obținute în urma analizei cu elemente finite de tip BEAM 3

În acest paragraf, din fișierele cu rezultate obținute în urma calculului condus cu ajutorul programului COSMOS/M, versiunea 1.6, au fost selectate acele valori considerate semnificative, cu ajutorul cărora s-au putut trasa diagramele prezentate în continuare.

Adaptarea programului la structura de rezistență considerată a permis determinarea forței tăietoare (T_y), a momentului încovoietor (M_z), a momentului de răsucire (M_t), respectiv a tensiunilor corespunzătoare, tabel 3.2. Pe baza rezultatelor sintetizate în acest tabel s-a trasat variația momentele încovoietoare (M_z) și a celor de răsucire (M_t) pentru întreaga structură de rezistență, acestea fiind prezentate în fig.3.11, respectiv fig.3.12.

Tabelul 3.2

Valorile forțelor, momentelor și tensiunilor determinate cu programul de calcul pentru elementele finite cele mai semnificative ale modelului de calcul

Nr. ELEMENT	FORȚE [N]		MOMENTE [N/mm]			TENSIUNI [N/mm ²]		
	NODUL1	NODUL2		NODUL1	NODUL2		NODUL1	NODUL2
1.	1	2		1	2		1	2
N	0	0	M_t	$0,5298 \cdot 10^{-10}$	$-0,5298 \cdot 10^{-10}$	N/A	0	0
T_Y	$0,5042 \cdot 10^5$	$-0,4605 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$0,7276 \cdot 10^{-10}$	$0,4937 \cdot 10^6$	M_Z/W_Z	$0,6424 \cdot 10^{-12}$	$0,4358 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$0,4998 \cdot 10^{-12}$	$-0,4998 \cdot 10^{-12}$
2.	2	4		2	4		2	4
N	0	0	M_t	$0,1141 \cdot 10^6$	$-0,1141 \cdot 10^6$	N/A	0	0
T_Y	$0,04520 \cdot 10^5$	$0,4520 \cdot 10^4$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$0,3981 \cdot 10^6$	$0,3529 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$0,3515 \cdot 10^2$	$0,3116 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$0,1076 \cdot 10^2$	$-0,1076 \cdot 10^2$
3.	4	5		4	5		4	5
N	0	0	M_t	$0,1141 \cdot 10^6$	$-0,1141 \cdot 10^6$	N/A	0	0
T_Y	$0,4520 \cdot 10^4$	$0,1012 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$0,3529 \cdot 10^6$	$0,3353 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$0,3116 \cdot 10^2$	$0,2961 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$0,1076 \cdot 10^2$	$-0,1076 \cdot 10^2$
4.	5	6		5	6		5	6
N	0	0	M_t	$0,1141 \cdot 10^6$	$-0,1141 \cdot 10^6$	N/A	0	0
T_Y	$-0,1012 \cdot 10^5$	$0,1012 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$0,3353 \cdot 10^6$	$0,2341 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$-0,2961 \cdot 10^2$	$0,2067 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$0,1076 \cdot 10^2$	$-0,1076 \cdot 10^2$
5.	6	7		6	7		6	7
N	0	0	M_t	$-0,5127 \cdot 10^{-10}$	$0,5127 \cdot 10^{-10}$	N/A	0	0
T_Y	$-0,3269 \cdot 10^5$	$0,3682 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$-0,3360 \cdot 10^6$	$-0,5912 \cdot 10^{-10}$	M_t/W_t	$-0,2967 \cdot 10^2$	$-0,5219 \cdot 10^{-12}$
						M_t/W_t	$-0,4837 \cdot 10^{-12}$	$0,4837 \cdot 10^{-12}$
6.	8	9		8	9		8	9
N	0	0	M_t	$0,5531 \cdot 10^{-10}$	$0,5531 \cdot 10^{-10}$	N/A	0	0
T_Y	$0,5048 \cdot 10^5$	$-0,4611 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$-0,7640 \cdot 10^{-10}$	$0,4943 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$-0,6745 \cdot 10^{-12}$	$0,4364 \cdot 10^{-12}$
						M_t/W_t	$0,5217 \cdot 10^{-13}$	$-0,5217 \cdot 10^{-13}$
7.	9	11		9	11		9	11
N	0	0	M_t	$-0,1142 \cdot 10^6$	$0,1142 \cdot 10^6$	N/A	0	0
T_Y	$-0,04533 \cdot 10^5$	$0,07333 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$-0,3989 \cdot 10^6$	$0,3412 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$-0,3522 \cdot 10^2$	$0,3013 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$-0,1077 \cdot 10^2$	$0,1077 \cdot 10^2$
8.	11	12		11	12		11	12
N	0	0	M_t	$-0,1142 \cdot 10^6$	$0,1142 \cdot 10^6$	N/A	0	0
T_Y	$-0,07333 \cdot 10^5$	$0,07333 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$-0,3412 \cdot 10^6$	$0,3256 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$-0,3013 \cdot 10^2$	$0,2857 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$-0,1077 \cdot 10^2$	$0,1077 \cdot 10^2$
9.	12	13		12	13		12	13
N	0	0	M_t	$-0,1142 \cdot 10^6$	$0,1142 \cdot 10^6$	N/A	0	0
T_Y	$-0,07333 \cdot 10^5$	$0,1013 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$-0,3236 \cdot 10^6$	$0,2346 \cdot 10^6$	M_t/W_t	$-0,2857 \cdot 10^2$	$0,2071 \cdot 10^2$
						M_t/W_t	$-0,1077 \cdot 10^2$	$0,1077 \cdot 10^2$
10.	13	14		13	14		13	14
N	0	0	M_t	$0,3462 \cdot 10^{-10}$	$-0,3462 \cdot 10^{-10}$	N/A	0	0
T_Y	$-0,3275 \cdot 10^5$	$0,3687 \cdot 10^5$	M_Y	0	0	M_Y/W_Y	0	0
T_Z	0	0	M_Z	$-0,3366 \cdot 10^6$	$0,1428 \cdot 10^{-9}$	M_t/W_t	$-0,2972 \cdot 10^2$	$0,1261 \cdot 10^{-12}$
						M_t/W_t	$0,3266 \cdot 10^{-12}$	$-0,3266 \cdot 10^{-12}$

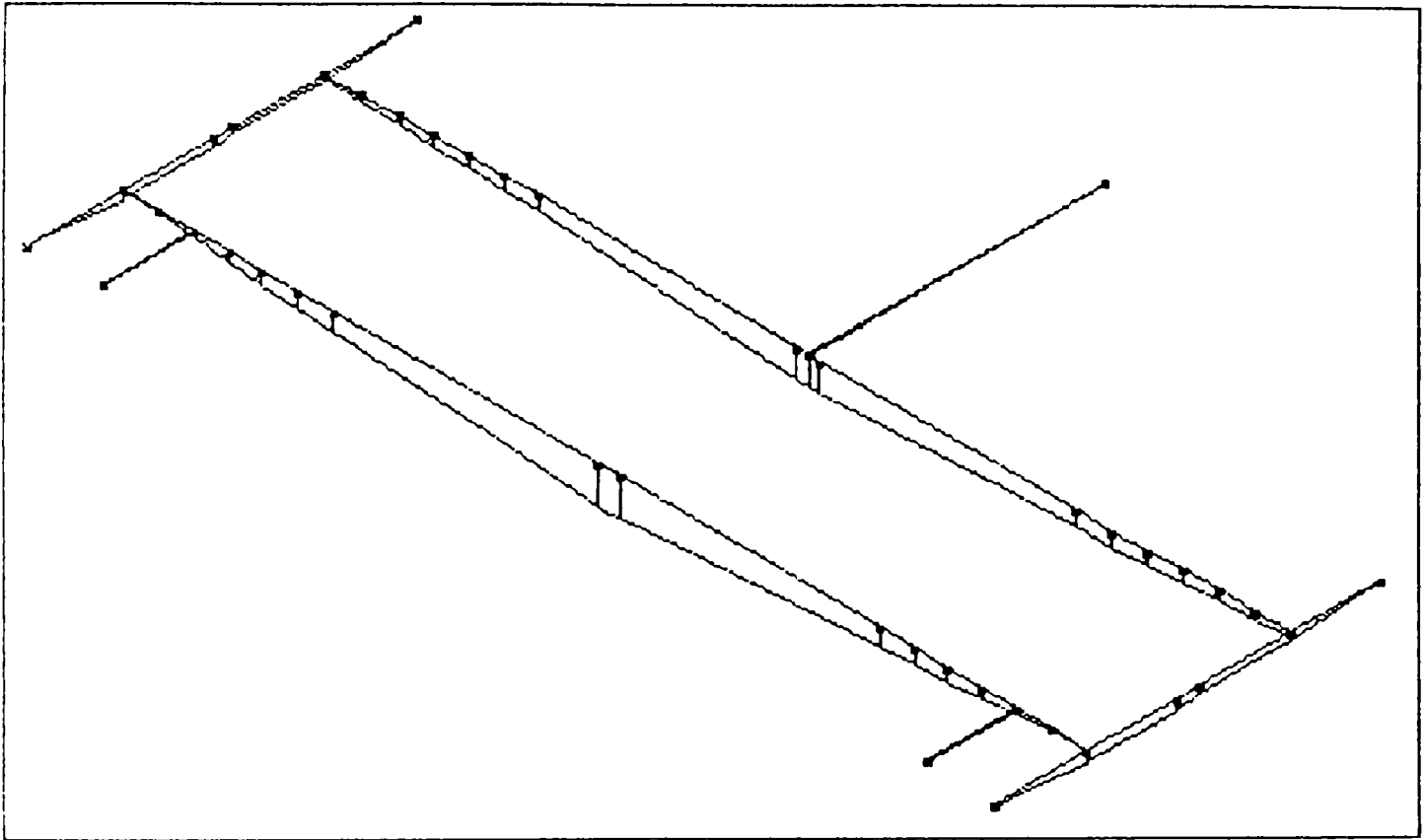


Fig.3.11 Variația momentului încovoietor la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant

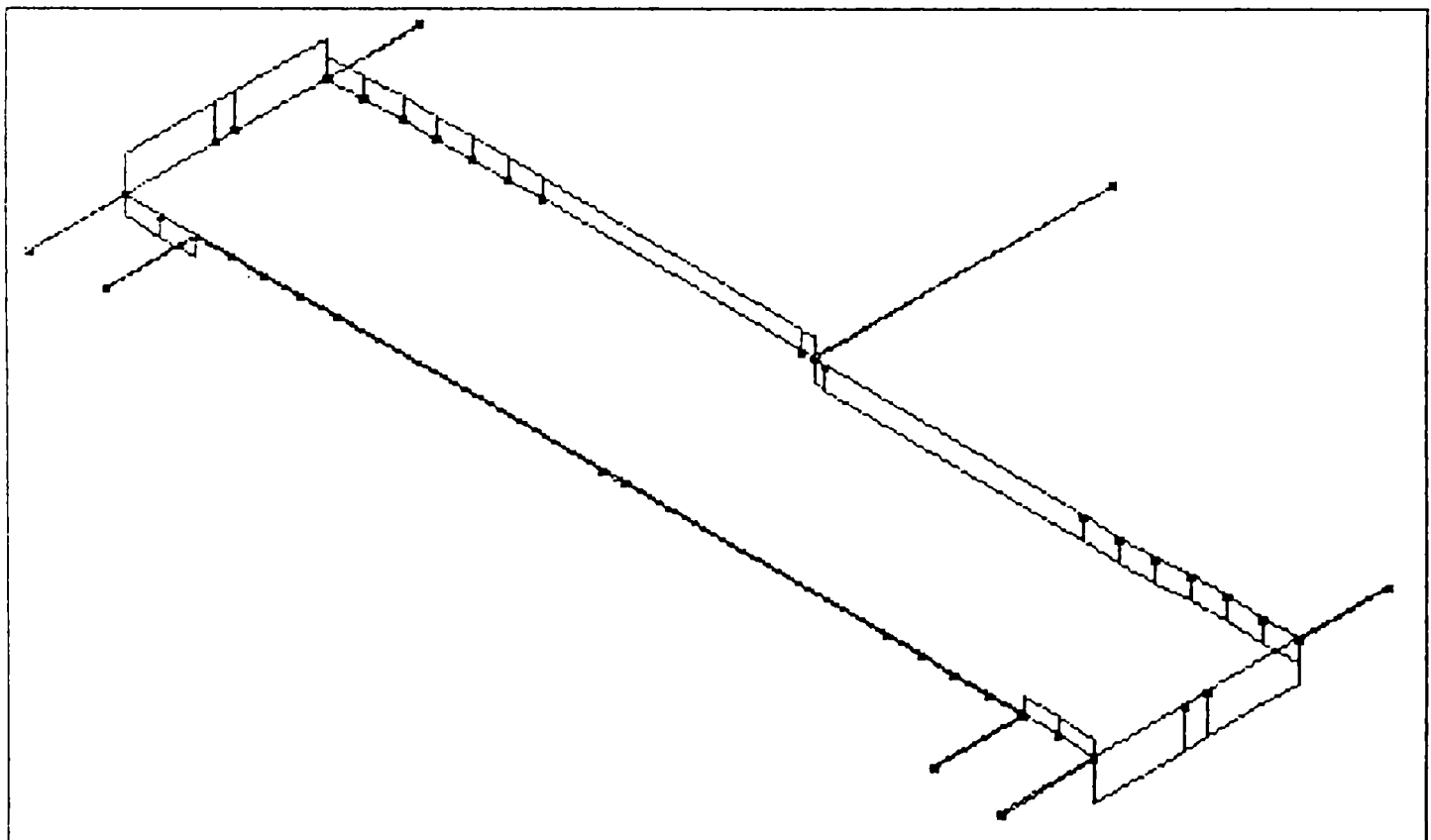


Fig.3.12 Variația momentului de răsucire la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant

Se observă că, momentele încovoietoare au valori maxime la mijlocul grinzilor principale, iar momentele de răsucire, în grinzile de capăt.

În ceea ce privește tensiunile, valori maxime ale acestora apar în lonjeroane, în elementele 12 și 16, elemente corespunzătoare zonelor de mijloc ale acestora, iar pentru zonele de înălțime variabilă, elementele cele mai solicitate sunt: 21, 26, 31, 38, 42. Tensiunile maxime aferente acestor zone sunt de două până la trei ori mai mici decât cele de la mijlocul lonjeronului. În traverse, cea mai solicitată zonă este mijlocul traversei II, căreia îi corespunde elementul 3.

Totodată programul a permis reprezentarea poziției inițiale a structurii de rezistență în comparație cu cea deformată, fig.3.13.

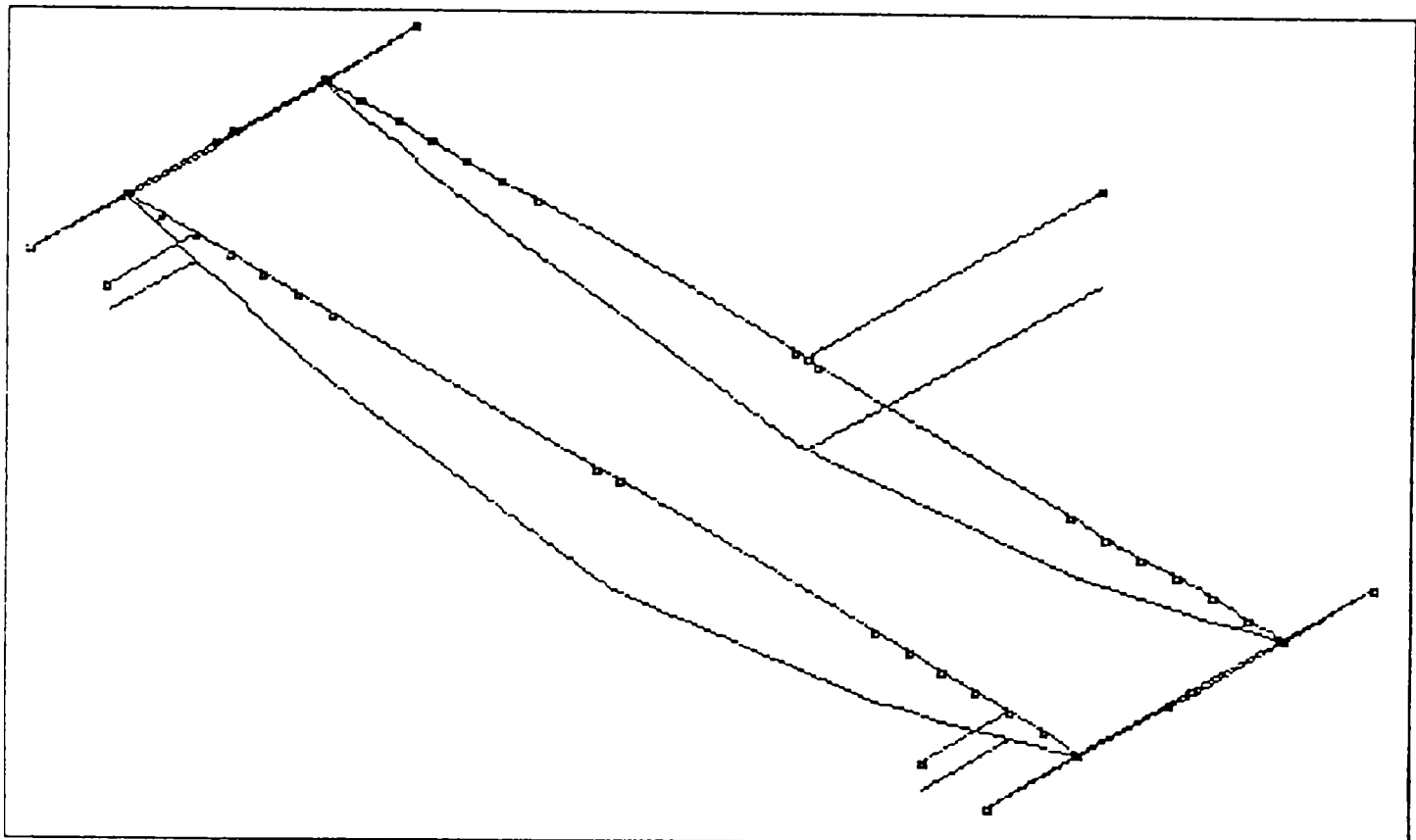


Fig.3.13 Reprezentarea poziției deformată în comparație cu cea nedeformată a structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN-17,3 m

Din studiul stării de tensiune din structura de rezistență a podului rulant, pe baza rezultatelor prezentate în tabelul 3.2 se observă că valorile tensiunilor nu depășesc valoarea tensiunii admisibile, care pentru oțelul OL 37 din care este confecționată structura de rezistență a podului rulant analizat este de 150 N/mm^2 . Acest fapt evidențiază posibilitatea optimizării dimensionale în vederea reducerii consumului de material, deoarece structura de rezistență fiind supradimensionată prezintă rezerve importante de rezistență. Astfel, în cap. 5 se va efectua o optimizare dimensională a structurii metalice a utilajului, din punct de vedere al greutateii acesteia fără a depăși rezistența admisibilă a materialului din care structura este confecționată.

3.3.3. Modelul de calcul al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m utilizând elemente finite de tip SHELL 3

Programele moderne de analiză cu elemente finite, așa cum s-a arătat în paragraful 2.1.2.3, utilizează elemente finite evoluat care pot să asigure compatibilitatea între elemente pentru toate cazurile de solicitare și permit efectuarea unei analize detaliate a stării de tensiune și deformație din structurile de rezistență.

În acest sens, am ales o versiune modernă a programului de calcul COSMOS/M 2.5, care dispune în biblioteca de elemente, de elemente finite de tip membrană sau placă subțire (SHELL 3), cu trei sau patru noduri pe element și câte șase grade de libertate pe nod, [129], care au o precizie de calcul foarte bună și nu limitează dimensiunile analizei prin numărul de elemente sau de noduri, fiind capabile să asigure satisfacerea condiției de compatibilitate și de echilibru, atât în interiorul lor, cât și pentru întreaga structură.

În alegerea tipului elementelor finite folosite în discretizare am avut în vedere disponibilitățile pe care le asigură această versiune a programului de calcul, acest lucru permițând obținerea unui model de calcul la care aproximațiile introduse de modelarea geometrică să fie neglijabile. Așa cum se arată în literatura de specialitate [73], acest tip de elemente sunt considerate ca având una dintre dimensiuni mai mică în comparație cu celelalte două, sarcinile se presupun a fi introduse prin suprafețele de capăt sau prin suprafața mediană, admițând o repartitie de tensiuni pe grosimea plăcii, independentă de forma solicitării exterioare. Repartiția acestor tensiuni în lungul liniei mediane a elementelor finite depinde de repartiția longitudinală și transversală a solicitărilor exterioare. Condițiile la limită pot fi aplicate în nodurile elementelor finite, iar compatibilitatea între elemente este asigurată de o funcție de aproximare care este un polinom cubic complet prezentat detaliat în paragraful 2.1.2.3.

În vederea modelării structurii de rezistență a podului rulant cu capacitatea de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m, a cărei alcătuire structurală a fost prezentată în paragraful 3.2.2, s-au parcurs aceleași etape prezentate în 3.3.1, secvențele 1 ÷ 5.

Ca date inițiale utilizate în vederea modelării structurii de rezistență au fost considerate cele prezentate în paragraful 3.2.2.

Pentru modelarea structurii de rezistență, am folosit două sisteme de referință: un *sistem de referință global*, la care se raportează întreg domeniul al problemei și un *sistem de referință local*, asociat unui subdomeniu al problemei. Pentru problema studiată ca și sistem de coordonate global am folosit sistemul de coordonate carteziane, iar pentru simplificarea definirii acestui domeniul ca sistem de referință local, specific elementului finit considerat, am folosit coordonatele parametrice (adimensionale), obținute prin raportarea variabilelor de tip lungime, arie sau volum, determinate în funcție de coordonatele globale, la mărimi caracteristice elementului finit de același tip, reprezentate în funcție de coordonatele globale. Astfel, încărcările care acționează asupra ansamblului structurii de rezistență analizată, au fost declarate față de sistemul de referință global, ca fiind încărcări nodale, în cazul forțelor și momentelor concentrate, respectiv față de sistemul de referință local, în cazul

forțelor distribuite.

Obținerea **modelului fizic** al structurii studiate a necesitat, conform manualului de utilizare al programului de calcul COSMOS/M, [129], organizarea datelor de intrare sub forma unui fișier ce cuprinde următoarele:

- declararea tipului problemei tratate;
- specificarea dimensiunilor structurii, prin numărul total de noduri și elemente rezultate în urma discretizării;
- definirea structurii și a condițiilor limită, respectiv:
 - caracteristicile fizice ale materialului și caracteristicile geometrice ale secțiunilor transversale ale tuturor elementelor;
 - definirea nodurilor structurii în sistemul de coordonate general;
 - definirea elementelor, prin nodul de origine și cele de extremitate;
- specificarea nodurilor de reazem;
- declararea gradelor de libertate, respectiv a deplasărilor și rotirilor deblocate pe nodurile curente și de reazem;
- declararea încărcărilor nodale și a încărcărilor distribuite în sistemul de coordonate general;
- gruparea încărcărilor în ipoteze de încărcare;
- specificarea combinațiilor ipotezelor de încărcare;
- declararea tipului de analiză globală efectuată asupra structurii.

Organizarea datelor de intrare pentru calculul de conlucrare spațială al ansamblului structurii de rezistență a podului rulant, cu programul de calcul COSMOS/M este prezentată în anexa A.2, sub forma unui fișier de date, structurat pe blocuri distincte ce conține informații cu privire la topologiei structurii de rezistență, încărcările de calcul și combinațiile acestora, poziția acestor încărcări pe structură precum și opțiunea privind tipul de calcul solicitat de utilizator.

Topologia structurii de rezistență a podului rulant, analizată detaliat în paragraful 3.2.2, a fost modelată pe baza desenelor de execuție a elementelor constitutive. Aceasta a fost generată geometric cu ajutorul modulului **GEOSTAR** care a permis reprezentarea modelului geometric al trverselor, fig.3.14, fig.3.15, fig. A.3.1 și fig. A.3.2, respectiv al lonjeroanelor, fig.A.3.3.

Astfel, pentru podul rulant analizat, prin evidențierea principalelor elemente constitutive ale structurii, analizate în paragraful 3.2.1 a rezultat geometria ansamblului spațial al structurii de rezistență fig.3.18, fig.3.20, fig.A.3.5a și fig.A.3.5b.

Specificarea dimensiunilor structurii în programul de calcul s-a realizat prin numărul total de elemente finite și noduri rezultate în urma discretizării. Numerotarea elementelor finite s-a realizat în fig.3.16 pentru traversa I, în fig.3.17 pentru lonjeronul II respectiv pentru o porțiune din structura de rezistență la îmbinarea dintre lonjeronul II și traversa I, în apropierea sistemului de axe de coordonate, fig.3.19. Programul de calcul a permis discretizarea structurii de rezistență într-o rețea ce cuprinde 42896 elemente finite de tip SHELL 3, cu 20572 noduri și 123 726 grade de libertate, fig. 3.21, astfel :

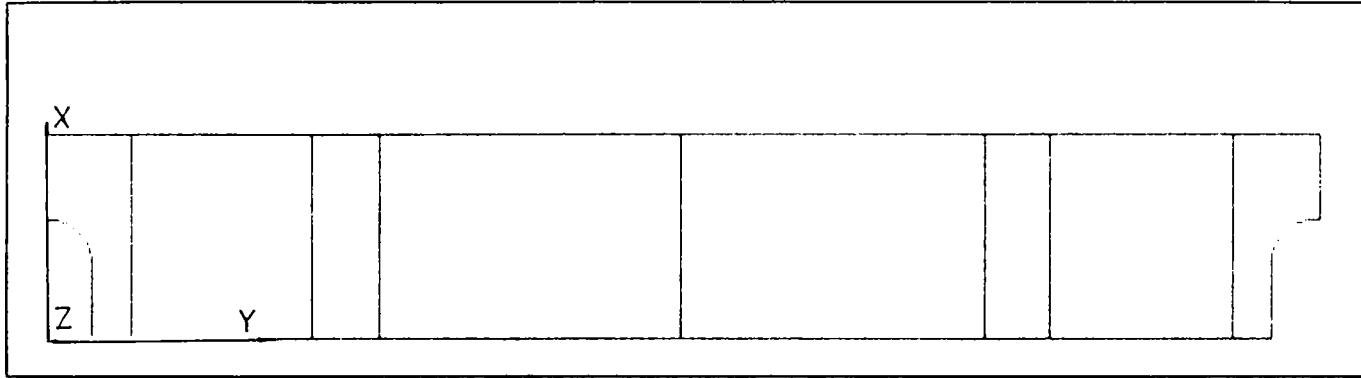


Fig.3.14 Secțiune mediană prin traversa I în reprezentare tip wireframe

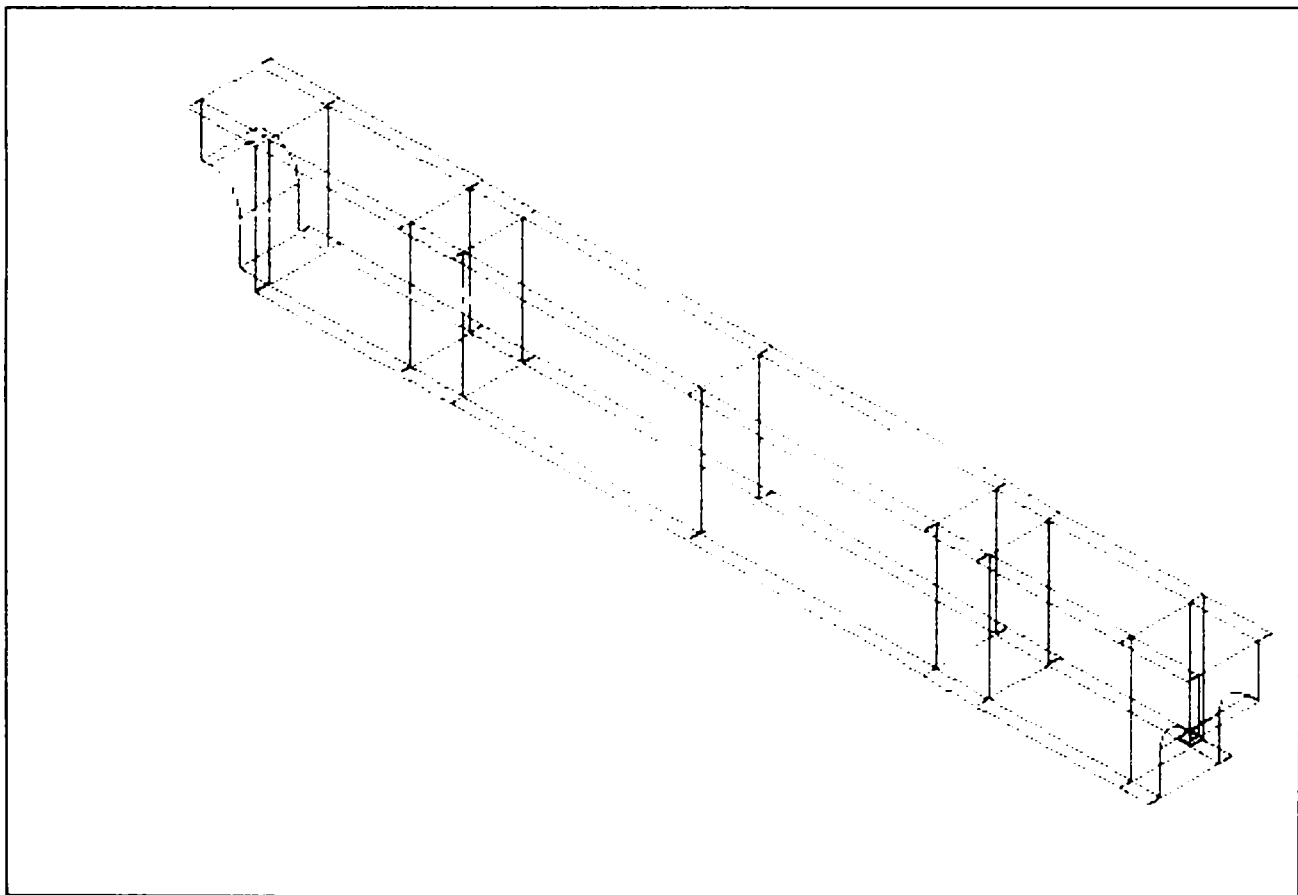


Fig.3.15 Reprezentare tip wireframe a traversei I

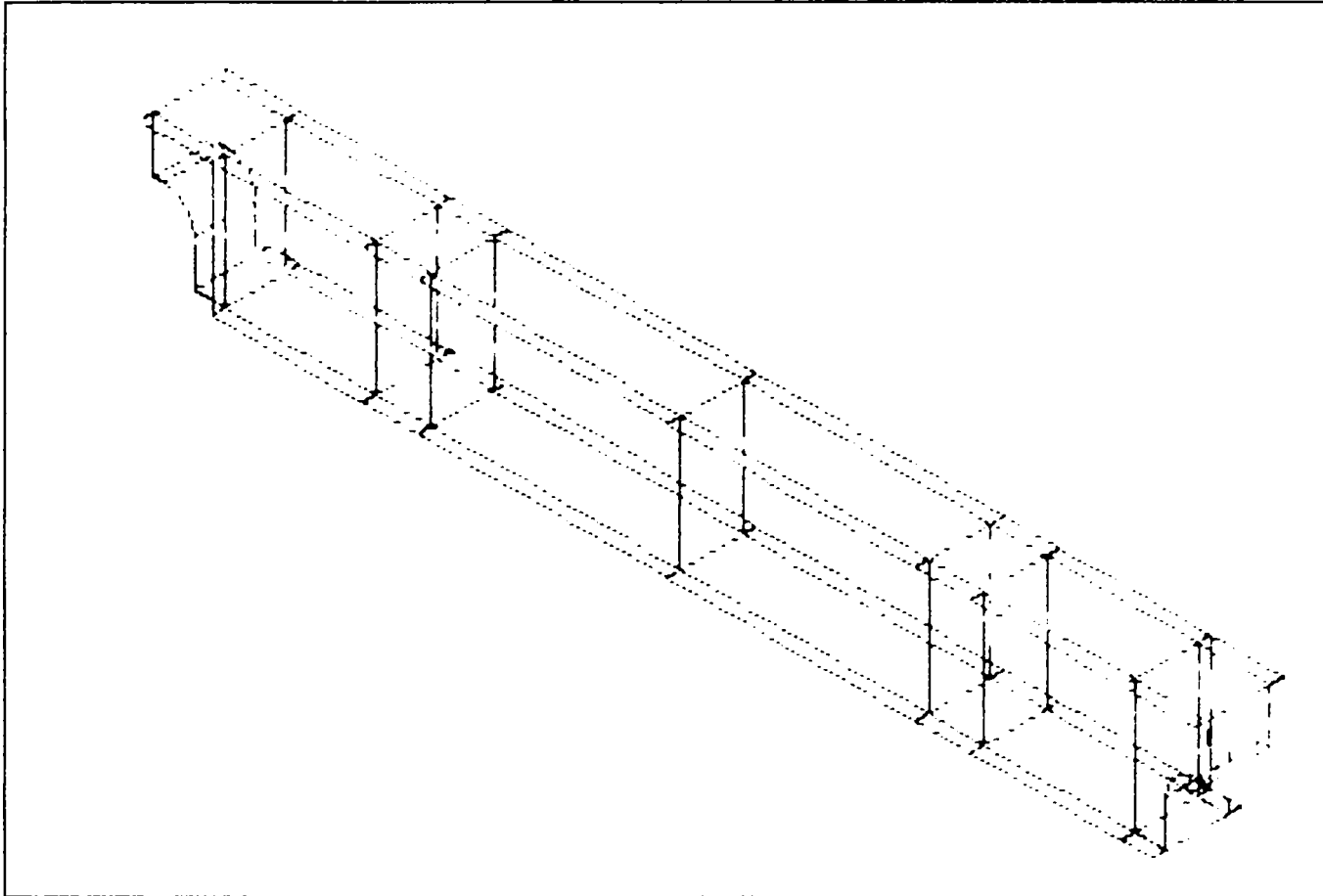


Fig.3.16 Reprezentarea traversei I cu evidențierea câtorva elemente finite

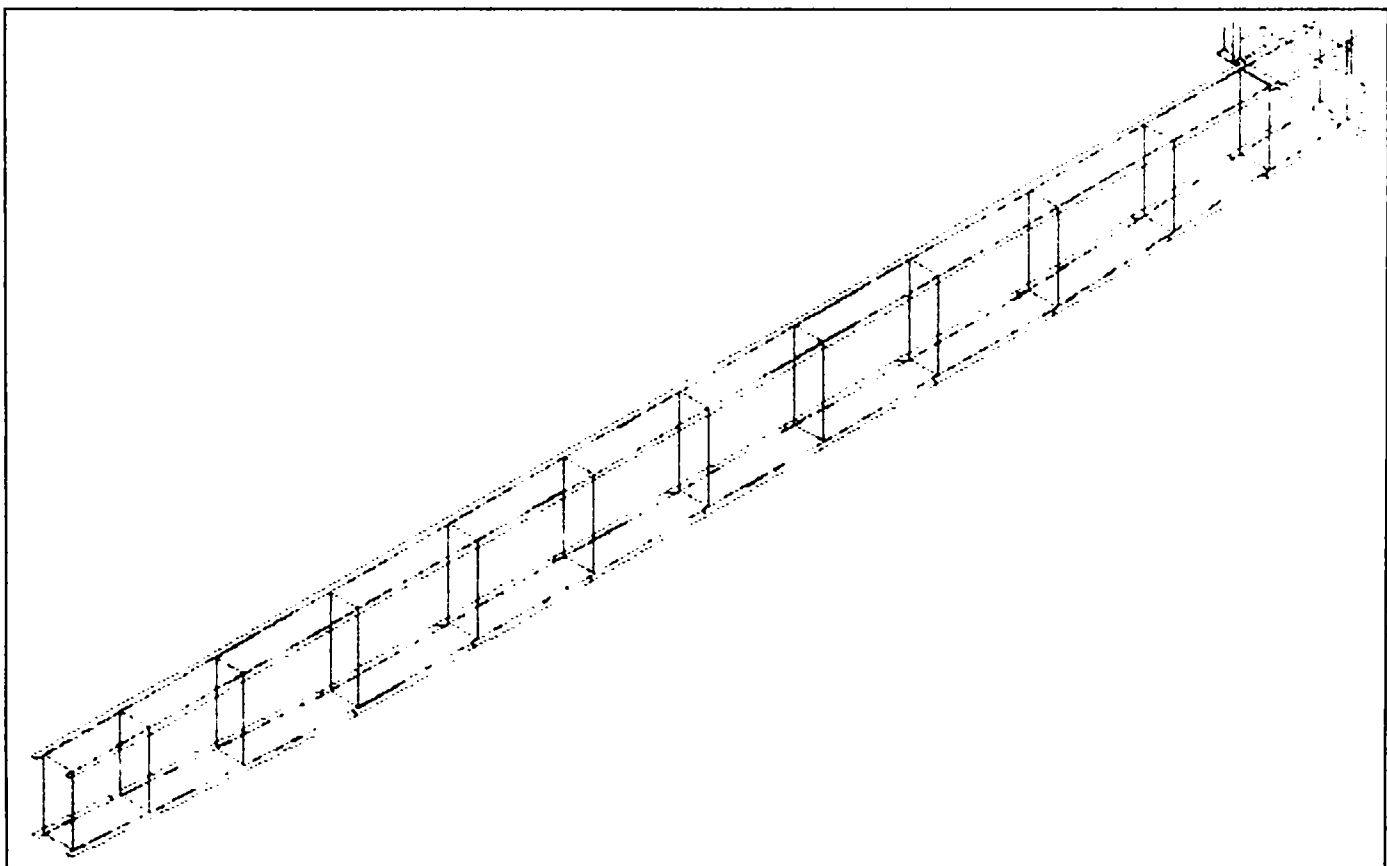


Fig.3.17 Reprezentarea lonjeronului II cu evidențierea câtorva elemente finite

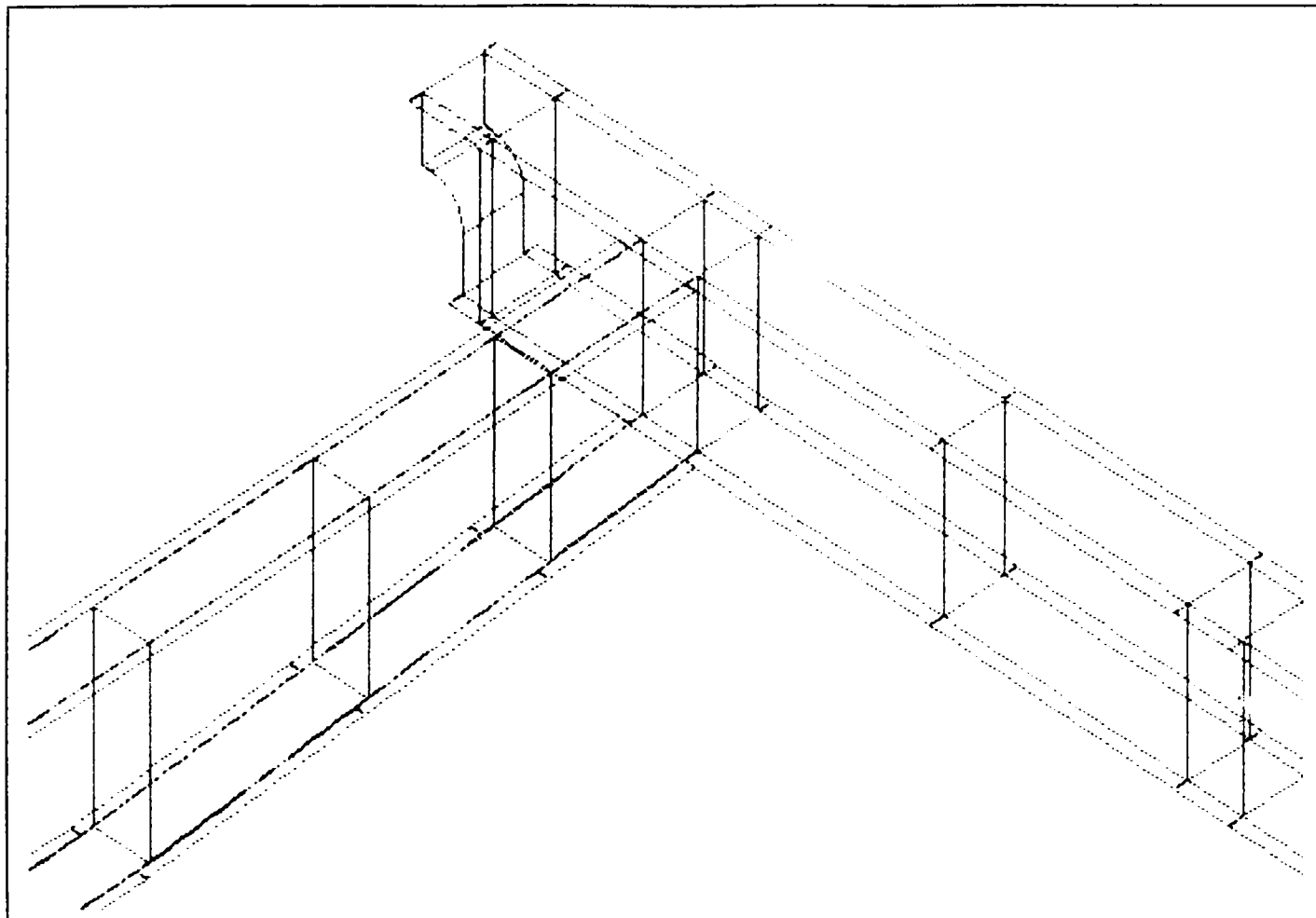


Fig.3.18 Reprezentare tip wireframe a îmbinării dintre traversa I și lonjeronul II

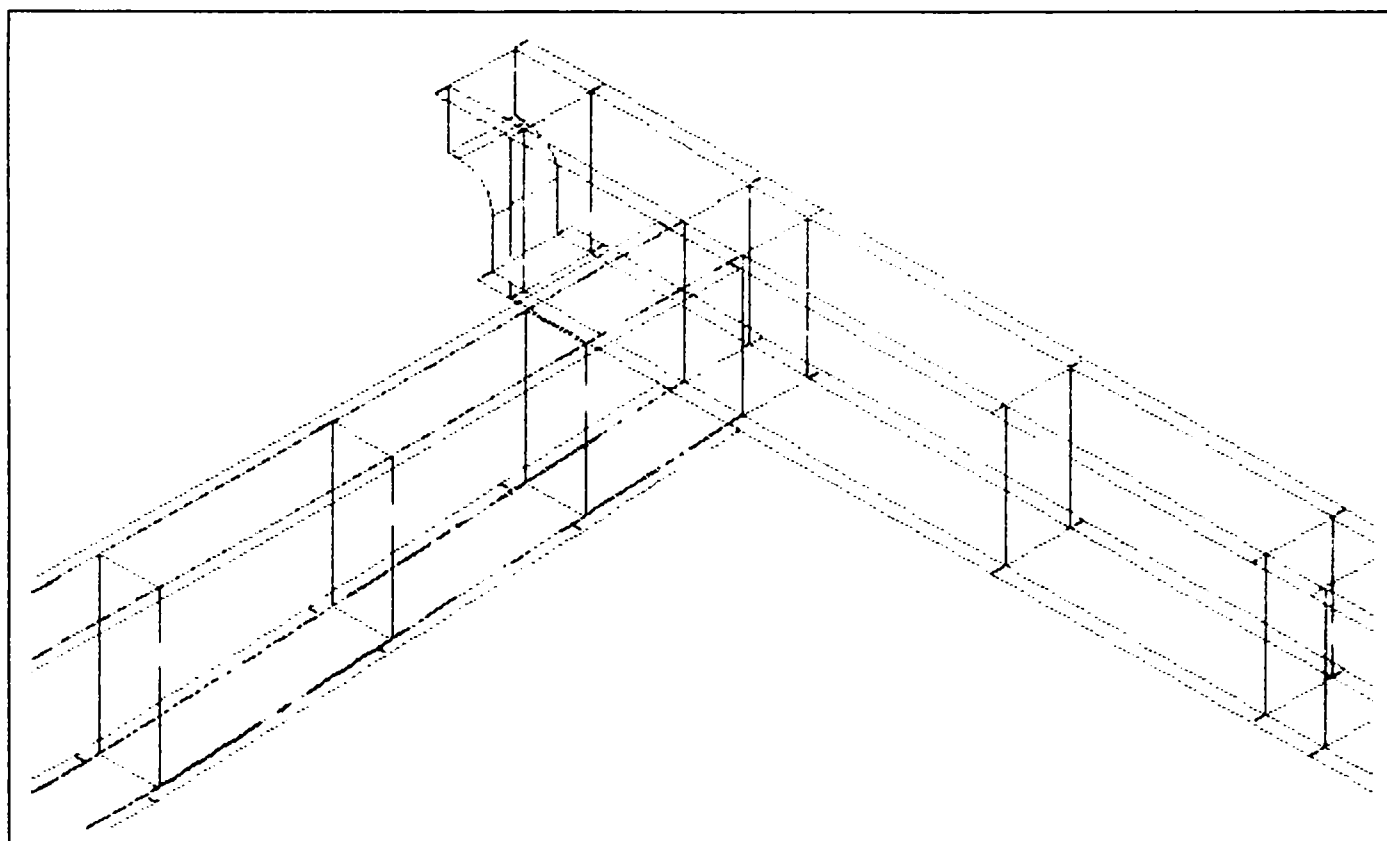


Fig.3.19 Reprezentare tip wireframe a îmbinării dintre traversa I și lonjeronul II cu evidențierea câtorva elemente finite

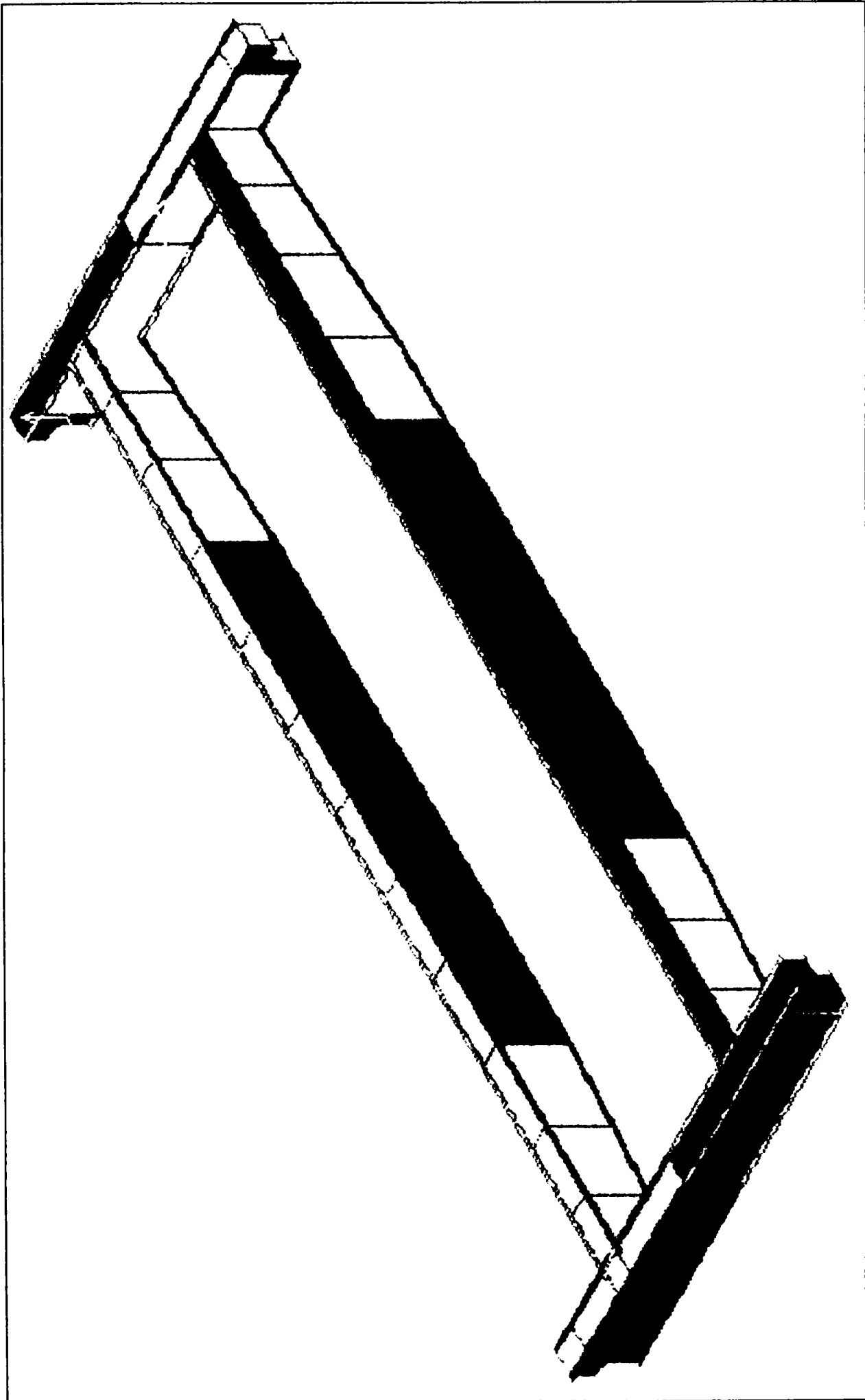


Fig. 3.20 Modelul geometric al structurii de rezistență a podului rulant de 17,3 m

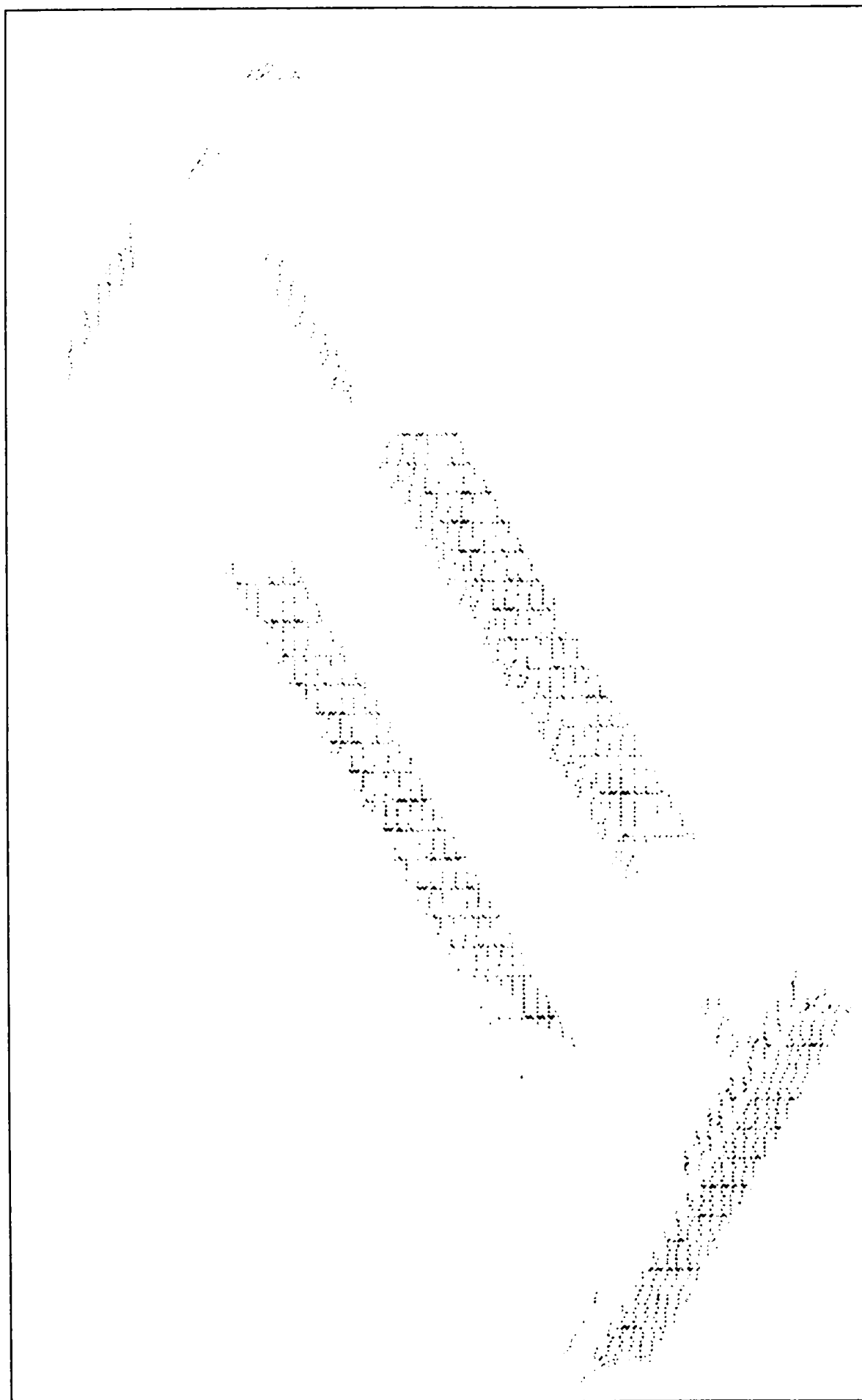


Fig. 3.21 Discretizarea structurii de rezistență a podului rulant de 100 kN – 17,3 m în elemente finite de tip SHELL 3

- cele două traverse au fost discretizate în câte 6714 elemente fiecare, numerotarea lor fiind realizată de la 1 la 6714 pentru traversa I și de la 6715 la 13428 pentru traversa II ;
- cele două lonjeroane au fost discretizate în 14734 elemente fiecare, numerotarea lor fiind realizată de la 13428 la 42896.

Numărul mare de elemente finite de tip placă subțire în care a fost discretizată structura de rezistență a podului rulant a permis o modelare foarte apropiată de geometria reală a podului rulant.

În ceea ce privește solicitările, în modelare acestea au fost considerate în domeniul elastic și în consecință s-au introdus constantele elastice corespunzătoare materialului OL 37, STAS 500/2-80.

Condițiile de contur privind modul de rezemare și încărcare au fost introduse după cum urmează:

- În introducerea blocajelor pentru anumite grade de libertate din nodurile structurii, s-a avut în vedere prezența celor patru roți de rulare ale podului. Astfel, pentru nodurile situate la nivelul roților motoare s-au introdus blocaje pentru deplasările liniare u, v, w , după cele trei direcții ale sistemului de axe global XYZ al structurii, iar pentru roțile conduse s-au introdus numai blocaje liniare u și w după direcțiile Y și Z.
- Forțele s-au distribuit în nodurile din dreptul zonei de aplicare a acestora în conformitate cu schema de încărcare a podului rulant. Existența unor încărcări excentrice prin intermediul unor brațe rigide, a condus la înlocuirea acestora cu un sistem echivalent de sarcini, fig.3.22, aplicate direct pe structură, în scopul evitării folosirii suplimentare a unor elemente finite de tip bară cu rigiditate ridicată.

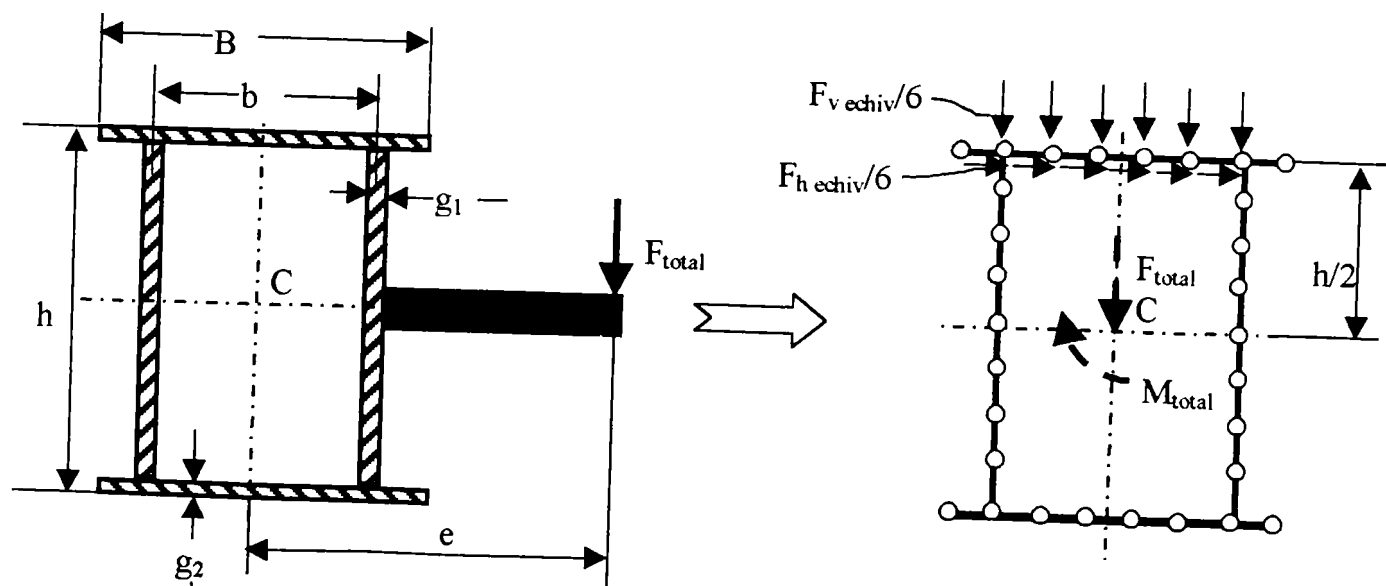


Fig.3.22 Schema echivalentă de încărcare pentru sarcinile aplicate excentric

Forțele echivalente verticale $F_{v \text{ echiv}}$ și orizontale $F_{h \text{ echiv}}$ se aplică celor șase noduri plasate la nivelul suprafeței superioare a secțiunii transversale a structurii, în dreptul zonei de aplicare a acestora. Aceste forțe echivalente reprezintă torsorul de reducere al forței F_{total} , aplicată excentric în centrul de greutate „C” al secțiunii transversale, distribuit în nodurile plasate excentric. Forța echivalentă orizontală se calculează cu relația (3.1).

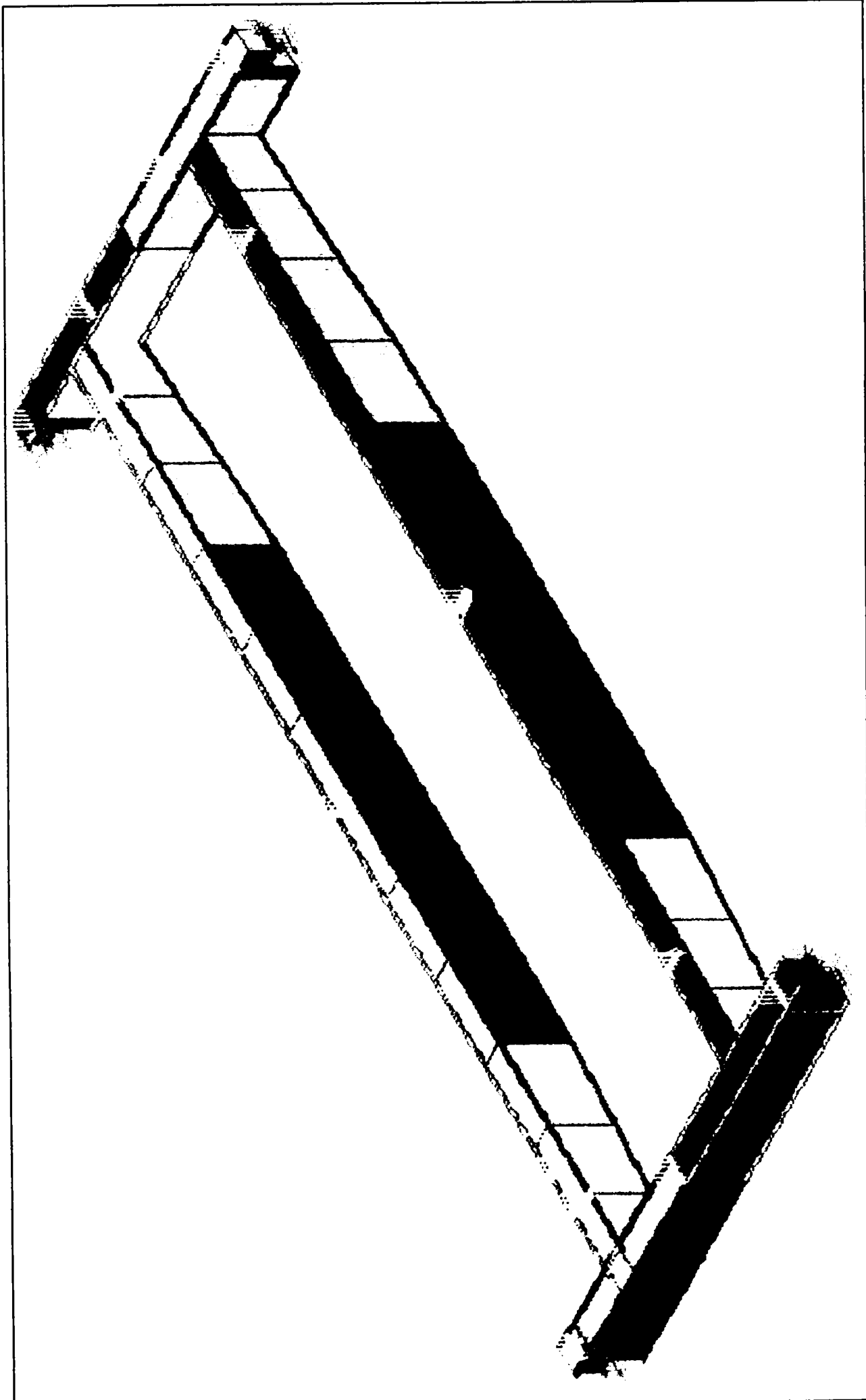


Fig. 3.23 Modelul de calcul al structurii de rezistență a podului rulant de 100 kN – 17,3 m

$$F_{\text{echiv}} = \frac{F_{\text{total}} \cdot e}{\frac{h}{2}} \quad (3.1)$$

Modelarea matematică a comportării structurii de rezistență a podului rulant s-a realizat prin intermediul secvențelor proprii programului de calcul COSMOS/M, [129], care a permis determinarea tensiunilor echivalente conform teoriei energiei specifice modificatoare de formă, a tensiunilor normale principale și a celor tangențiale, calculul fiind condus sub formă matriceală.

Pe baza datelor anterior prezentate s-a elaborat modelul de calcul al structurii de rezistență a podului rulant cu capacitatea de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m prezentat în fig.3.23.

Acest model de calcul a permis efectuarea unui studiu complet asupra stării de tensiune și deformație din structura de rezistență a podului rulant analizat cu evidențierea detaliată a aspectelor legate de fenomenul de concentrare al tensiunilor și al distribuției acestora, aspecte ce vor fi prezentate în paragraful 3.3.4.

3.3.4. Rezultate obținute în urma analizei structurii de rezistență cu elemente finite SHELL 3

Influența modului de schematizare al comportării structurii de rezistență a podului rulant cu capacitatea de ridicare de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m, sub încărcările din exploatare, asupra rezultatelor calculului de proiectare a fost relevată prin determinarea prin calcul spațial al tensiunilor și deformațiilor.

Acest calcul s-a realizat pe baza analizei cu elemente finite de tip placă subțire și a permis determinarea tensiunilor și deformațiilor din nodurile structurii discretizate și din centrele de greutate ale elementelor finite, atât tensiune cât și deplasările fiind studiate în sistemul global de axe.

Din analiza fișierelor cu rezultate, obținut în urma calculului spațial condus cu programul de calcul COSMOS/M, versiunea 2.5, au fost selectate valorile considerate semnificative pentru tensiuni și deformații, anexa A.4b, care generează zonele critice în structura de rezistență a utilajului.

Având în vedere că podul rulant este realizat din OL 37, analiza stării de tensiune se face în mod eficient aplicând teoria energiei specifice modificatoare de formă (von Mises) ca factor determinant în atingerea stărilor limită.

În fig. 3.24 este reprezentat câmpul de distribuție al tensiunii echivalente calculată conform teoriei energiei specifice modificatoare de formă la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant. Se observă că valorile extreme ale acestei tensiuni sunt $-168,98 \text{ N/mm}^2$ și $-0,1452 \text{ N/mm}^2$. În scopul evidențierii modului de variație al tensiunilor în zonele critice, în această figură s-a reprezentat graficul de variație al componentelor studiate pentru câte 20 de noduri succesive. Abscisa s-a considerat în coordonate parametrice, valoarea 1 reprezentând lungimea totală măsurată între primul și ultimul nod pentru care s-a făcut reprezentarea grafică. Analizând variația tensiunii echivalente la mijlocul deschiderii structurii de rezistență, în lonjeronul I, se observă că se înregistrează valori maxime la nivelul muchiei superioare a acestuia, fig.3.25 și fig.3.26 În vederea evidențierii acestui aspect, în aceste figuri s-a reprezentat variația tensiunii echivalente von Mises,

pentru 6, respectiv 20 de noduri succesive, plasate în zona de la mijlocul lonjeronului I, la nivelul tălpii superioară respectiv într-o zonă ce cuprinde talpa superioară, inima laterală exterioară și talpa inferioară.

O altă zonă critică se remarcă la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I. În această zonă, valoarea tensiunii maxime $\sigma_{\text{von Mises max}}$ este de $182,89 \text{ N/mm}^2$ (tabel 3.3, poziția 7). Acest vârf de tensiune se datorează efectului de concentrare al tensiunilor la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I. Pentru această zonă critică s-au înregistrat trei trasee distincte pentru care s-a reprezentat variația tensiunii echivalente von Mises, fig.3.27, fig.3.28 și fig.3.29.

În fig.3.27 se prezintă variația acestei tensiuni pentru 20 de noduri succesive aparținând zonei critice menționate, traseu ce cuprinde și nodul în care tensiunea echivalentă von Mises are valoare maximă.

În zona de îmbinare dintre lonjeronul I și traversa I, în conformitate cu fig.3.28, tensiunea $\sigma_{\text{von Mises max}}$ este de $133,99 \text{ N/mm}^2$ și se înregistrează la nivelul suprafeței superioare de îmbinare.

O altă valoare extremă a tensiunii echivalente în această zonă se înregistrează la nivelul suprafeței superioare a lonjeronului I cu traversa I, așa cum se arată în fig.3.29, iar valoarea extremă a acestei tensiuni este $87,735 \text{ N/mm}^2$.

Alte valori extreme ale tensiunii echivalente von Mises se înregistrează și în nodul 4856 situat la o extremitate a traversei II, fig.3.30, a cărui coordonate în raport cu sistemul de axe de coordonate sunt $x = 0 \text{ mm}$, $y = 350 \text{ mm}$, $z = 11350 \text{ mm}$. În această figură s-a reprezentat atât câmpul de distribuție al acestei tensiuni a cărei valoare maximă este $168,236 \text{ N/mm}^2$, cât și graficul de variație al tensiunii echivalente pentru 6 noduri succesive, traseu ce cuprinde și nodul 4856.

Analiza modului de solicitare al structurii de rezistență s-a făcut prin reprezentarea variațiilor tuturor componentelor tensorului tensiune în zonele cu valori extreme ale acestora. Reprezentarea s-a făcut considerând maxim 20 de noduri succesive, distanța dintre noduri s-a considerat parametric, iar traseele nodurilor succesive sunt marcate prin prezența unei linii conturate și a unei origini de la care s-a început reprezentarea.

Componentele tensorului tensiune tangențială τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} , au fost prezentate atât la nivelul întregii structuri de rezistență a utilajului analizat, cât și pentru anumite zone critice în care aceste componente înregistrează valori extreme. Reprezentarea spectrului de variație al tensiunii tangențiale τ_{xy} s-a făcut în fig.3.31, pentru componenta τ_{xz} , în fig.3.36 și pentru componenta τ_{yz} , în fig.3.40.

Analizând componentele tensiunii tangențiale τ_{xy} se remarcă valoarea extremă:

$$\tau_{xy} = - 46,996 \text{ N/mm}^2, \text{ în nodul } 1732, (x = 65 \text{ mm}, y = 398 \text{ mm}, z = 280 \text{ mm}), \text{ fig.3.32.}$$

Alte zone critice în care această componentă înregistrează valori extreme sunt prezentate în fig.3.33, fig.3.34, fig.3.35 și anexa A.4a.

În cazul componentei tensiunii tangențiale τ_{xz} se remarcă valoarea extremă:

$\tau_{xz} = - 76,85 \text{ N/mm}^2$ în nodul 2517, ($x = 3595$, $y = 600 \text{ mm}$, $z = 224 \text{ mm}$), plasat la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I, la partea superioară a acesteia, fig.3.37, (tabel 3.3, poziția 7). Alte zone în care sunt situate la o extremitate a traversei II, fig.3.38 respectiv la îmbinarea dintre aceasta și lonjeronul I, fig.3.39.

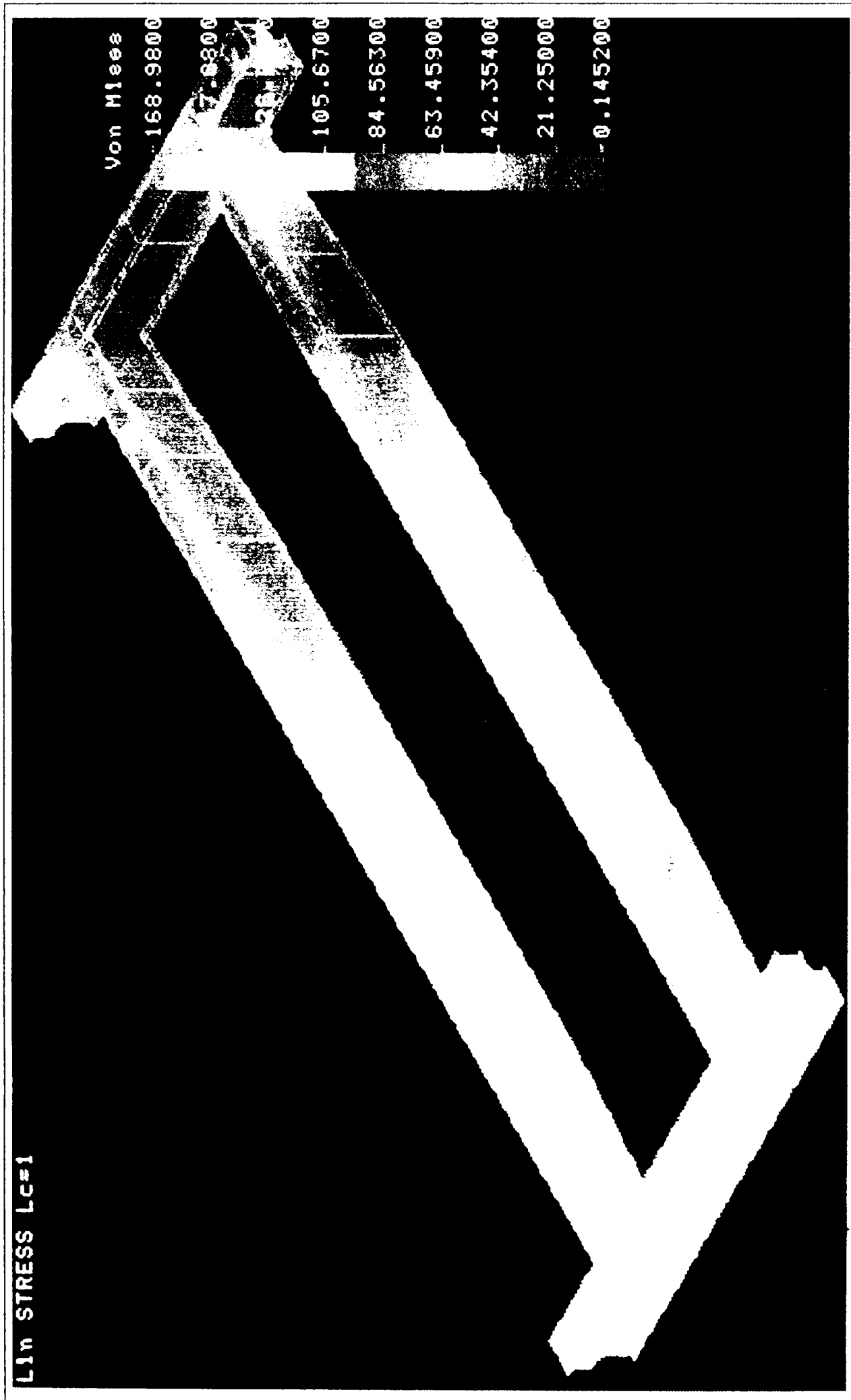


Fig.3.24 Spectrul de variație al tensiunii echivalente calculată conform teoriei energiei specifice modificatoare de formă la nivelul structurii de rezistență a podului rulant

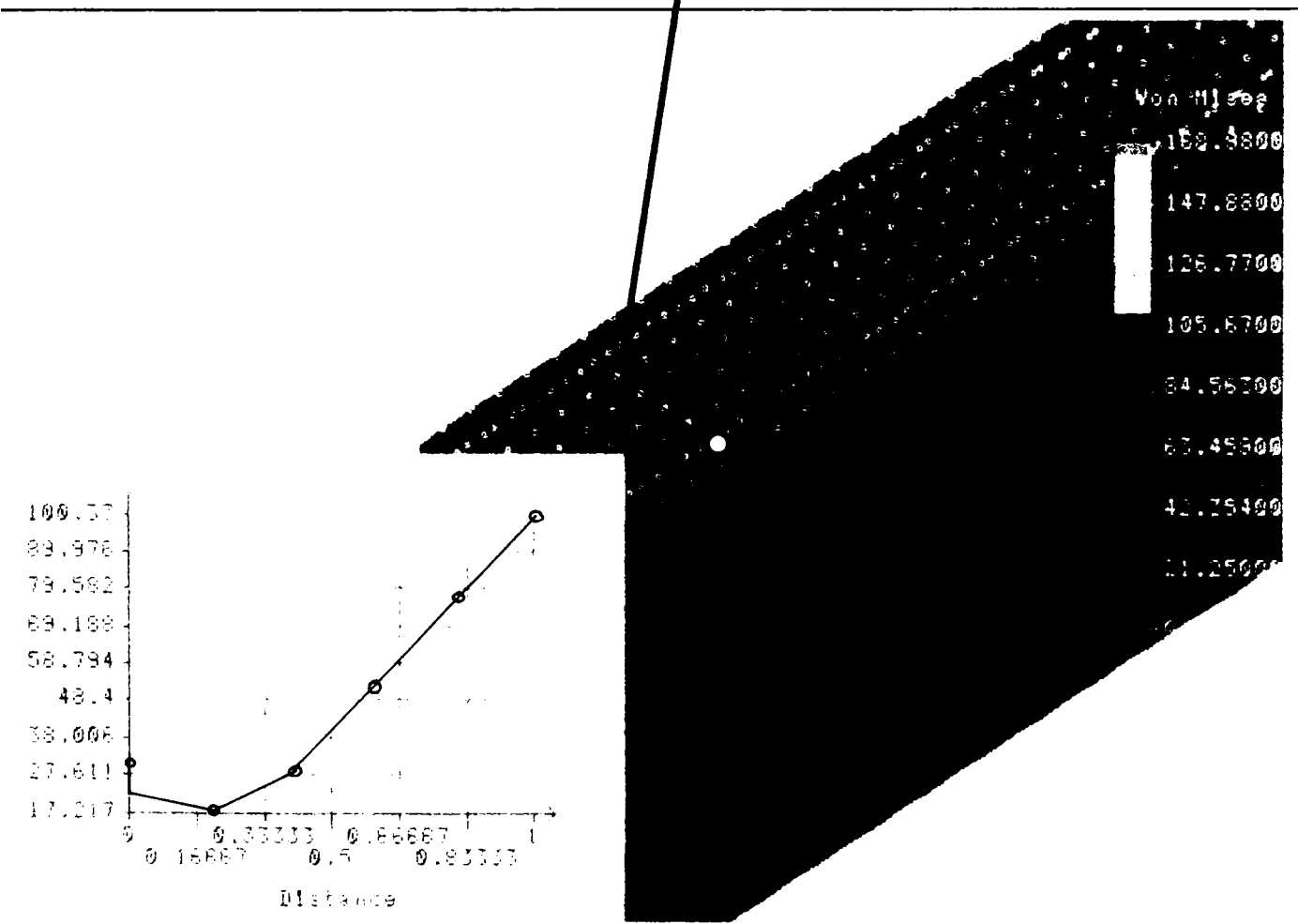
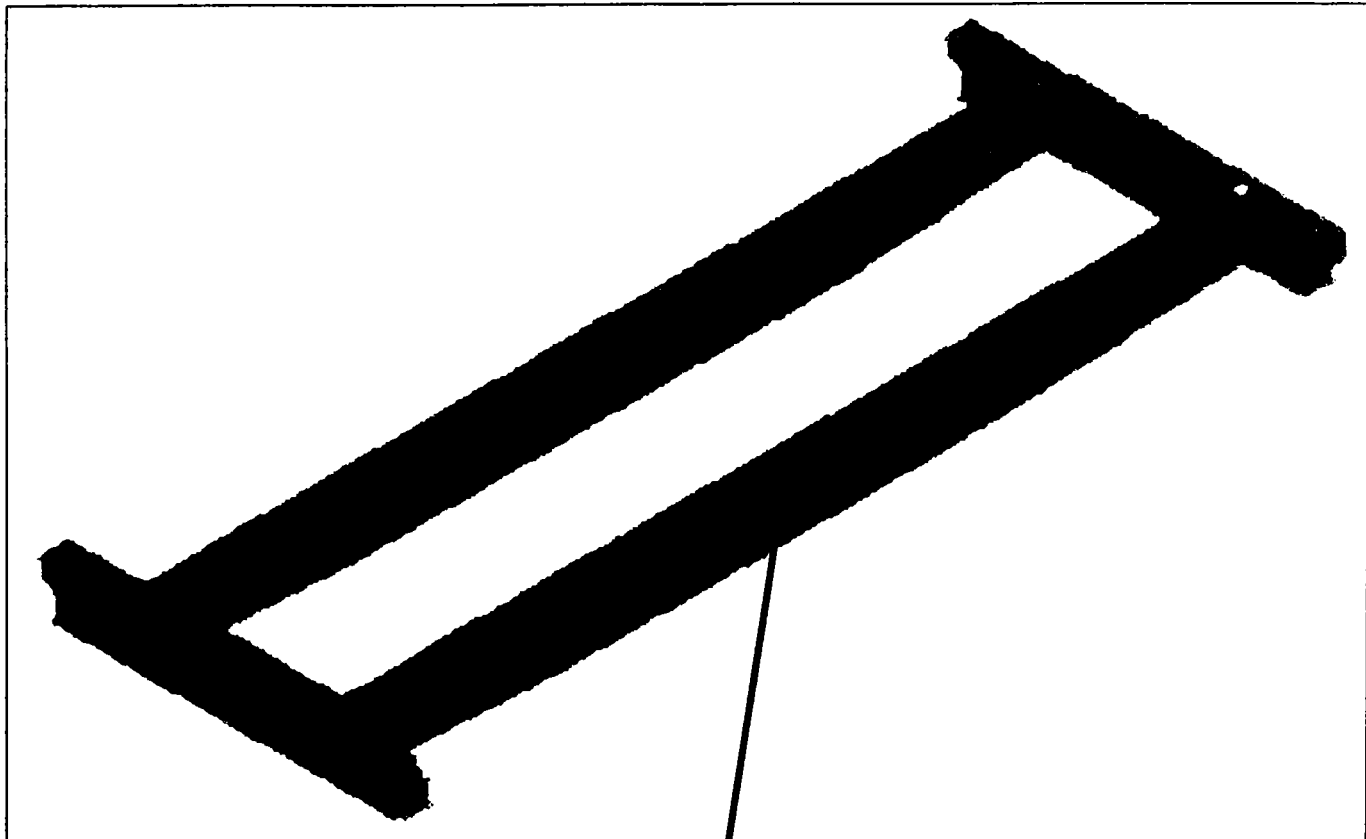


Fig.3.25 Variația tensiunii echivalente von Mises, la nivelul muchiei superioare, la mijlocul deschiderii lonjeronului I

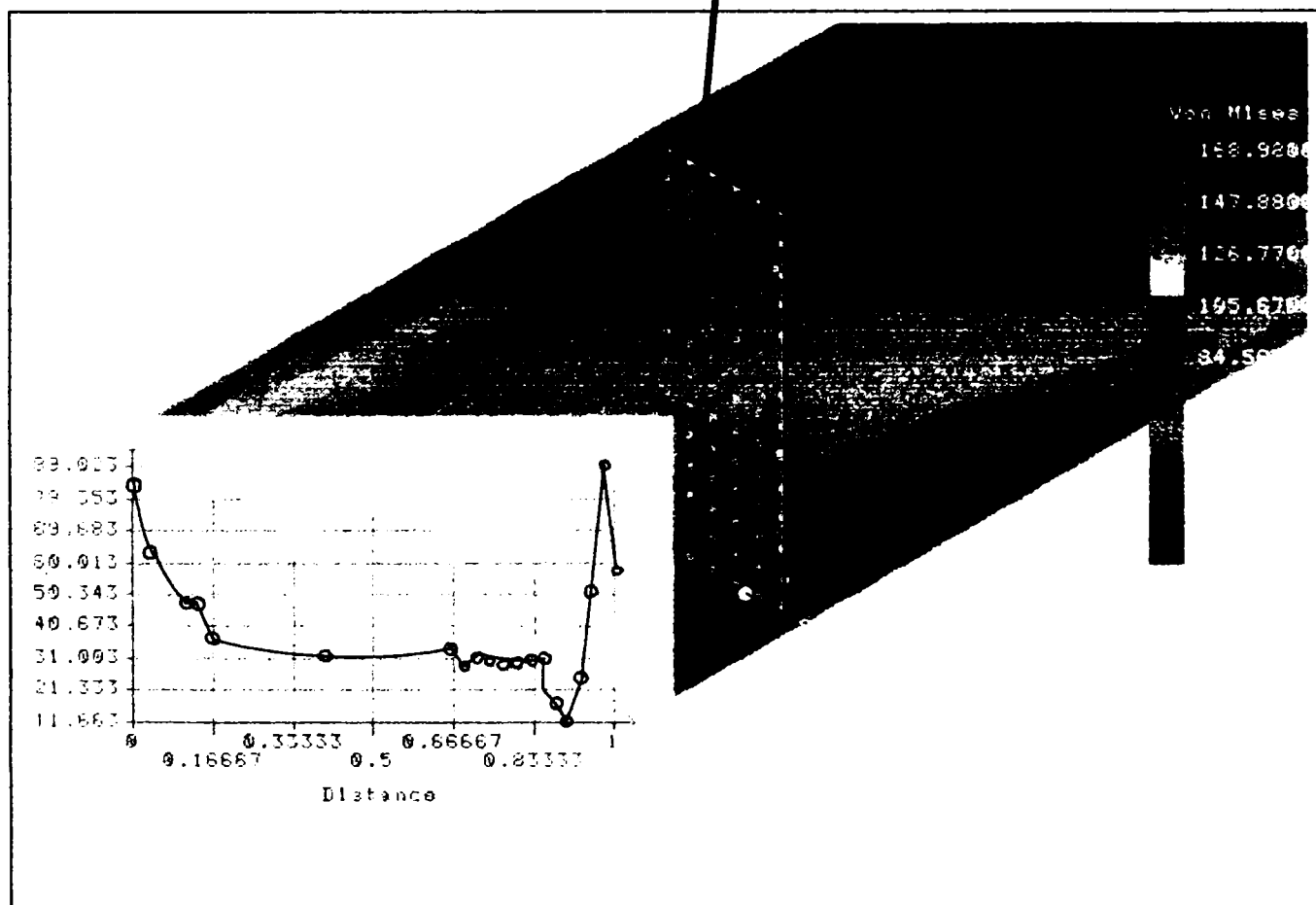
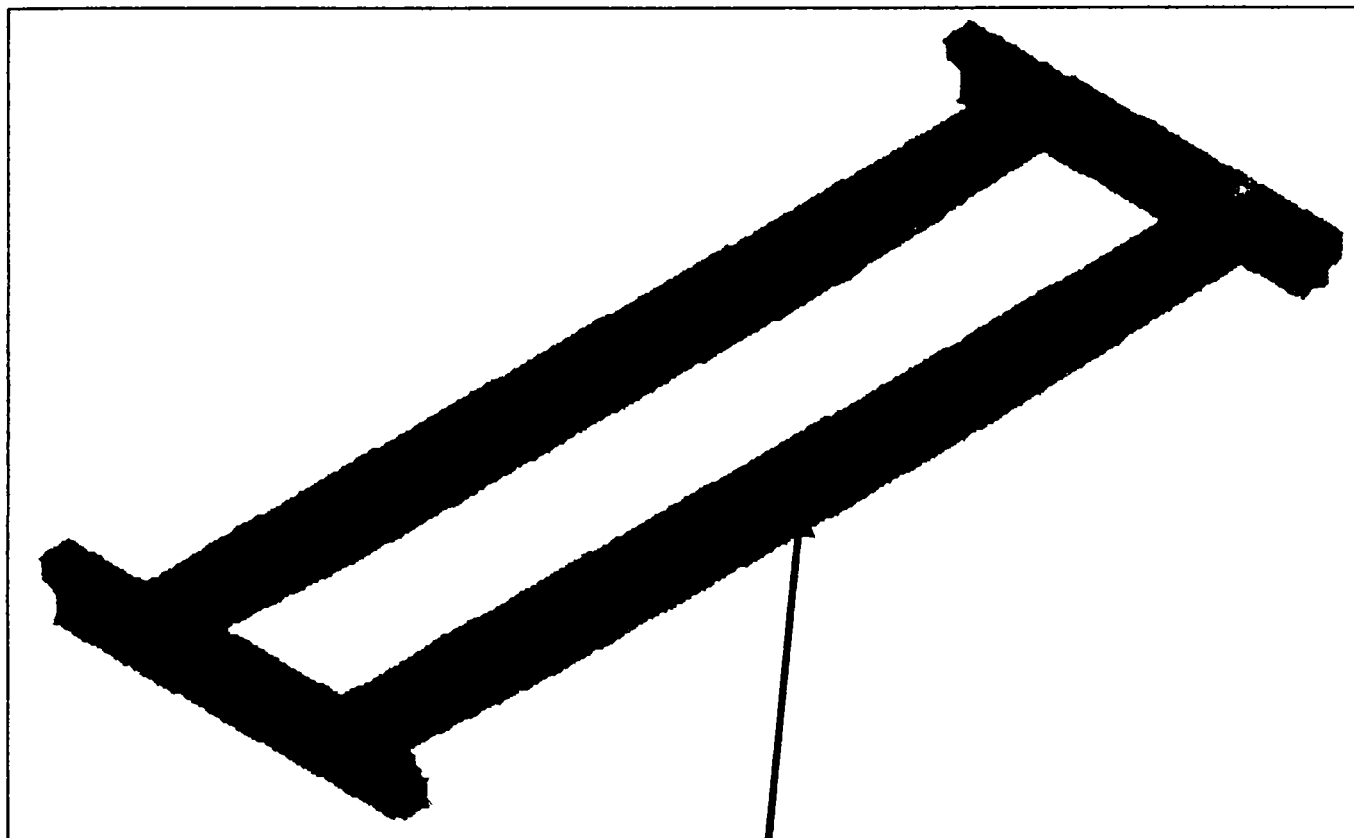


Fig.3.26 Variația tensiunii echivalente von Mises, la nivelul muchiei inferioare, la mijlocul deschiderii lonjeronului I

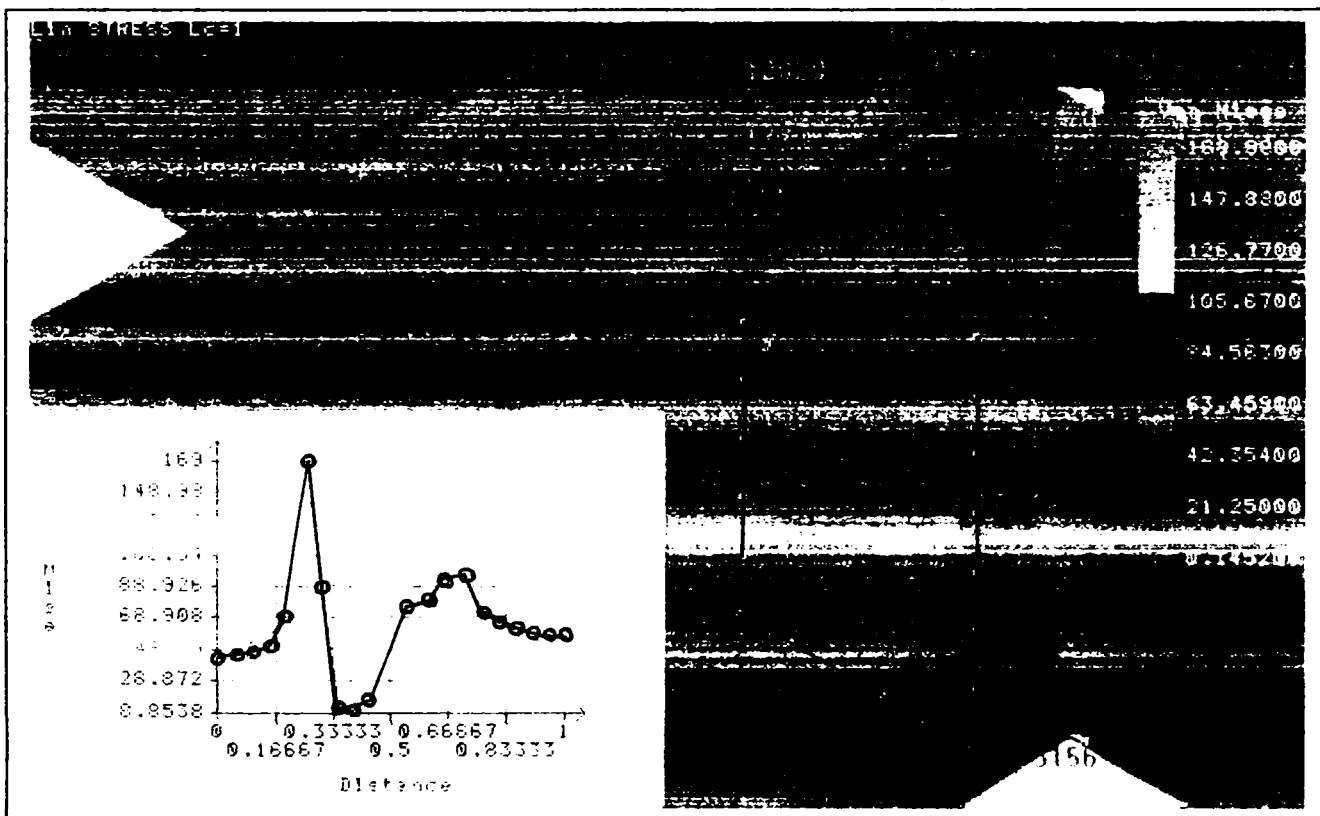
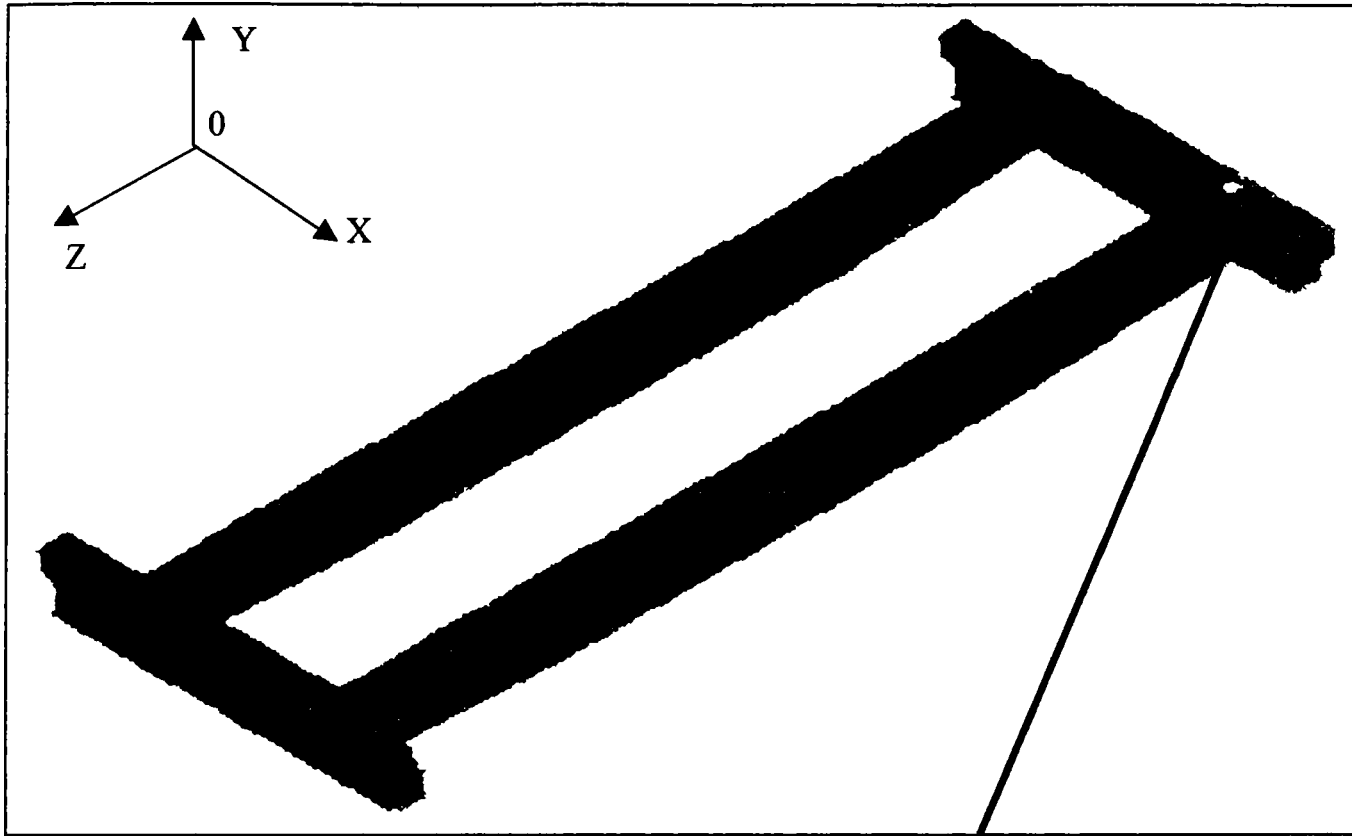


Fig.3.27 Variația tensiunii echivalente von Mises, reprezentată pentru 20 de noduri succesive situate la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I

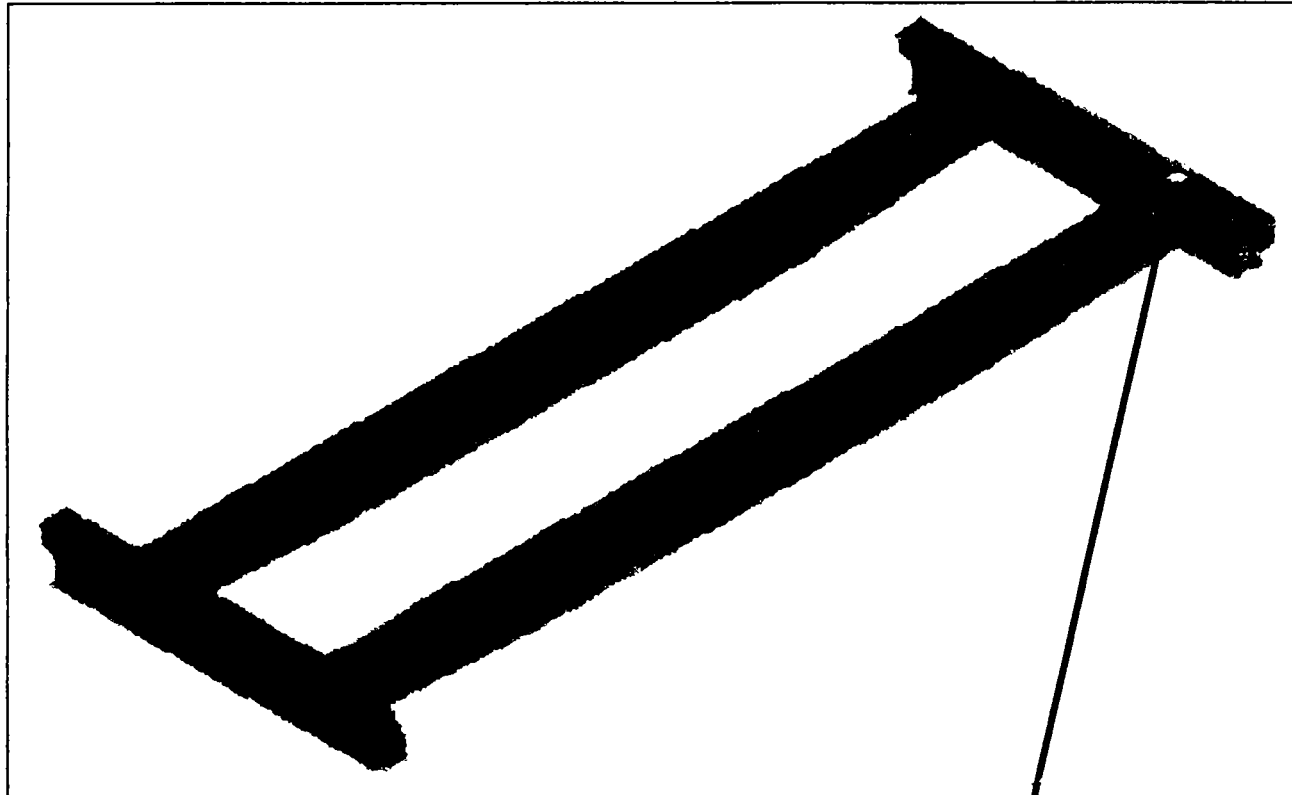


Fig.3.28 Variația tensiunii echivalente von Mises, la nivelul suprafeței superioare, la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I

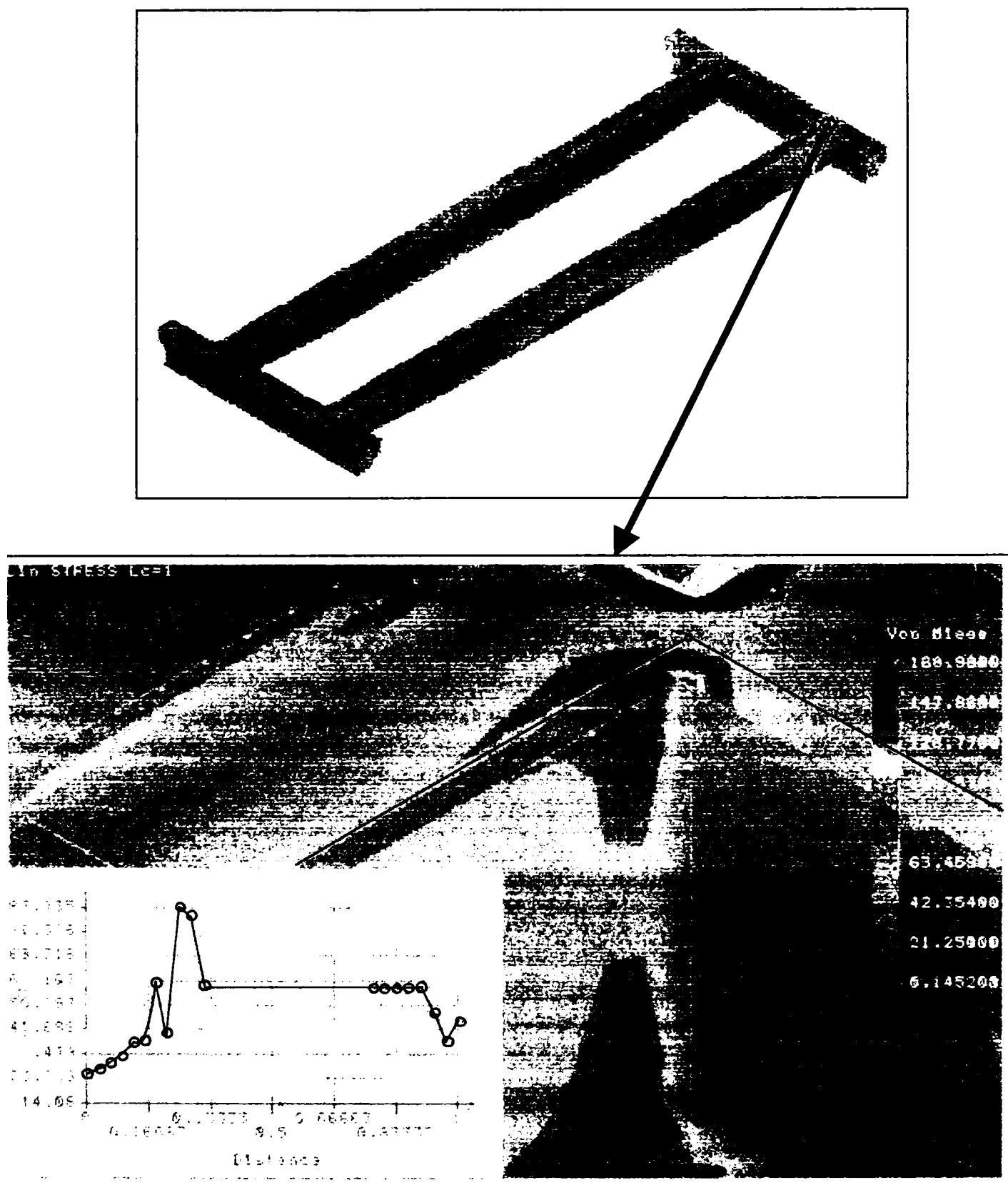


Fig.3.29 Variația tensiunii echivalente von Mises, la nivelul muchiei exterioare, la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I

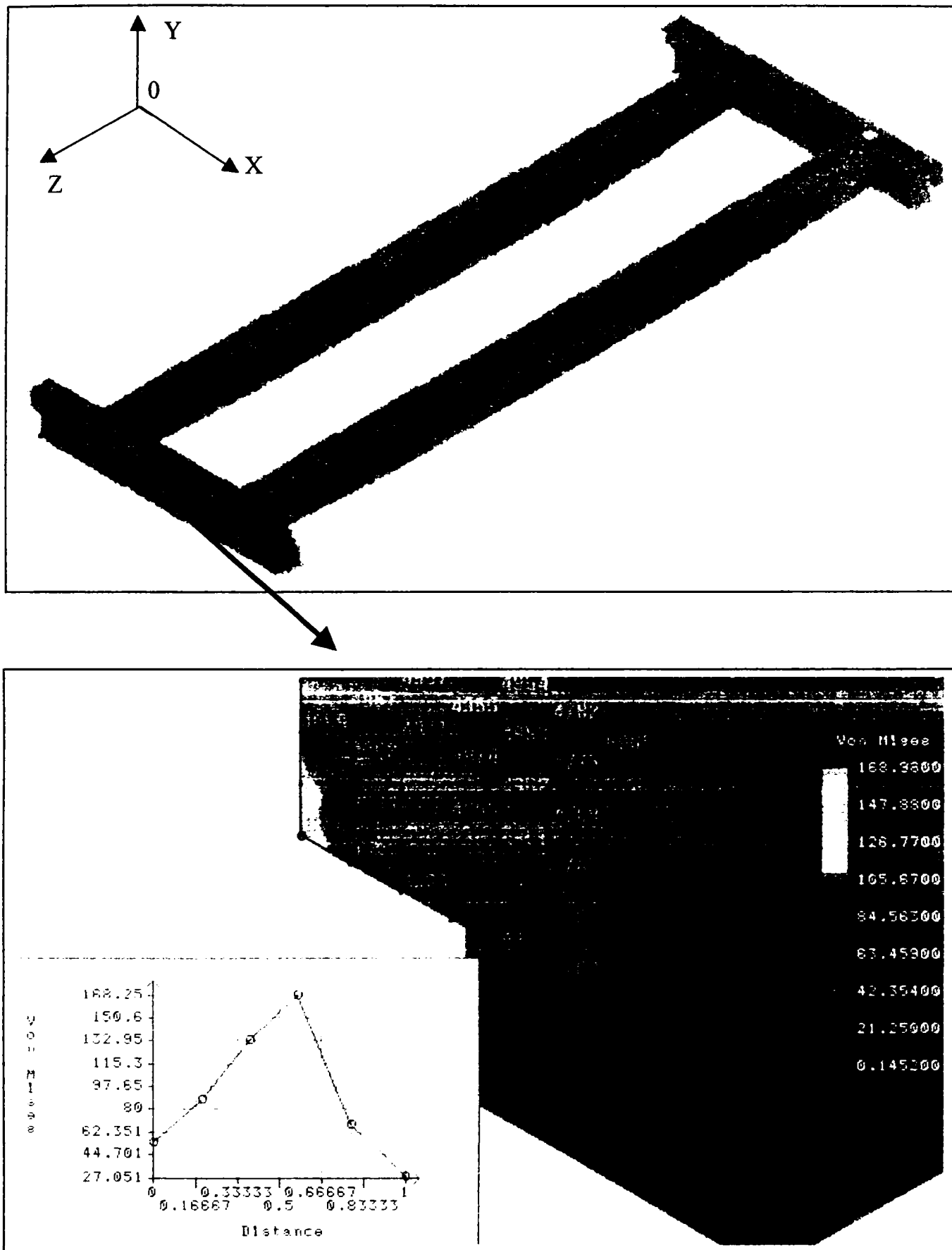


Fig.3.30 Variația tensiunii echivalente von Mises reprezentată pentru șase noduri succesive aparținând traversei II

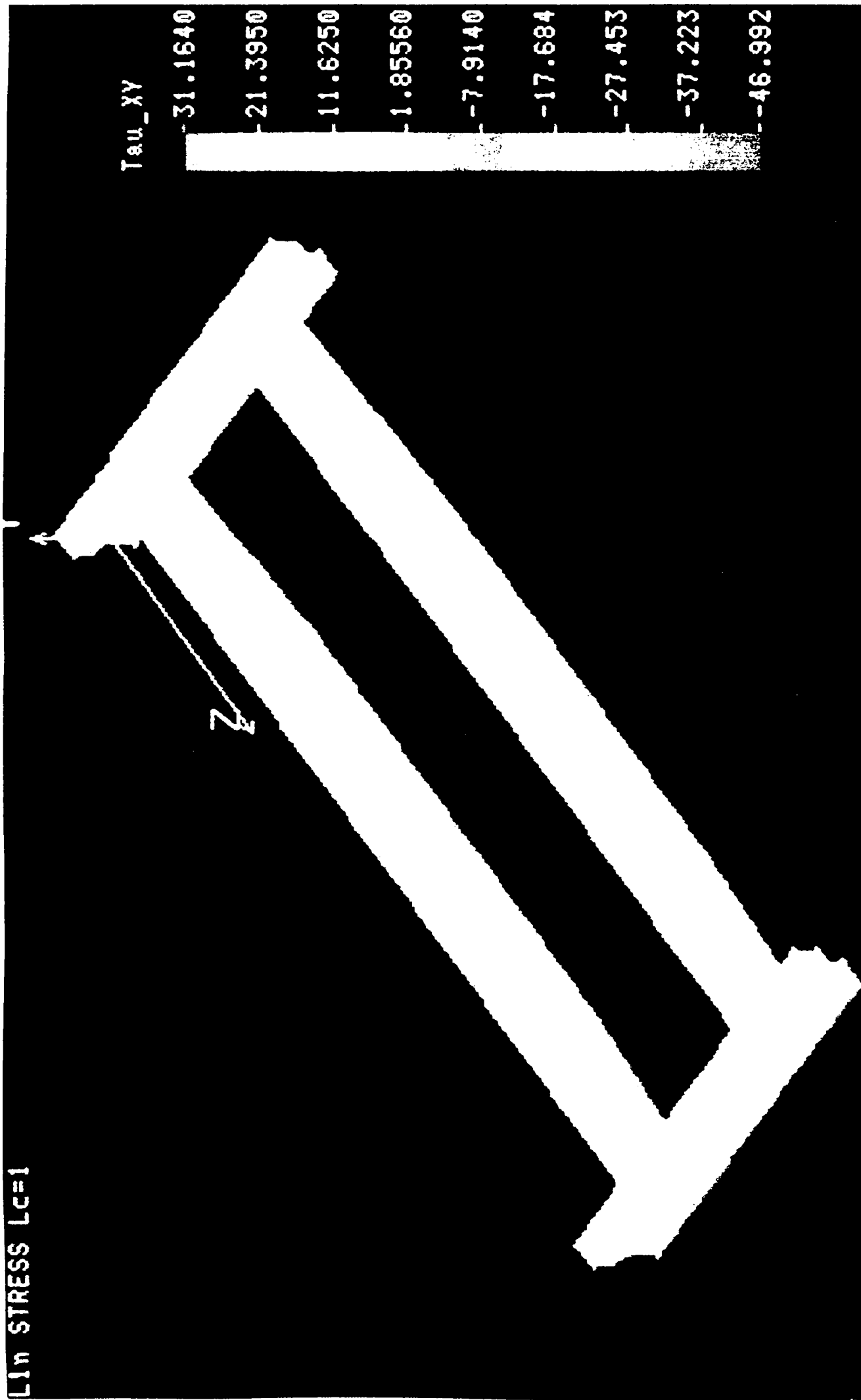


Fig.3.31 Distribuția tensiunii τ_{xy} la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant

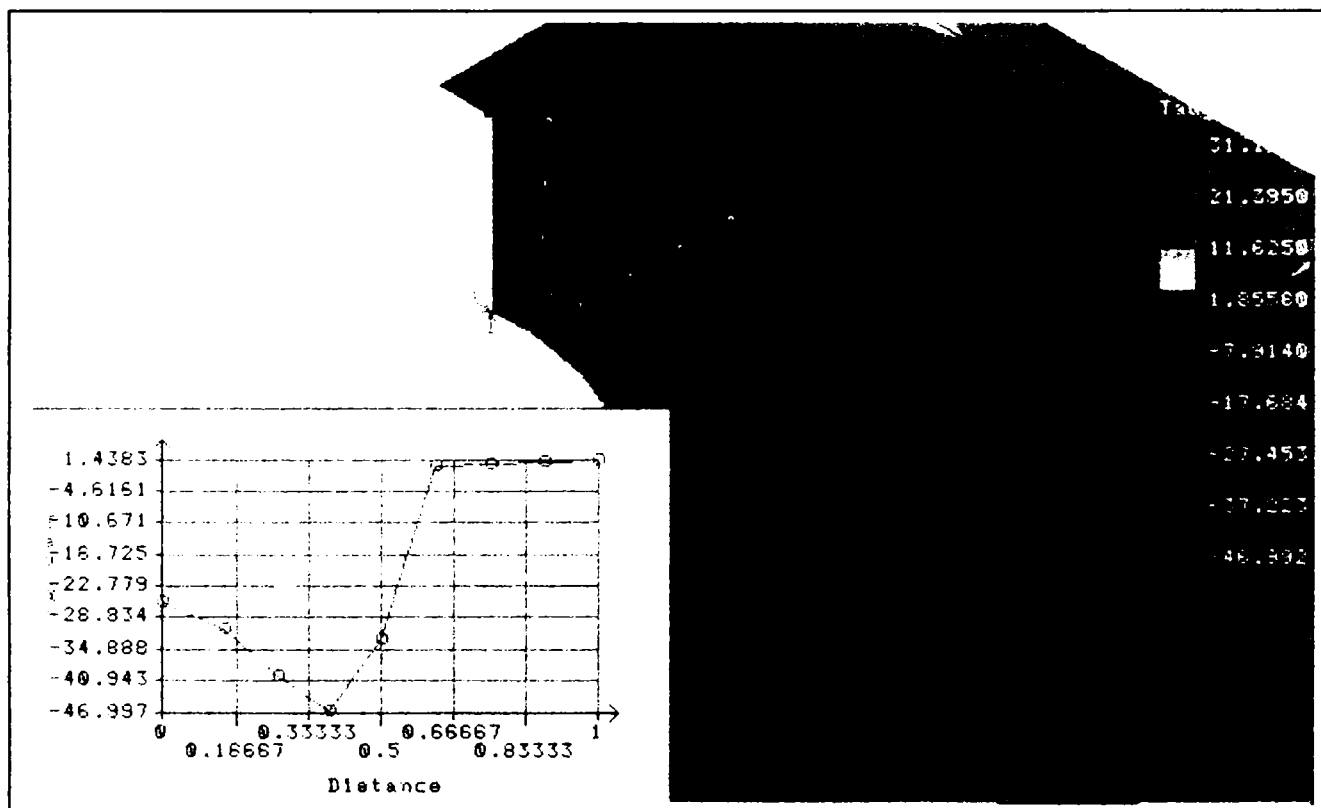
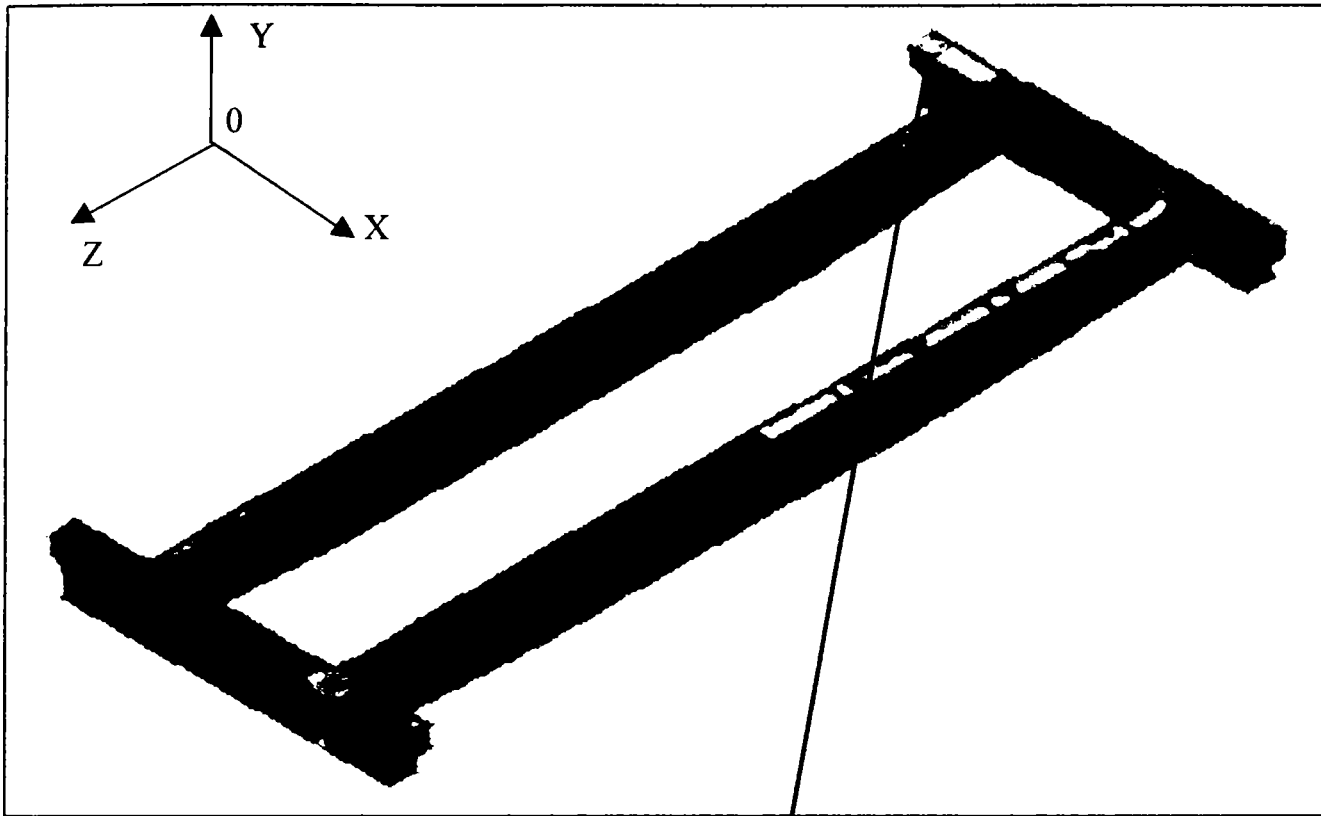


Fig.3.32 Variația tensiunii τ_{xy} pentru o zonă a traversei I în care această componentă are valoare extremă

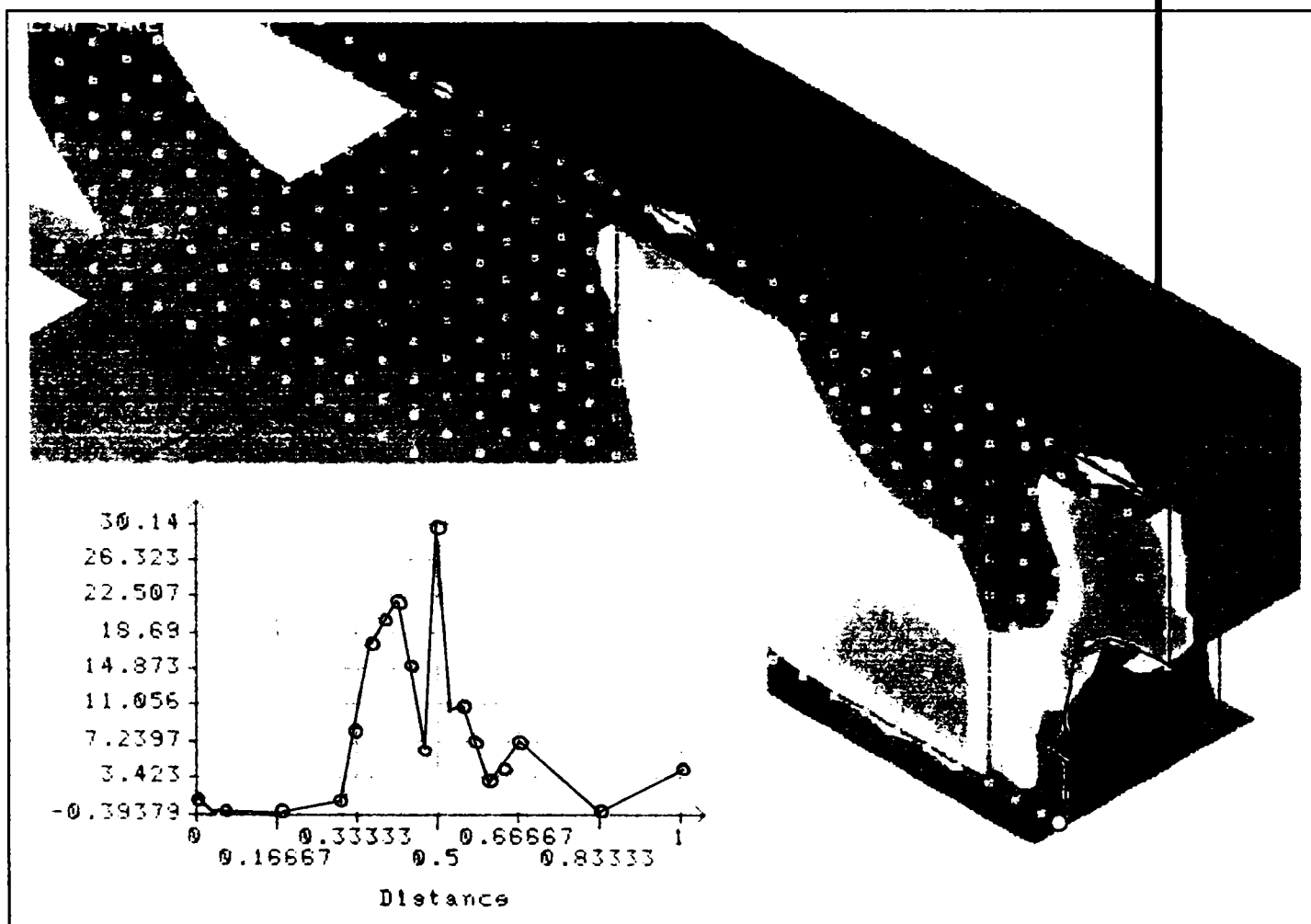
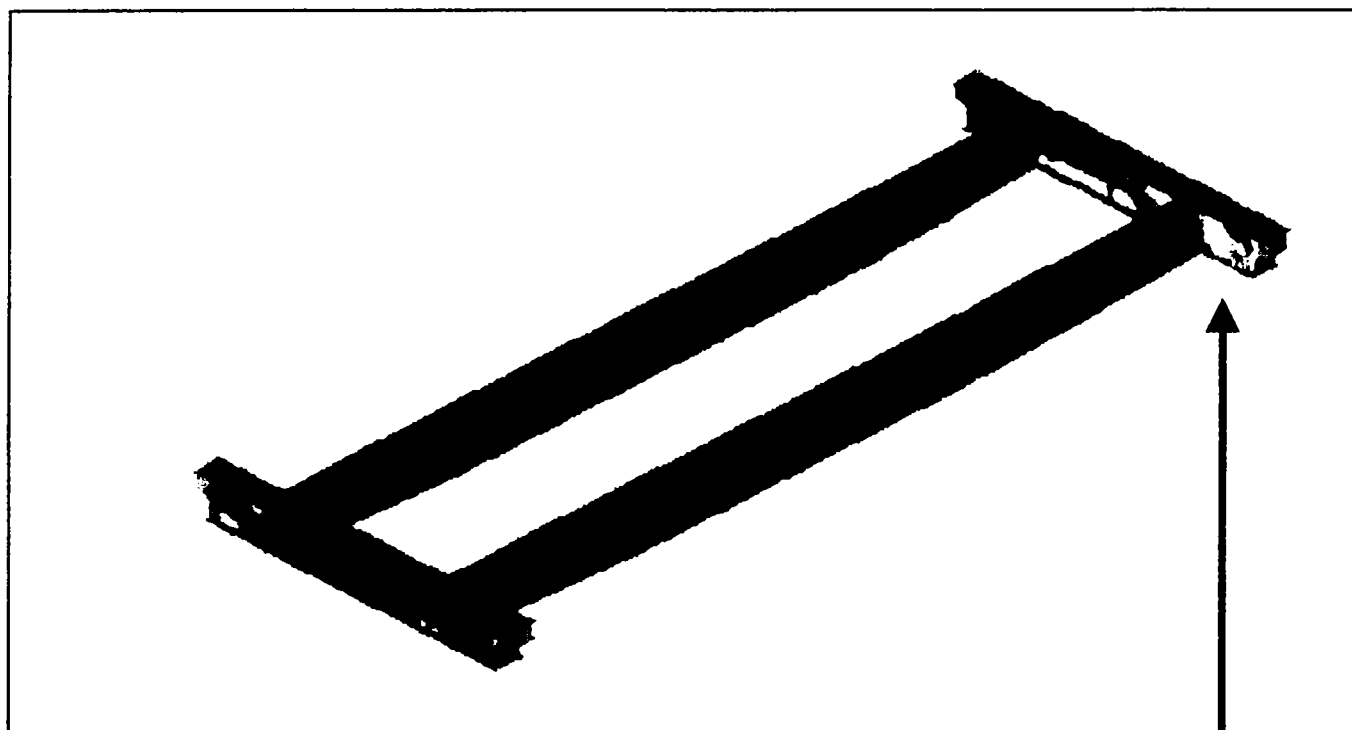


Fig.3.33 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 18 noduri succesive aparținând muchiei exterioare a traversei I

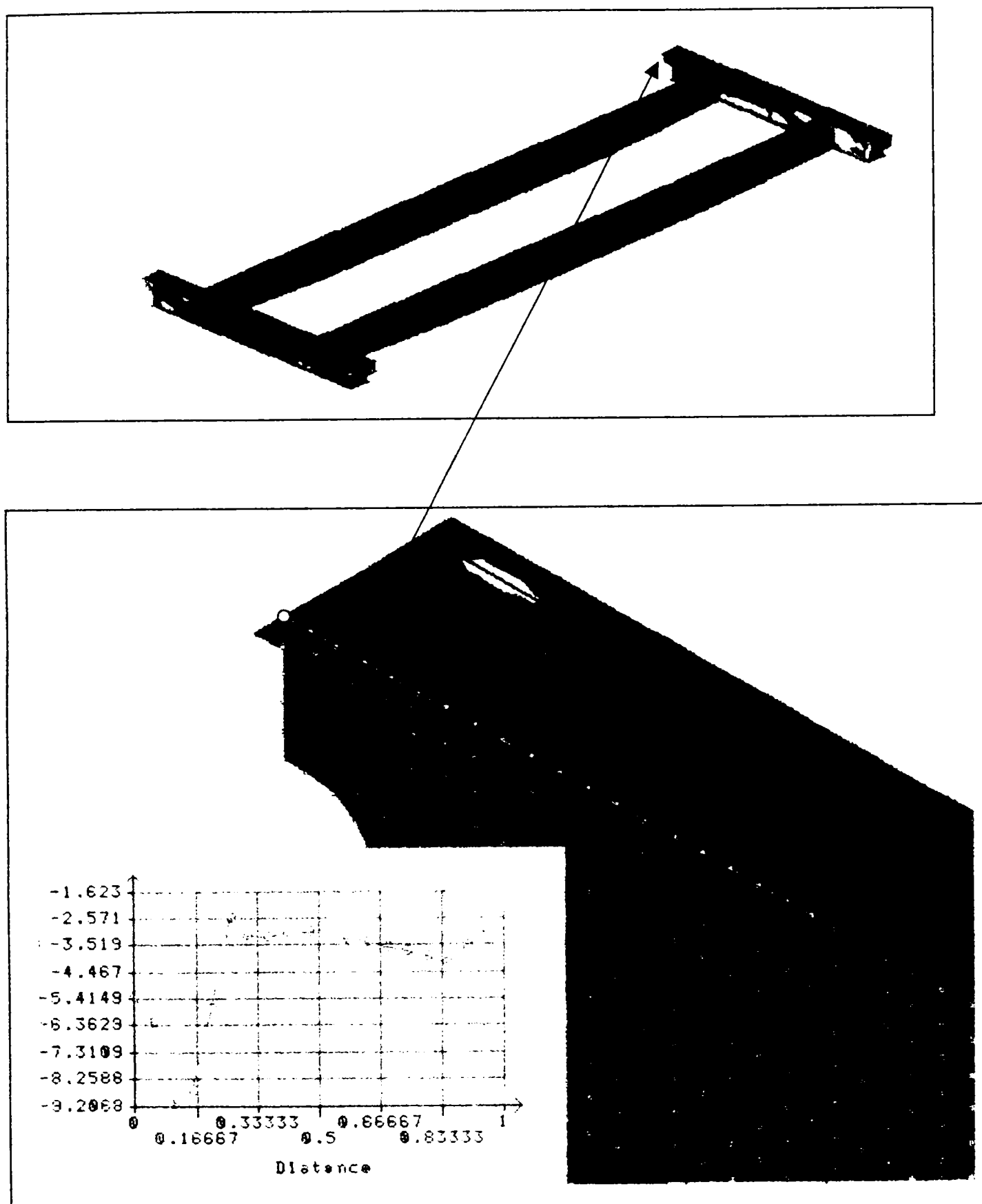


Fig.3.34 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând muchiei exterioare a traversei I

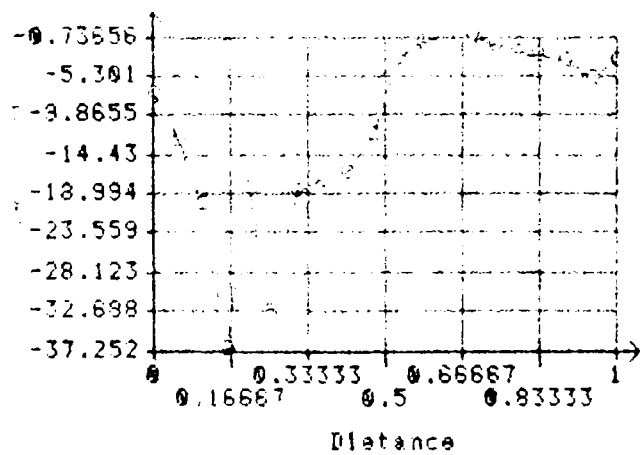
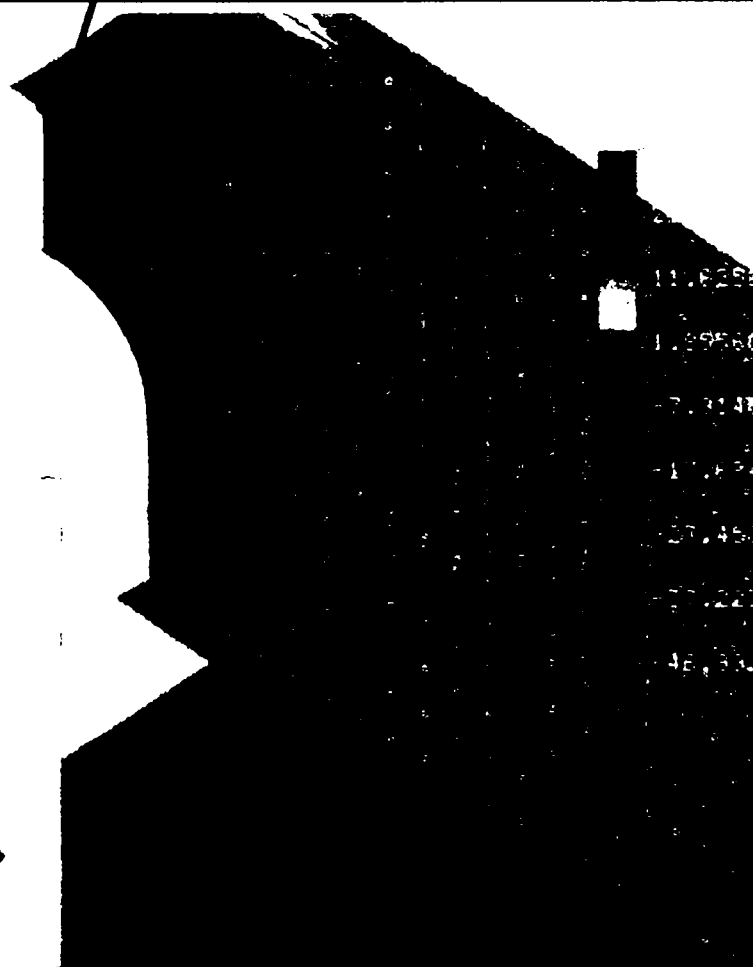
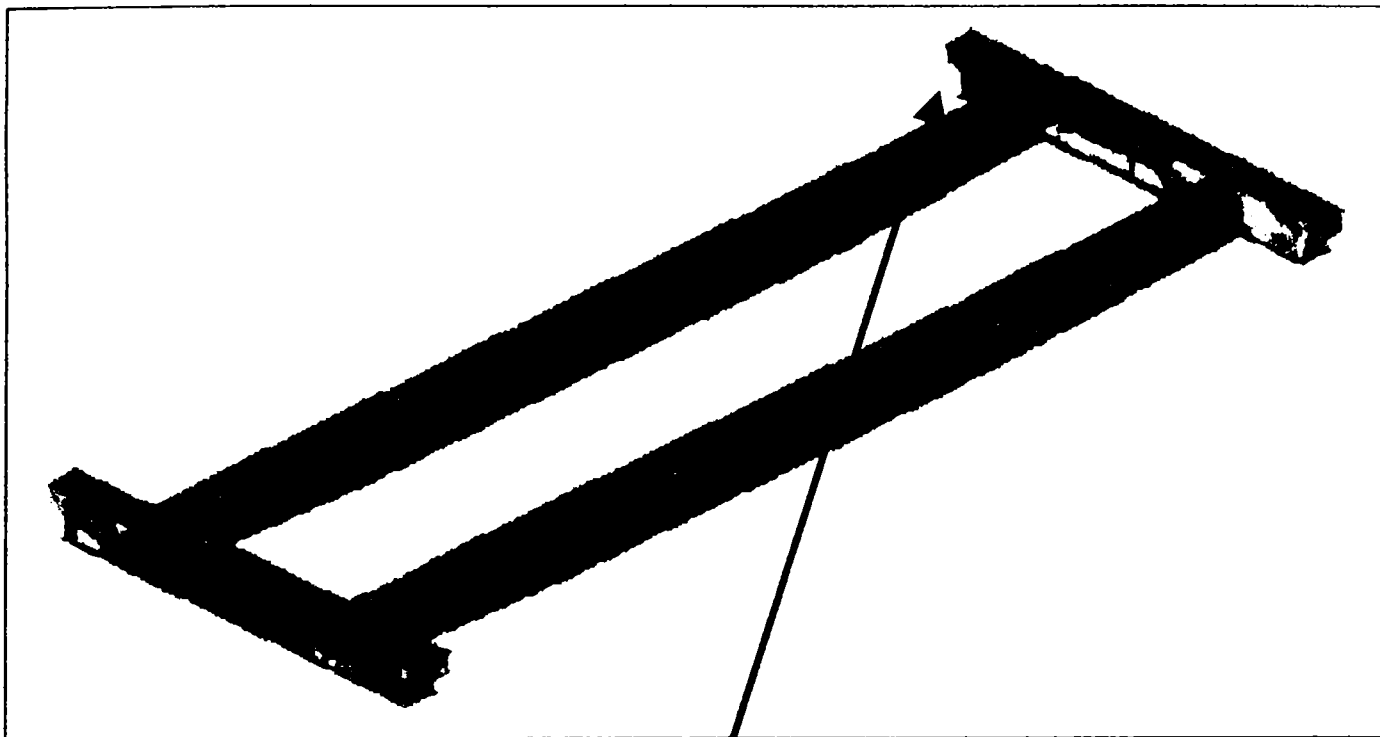


Fig.3.35 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând muchiei extreme a traversei I

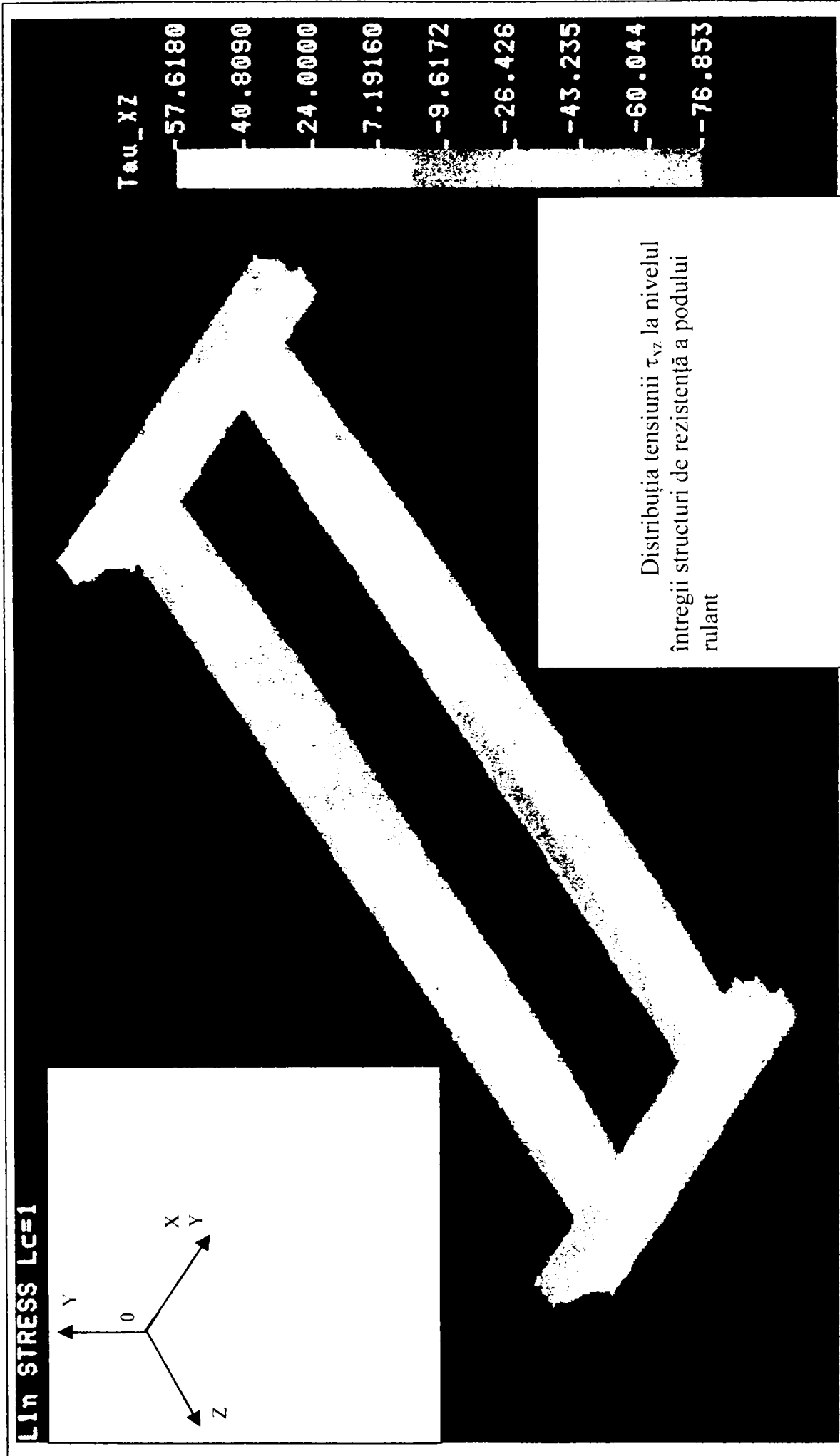


Fig.3.36 Distribuția tensiunii τ_{xz} la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant

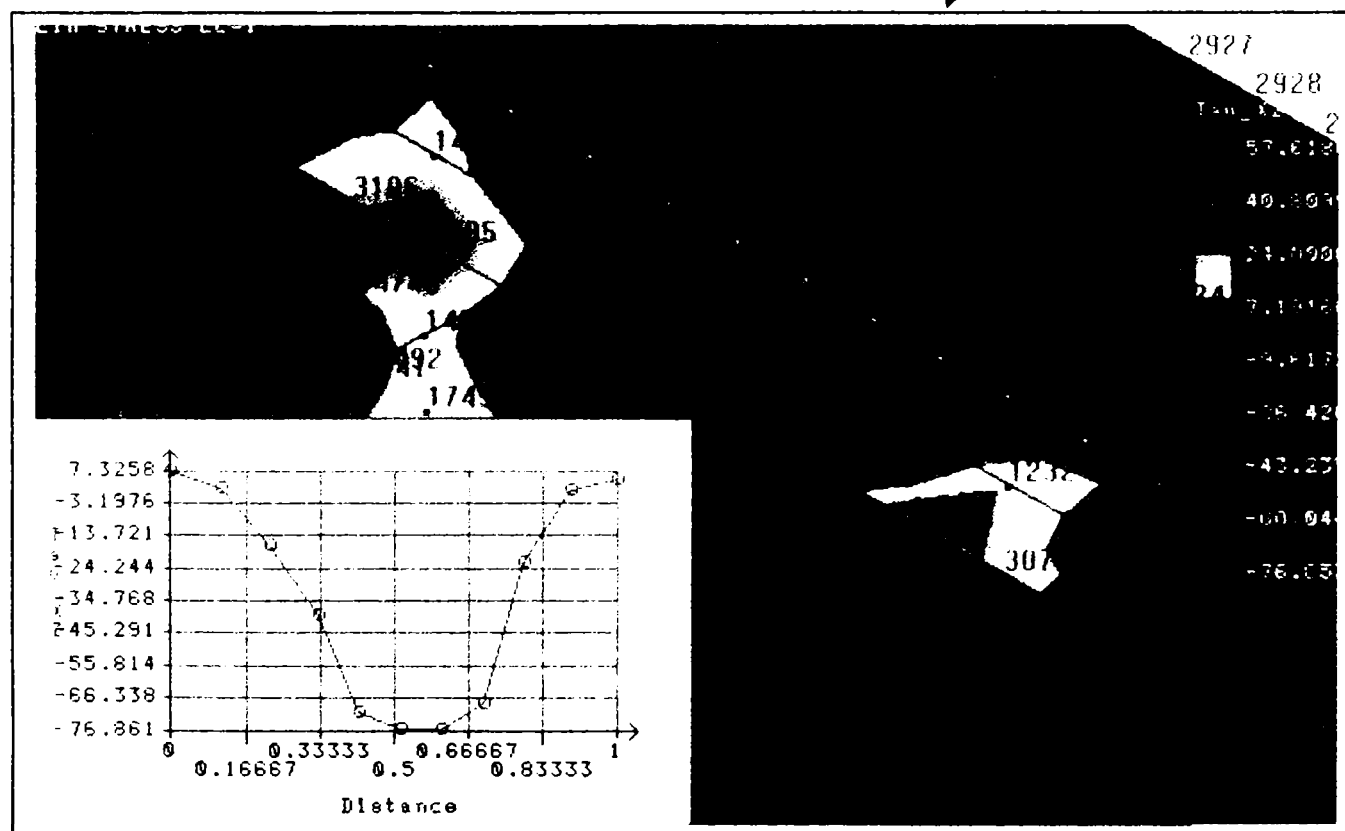
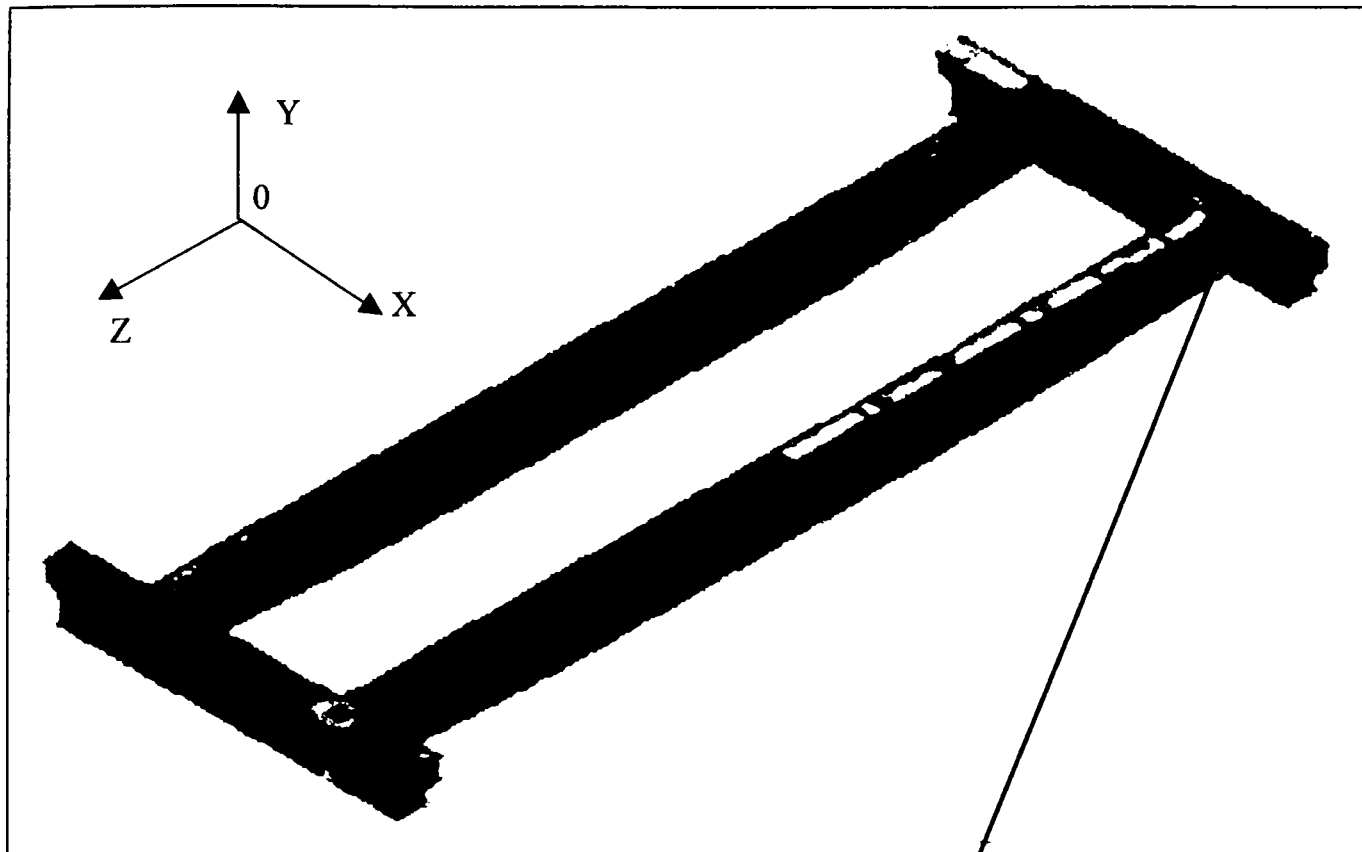


Fig.3.37 Variația tensiunii τ_{xz} pentru o zonă a traversei I în care această componentă are valoare extremă

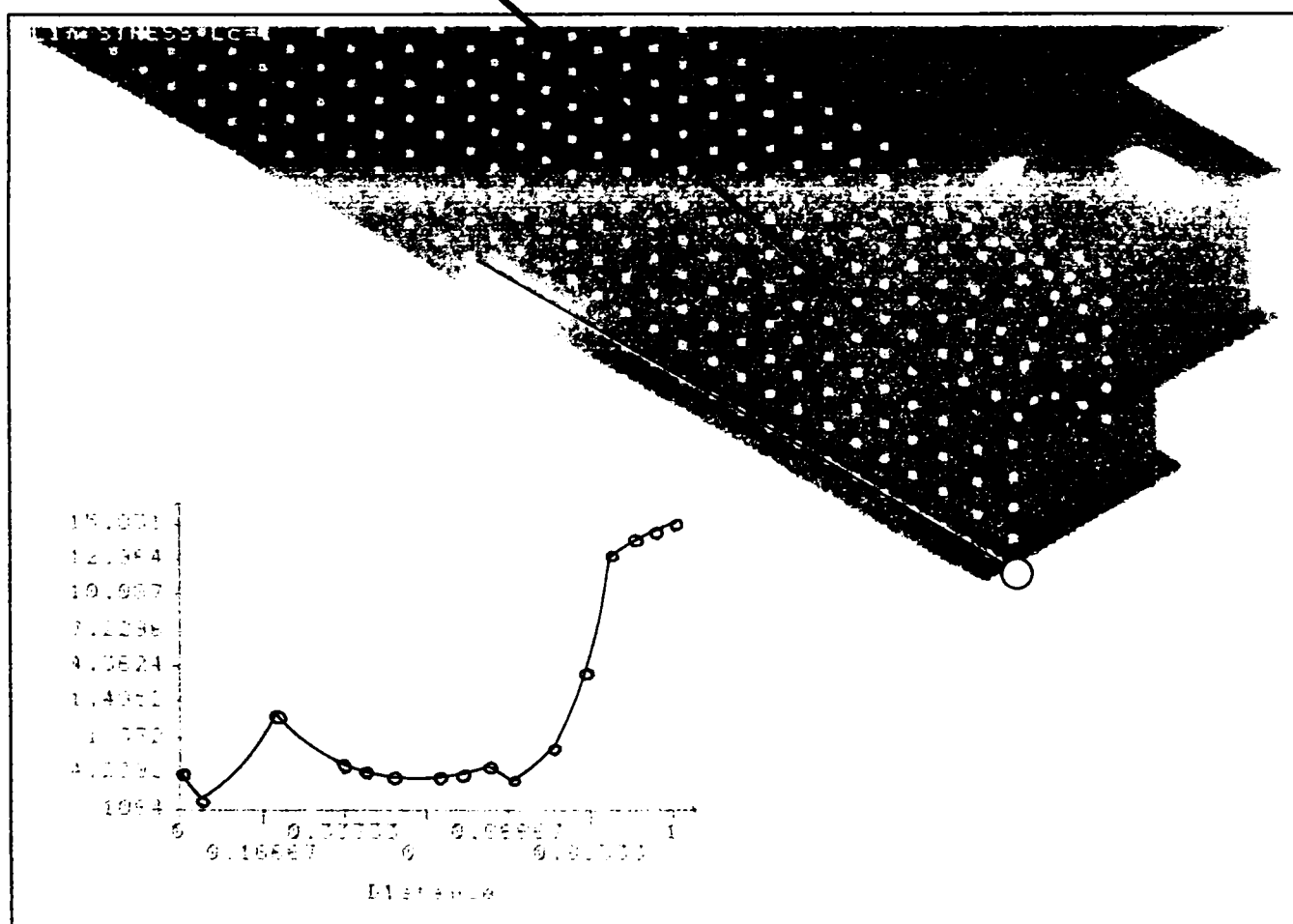
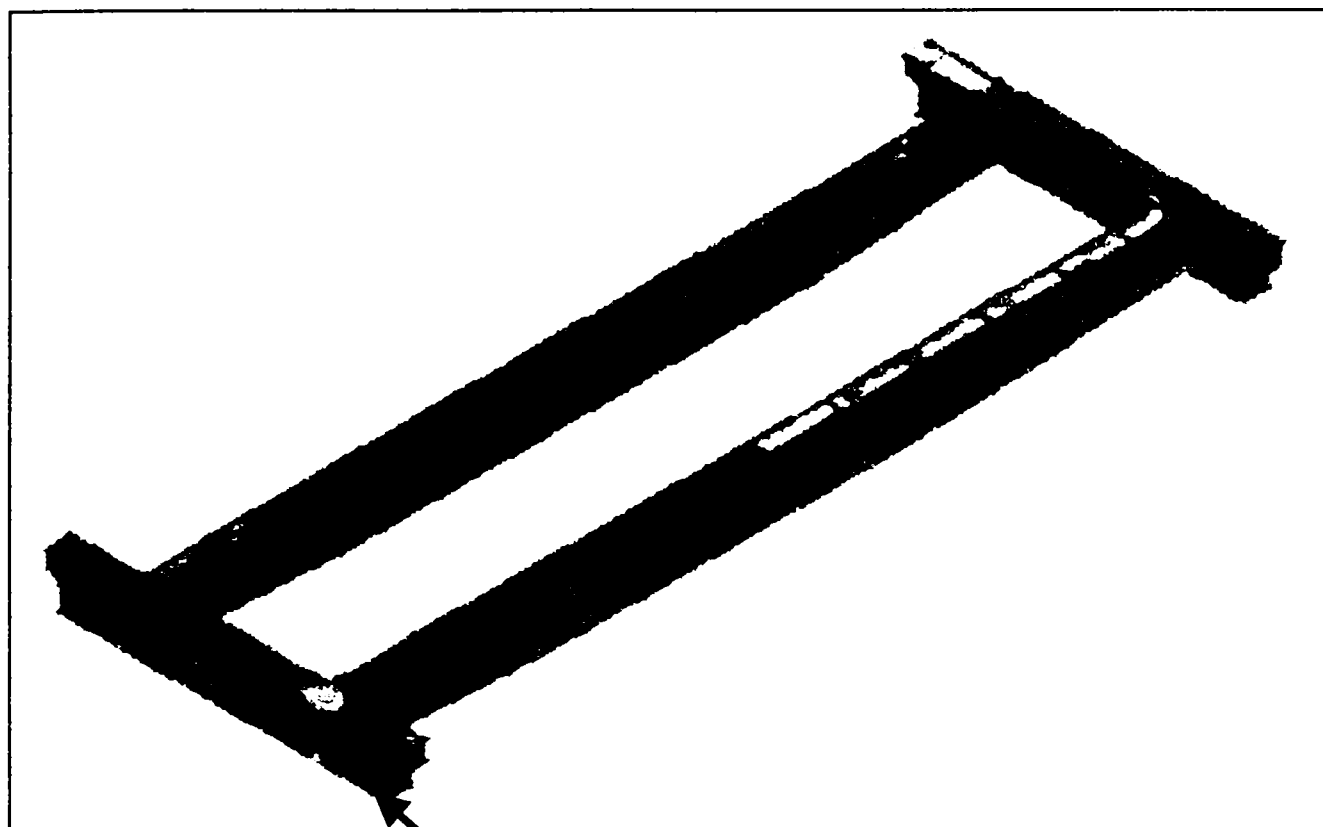


Fig.3.38 Variația tensiunii τ_{xz} pentru 16 noduri succesive aparținând traversei II

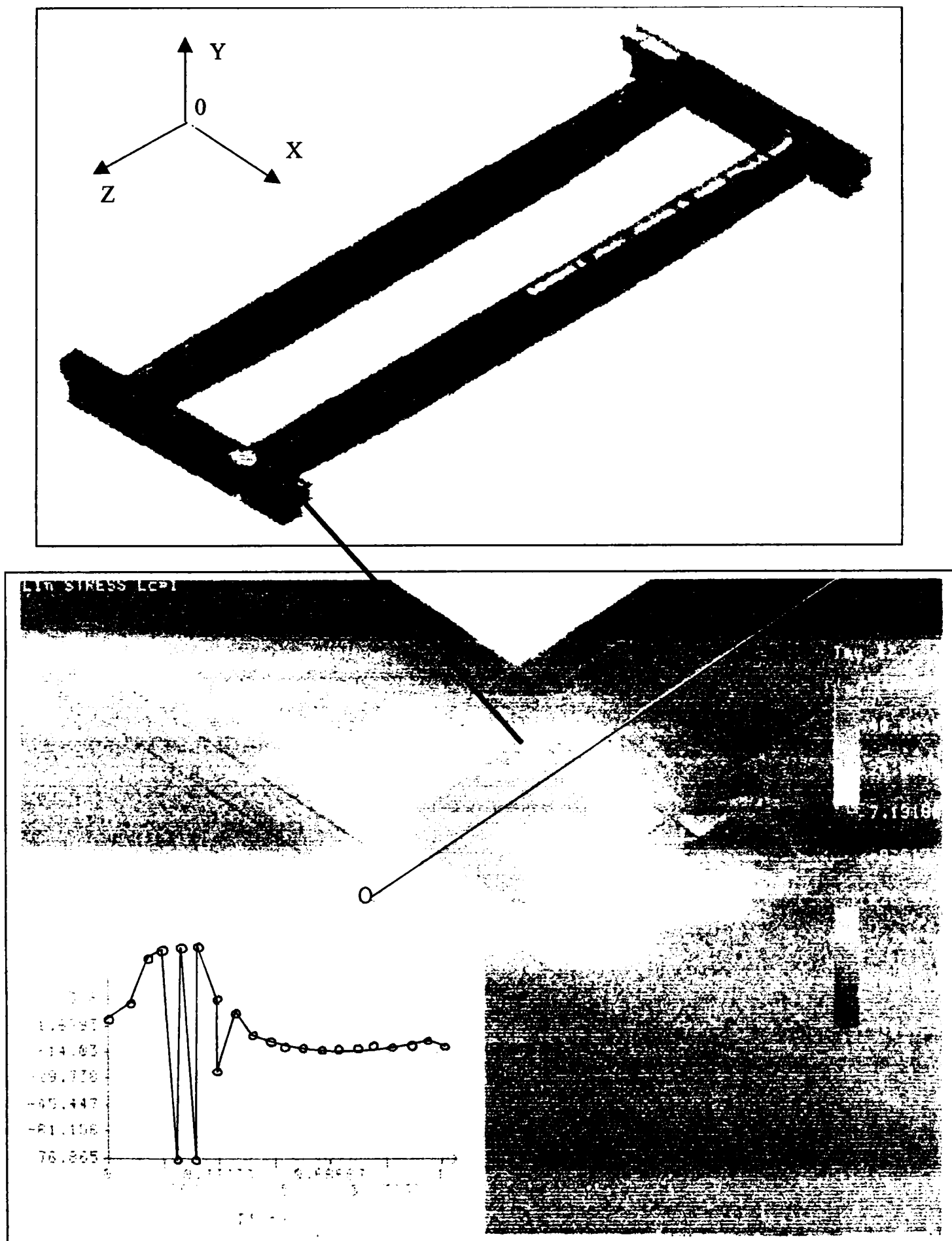


Fig.3.39 Variația tensiunii τ_{xz} la nivelul suprafeței superioare, la îmbinarea dintre traversa II și lonjeronul I

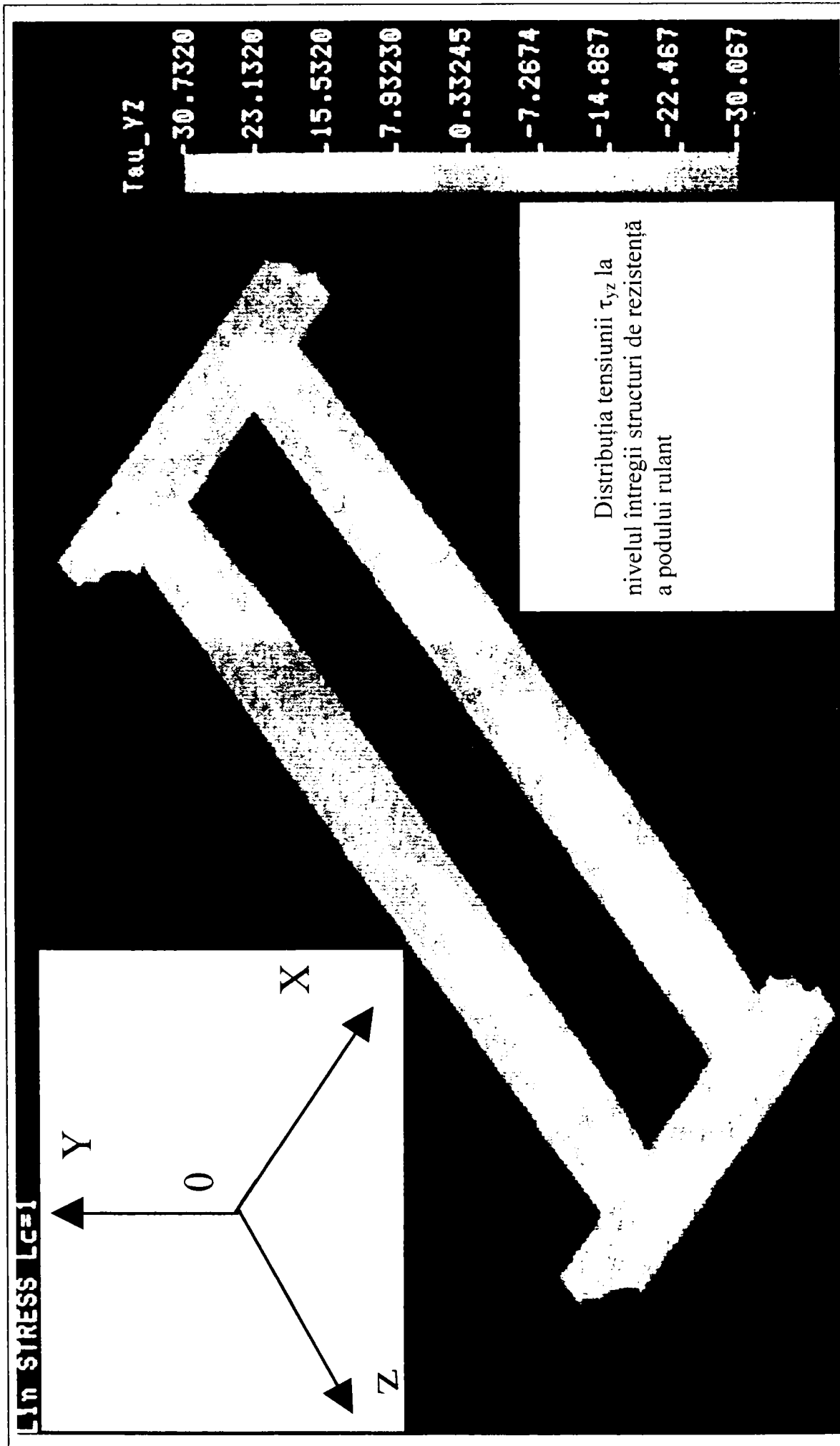


Fig. 3.40 Distribuția tensiunii τ_{yz} la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant

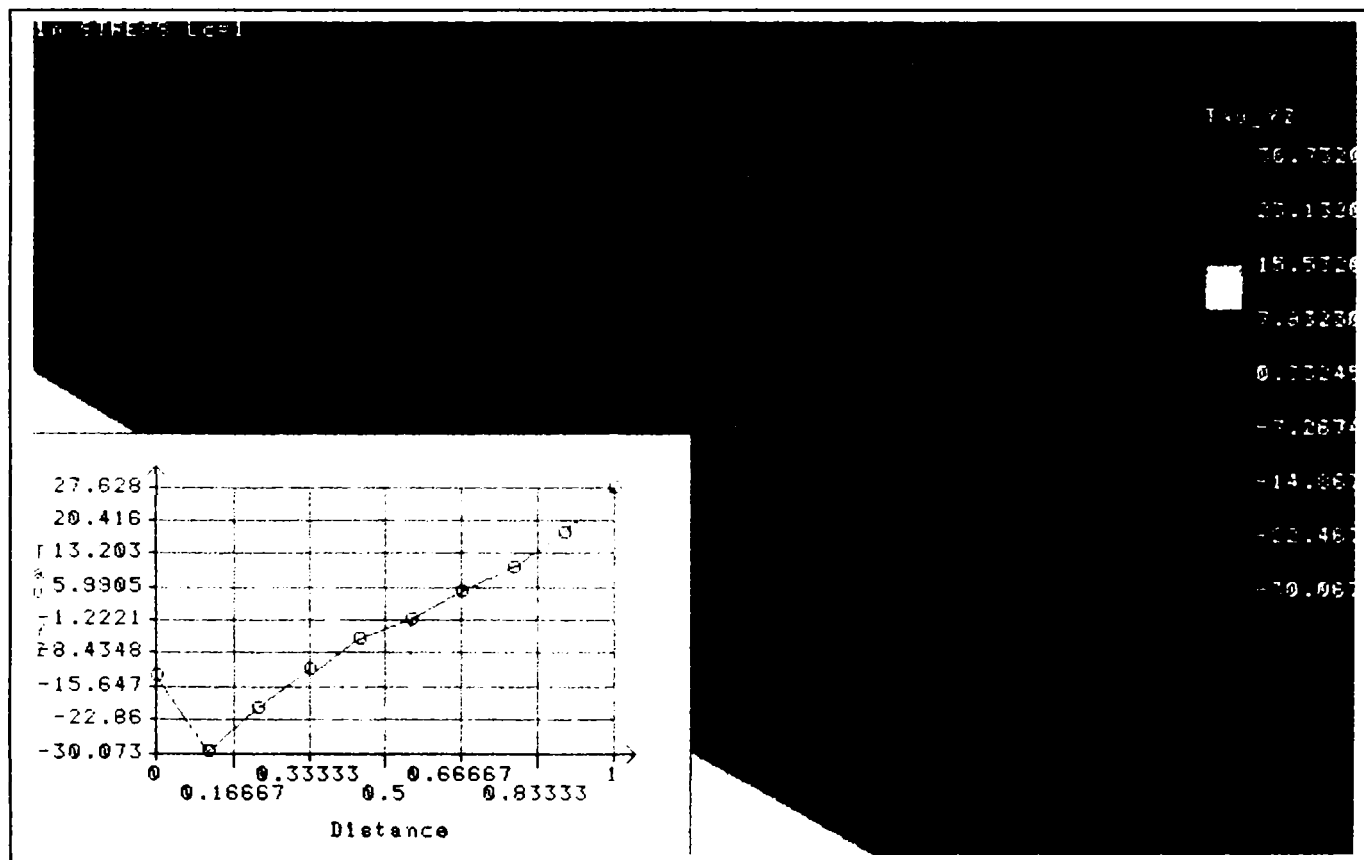
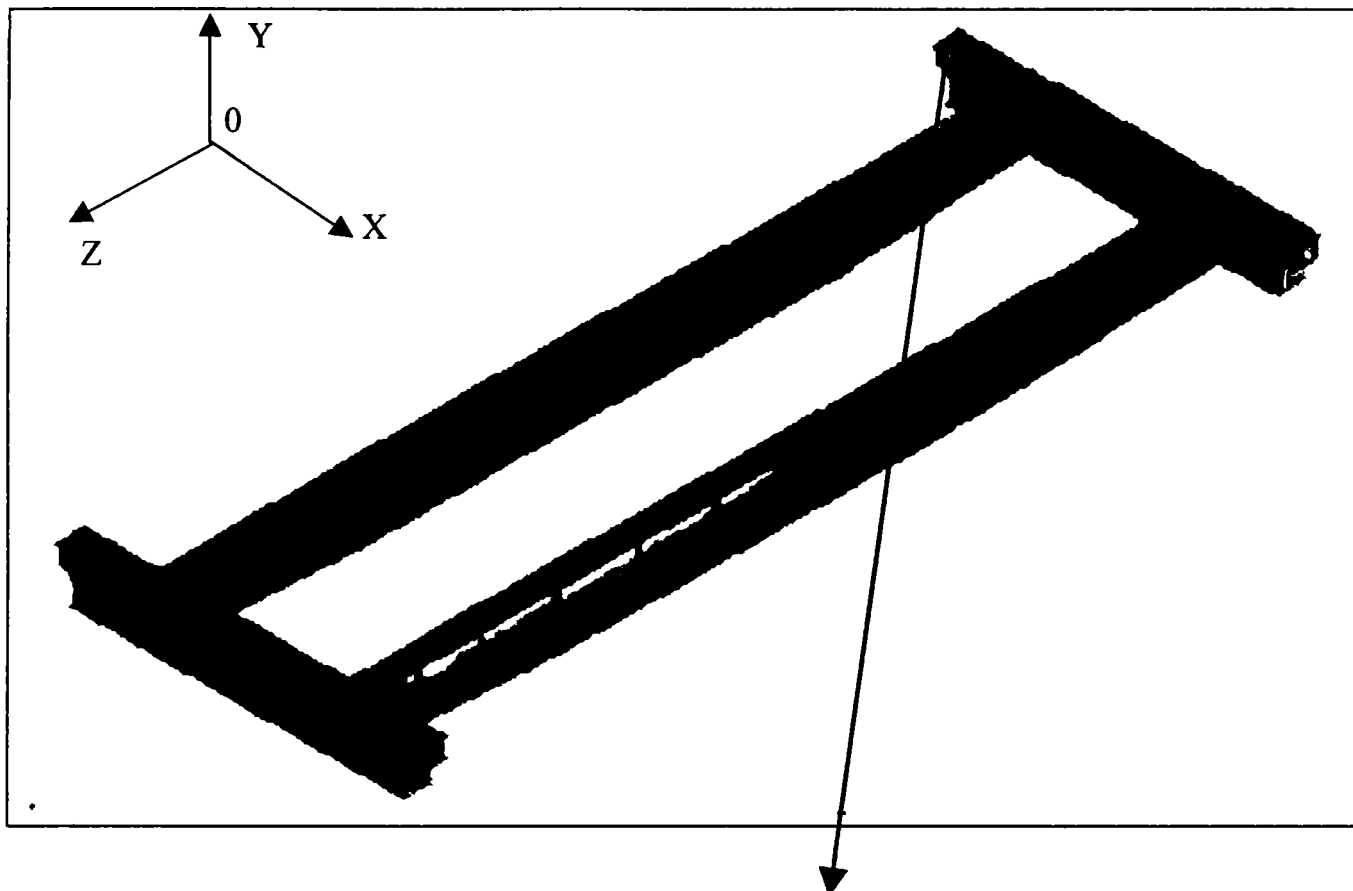


Fig.3.41 Variația tensiunii τ_{yz} pentru o zonă a traversei I în care această componentă are valoare extremă

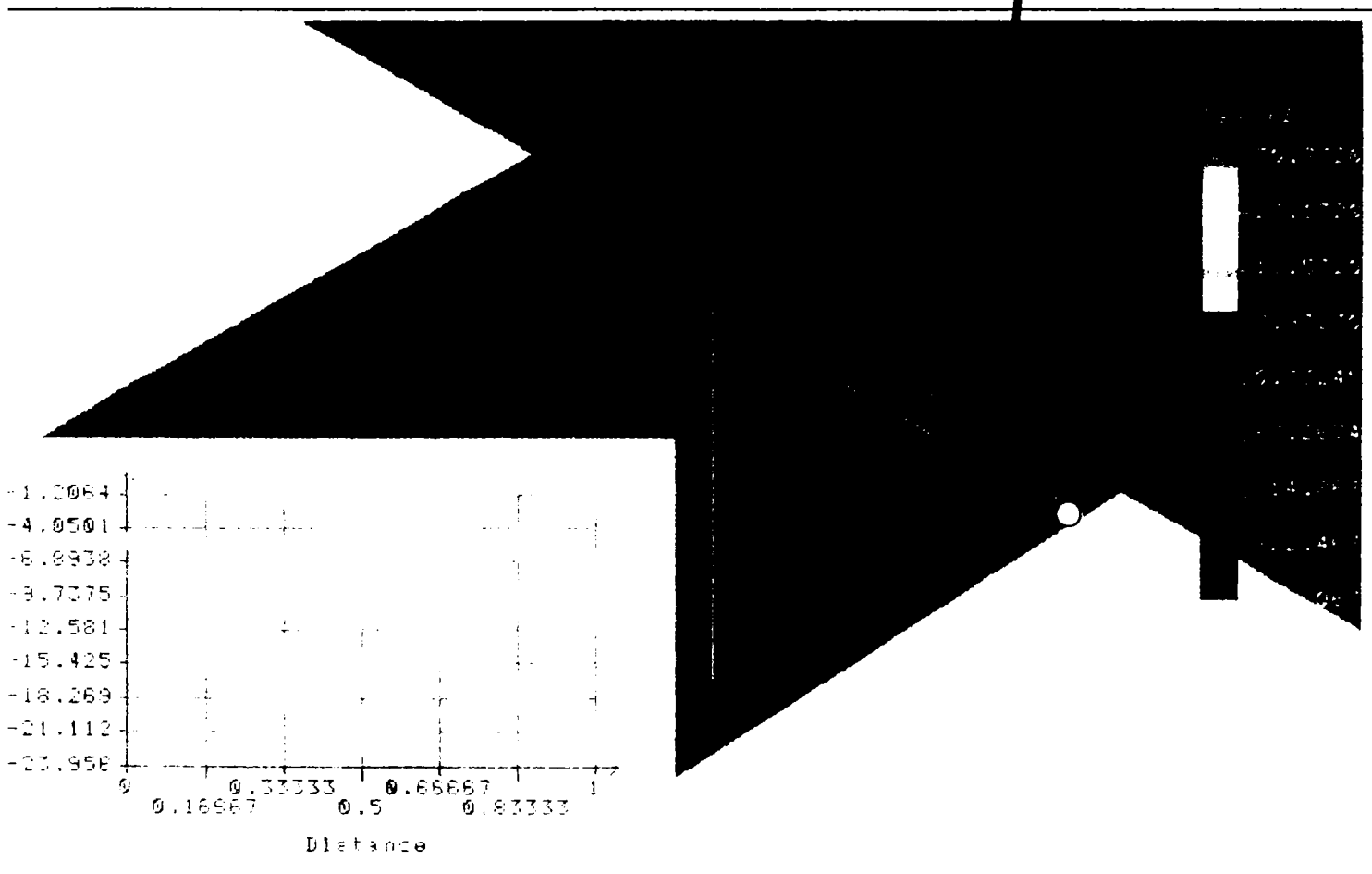
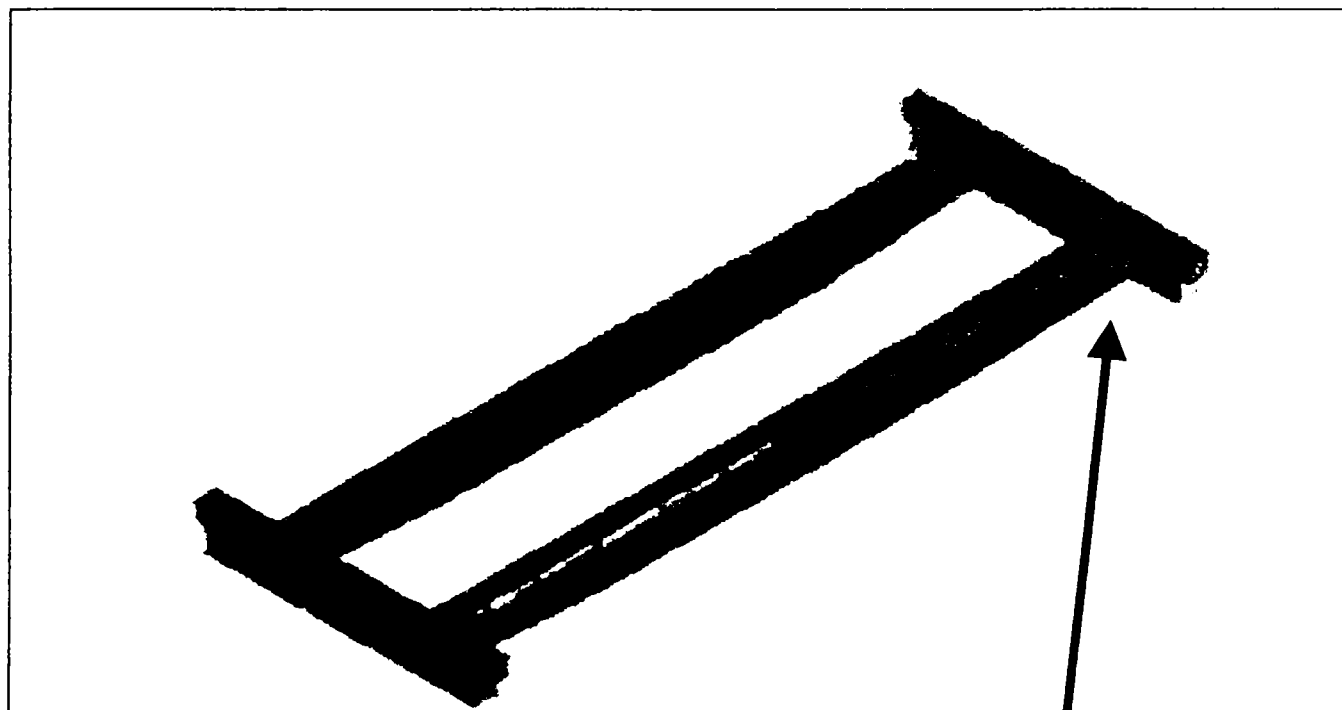


Fig.3.42 Variația tensiunii τ_{yz} la nivelul suprafeței laterale exterioare a lonjeronului I

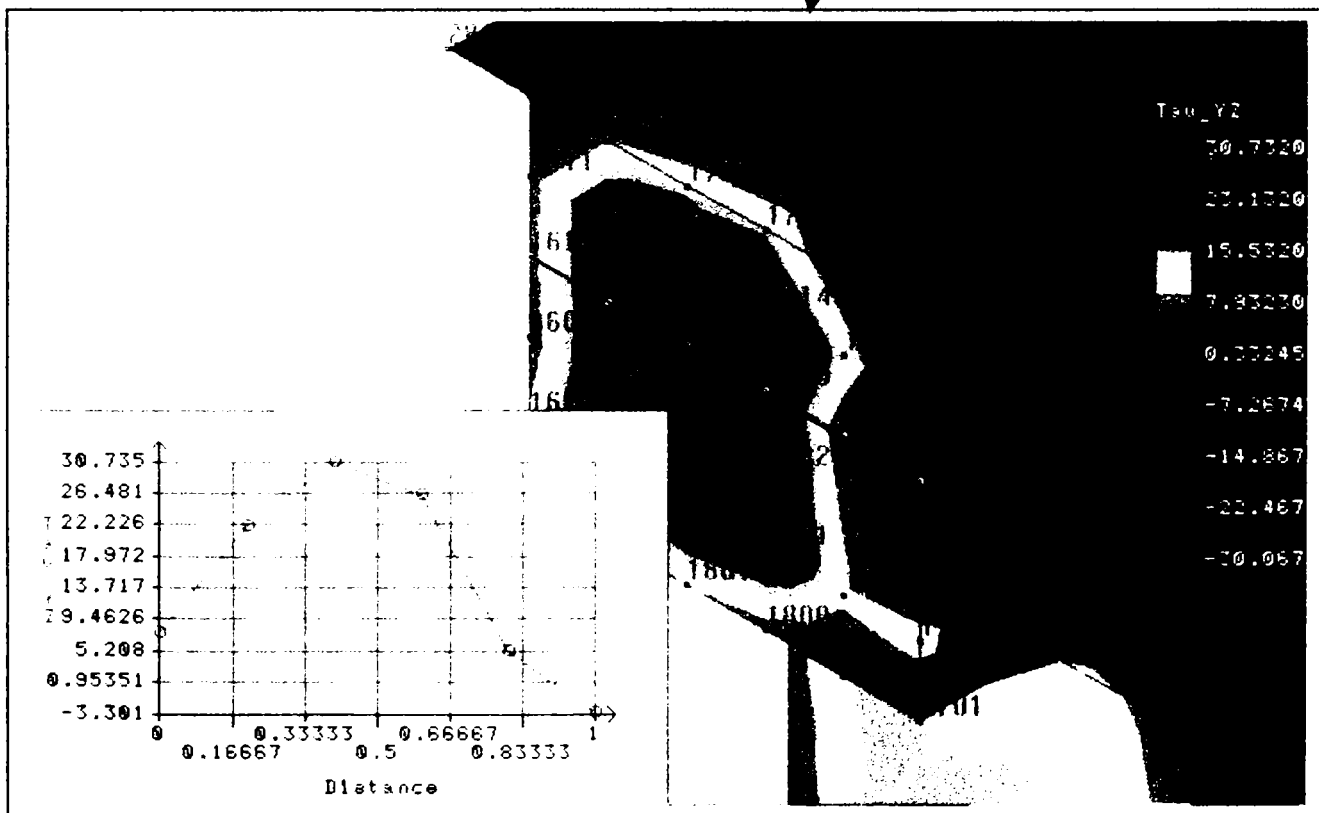
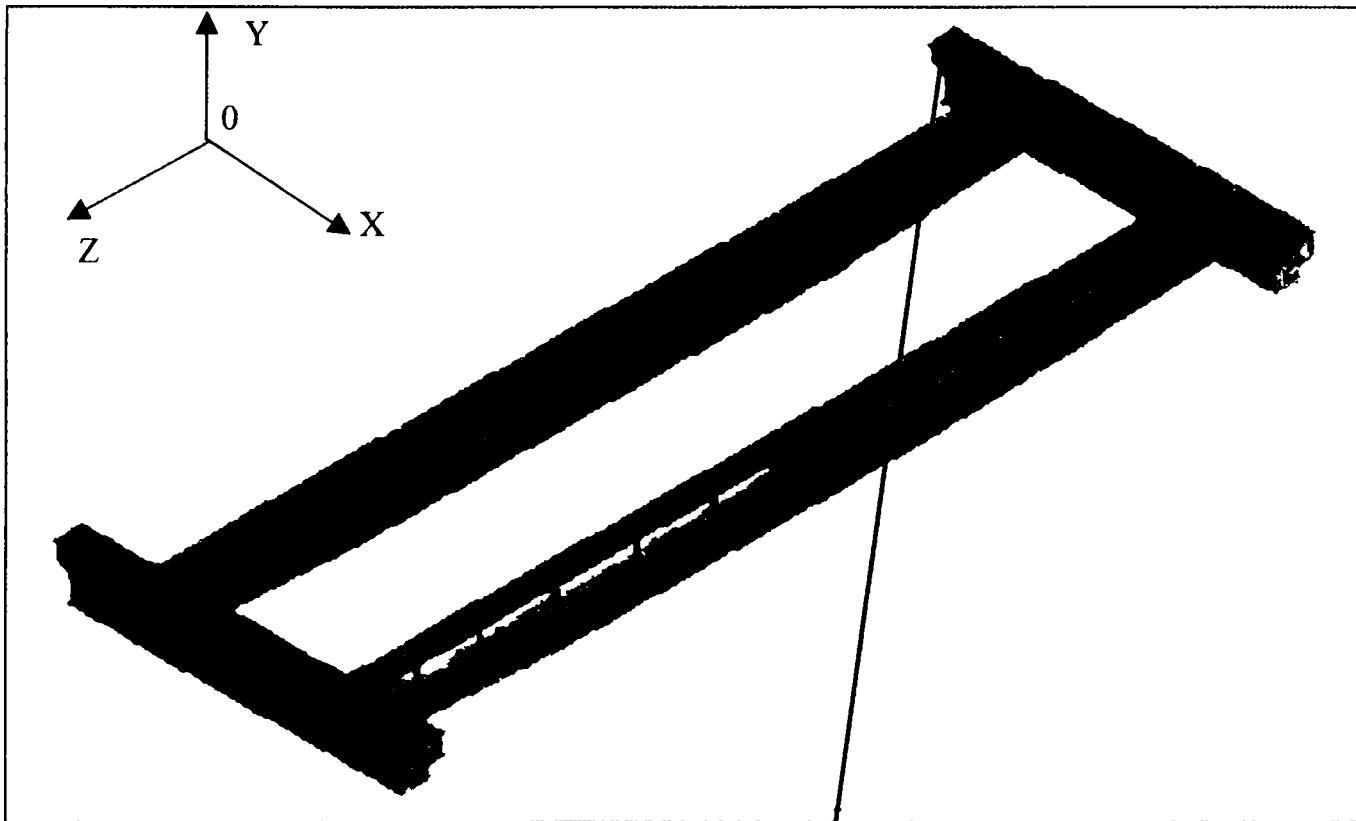


Fig.3.43 Variația tensiunii τ_{yz} pentru o zonă a traversei I în care această componentă are valoare extremă (nodul 1809)

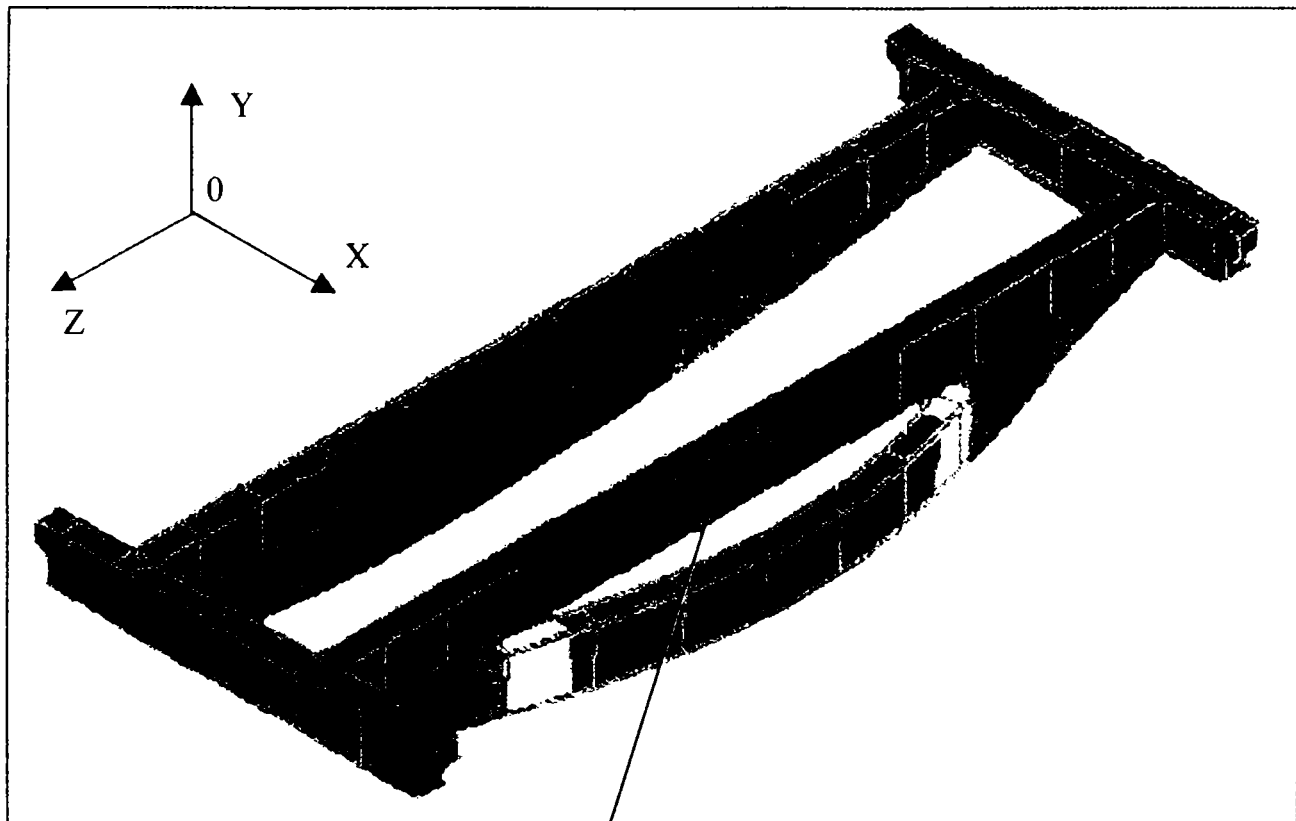


Fig.3.44.a Reprezentarea comparativă a stării inițiale și a stării deformate pentru structura de rezistență a podului rulant

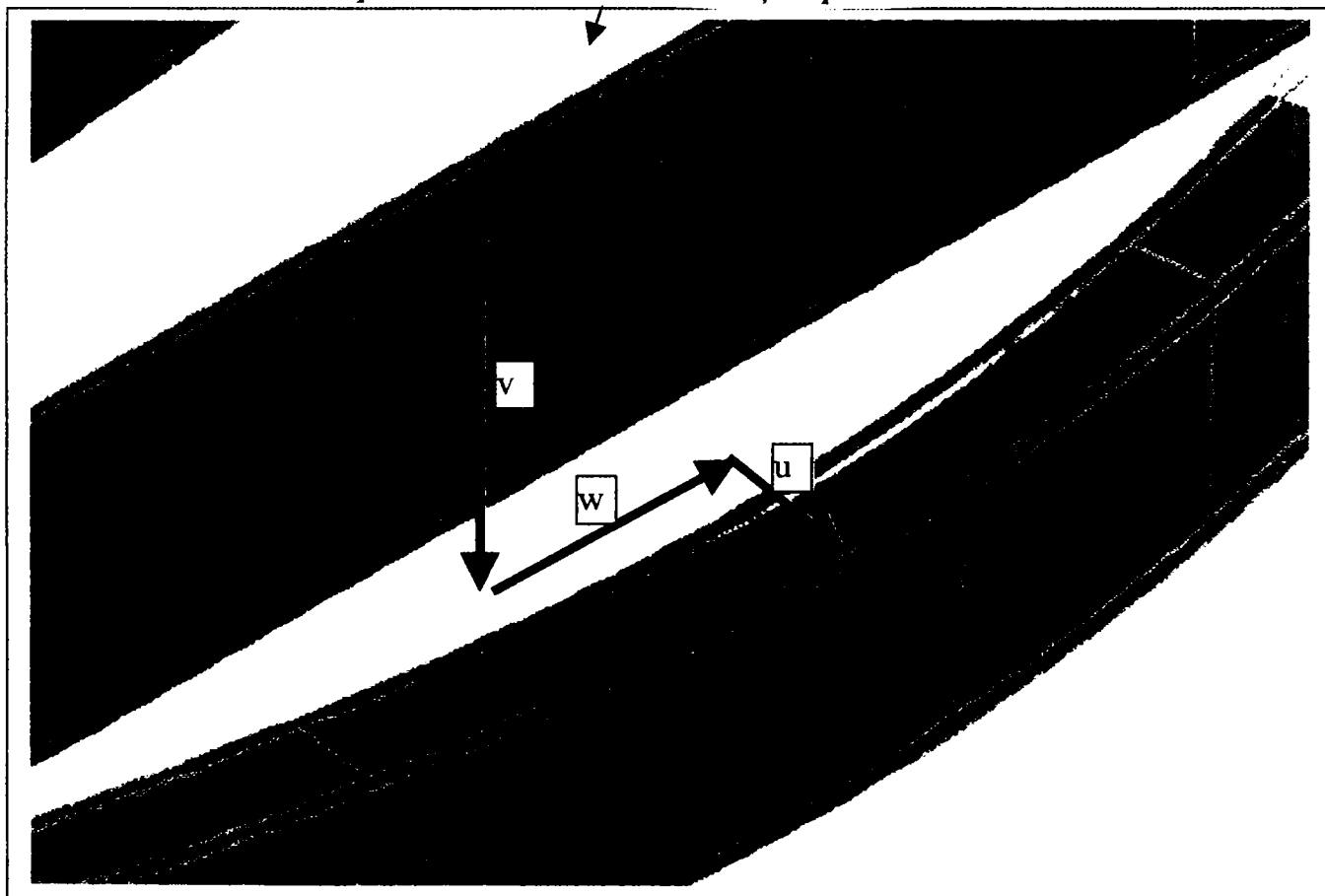


Fig.3.44.b Detaliu în zona de deplasare maximă, cu precizarea componentelor deplasărilor după direcțiile x, y, z

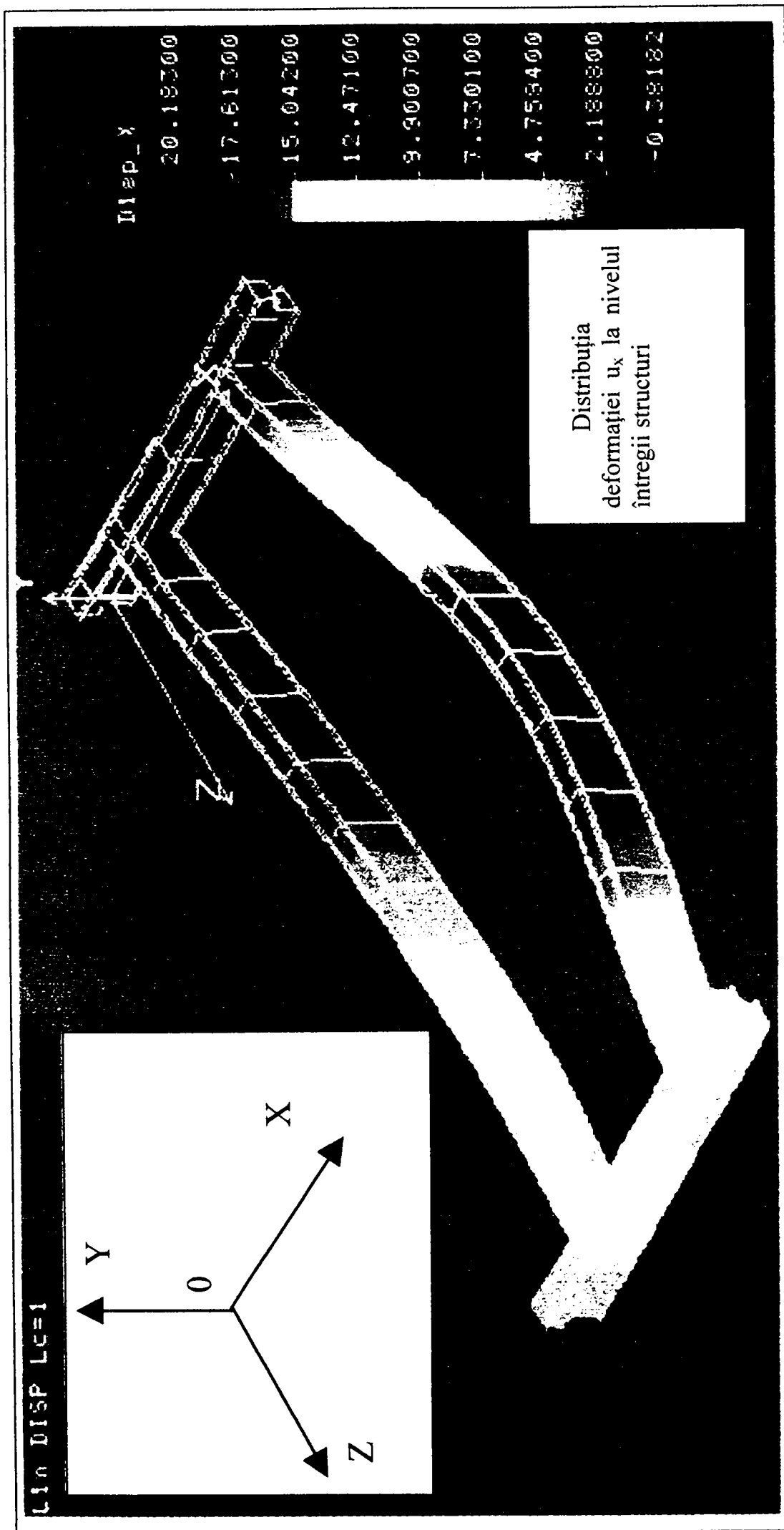


Fig.3.45 Distribuția deformației u_x , reprezentând deplasările din planul orizontal după axa X, la nivelul întregii structuri

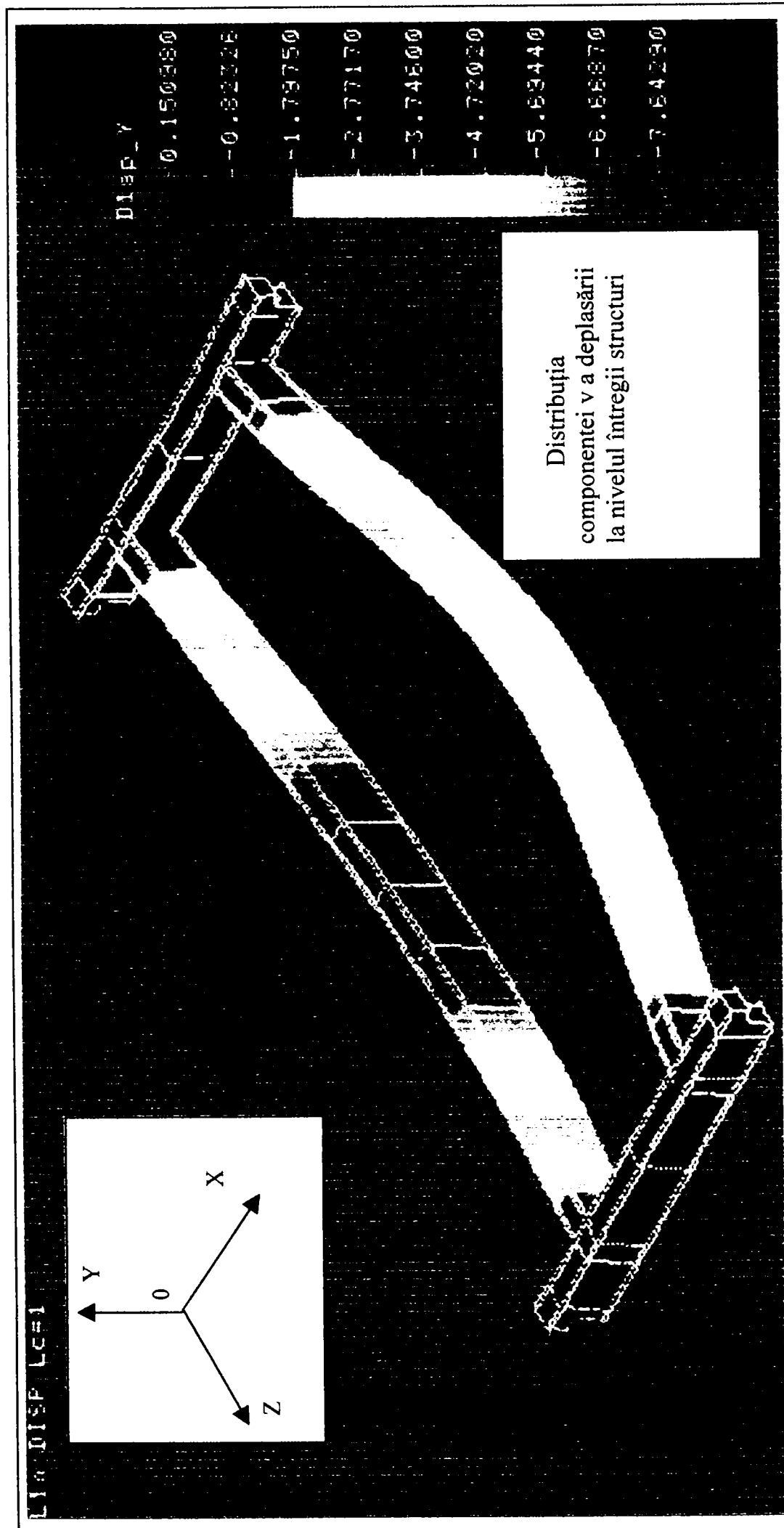


Fig.3.46 Distribuția deformației v_y , reprezentând deplasările din planul orizontal după axa Y, la nivelul întregii structuri

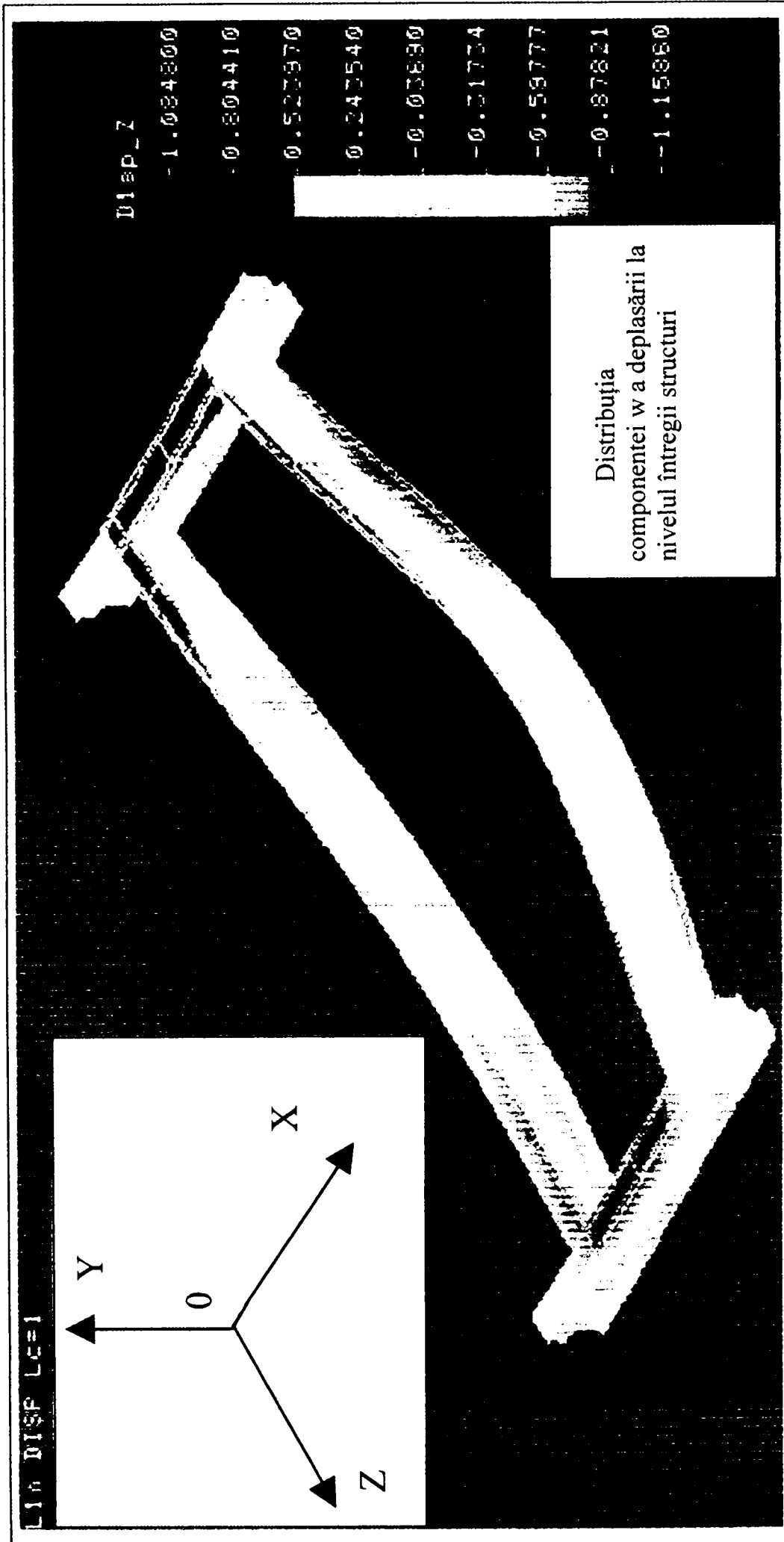


Fig.3.47 Distribuția deformației w_z , reprezentând deplasările din planul orizontal după axa Z, la nivelul întregii structuri

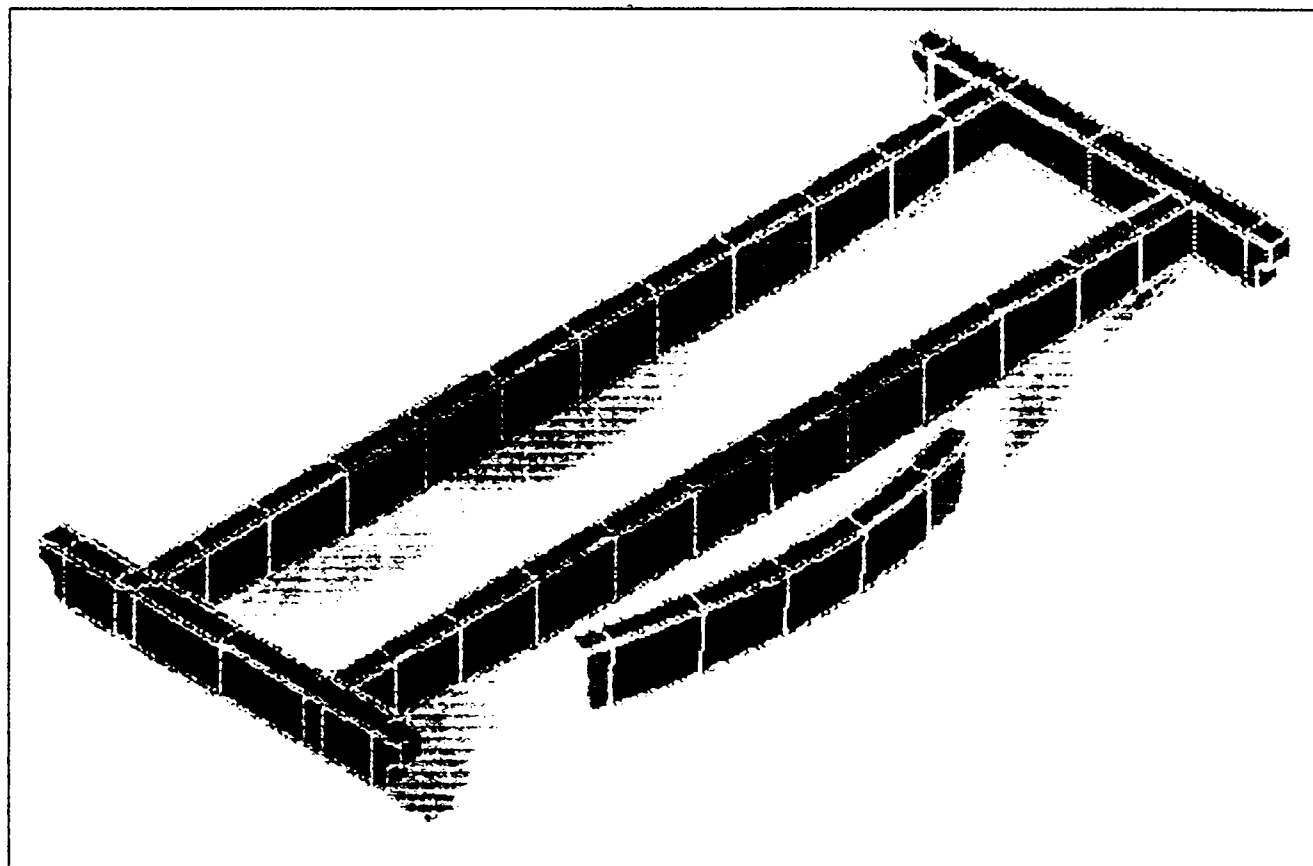


Fig.3.48 Câmpul de distribuție al deformației rezultante, reprezentând deplasările în planul orizontal, la nivelul întregii structuri

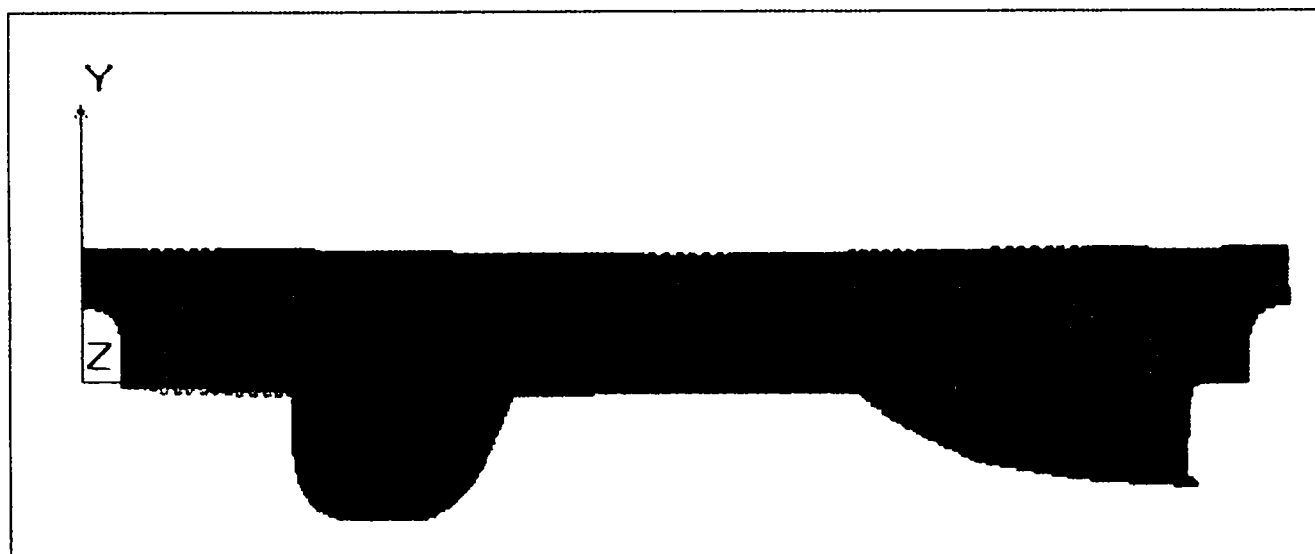
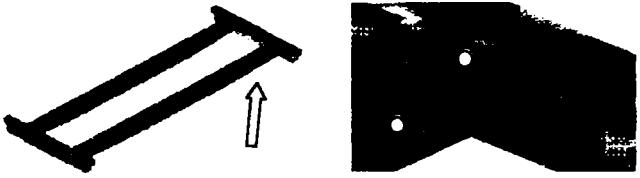

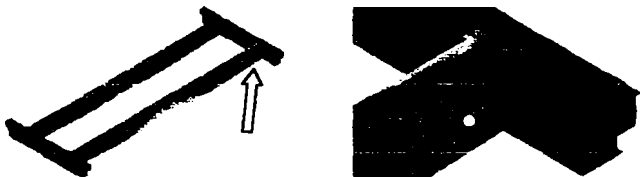

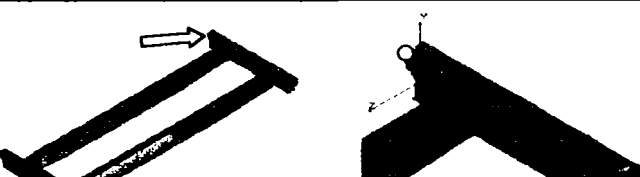




Fig.3.49 Proiecție în planul xOy a stării deformate a structurii de rezistență

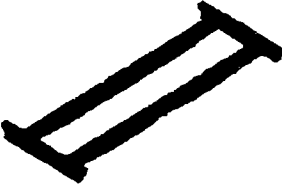

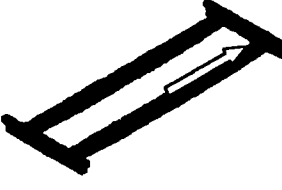

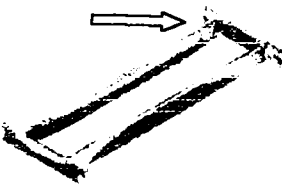

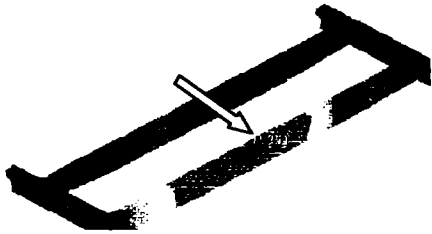
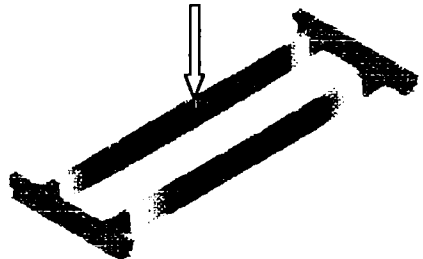
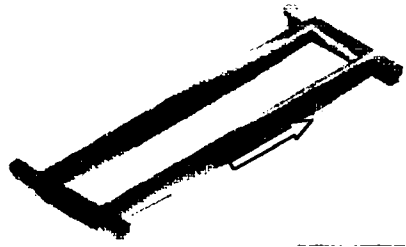
Localizarea nodurilor pentru care se înregistrează valoare maximă a tensiunilor

Tabel 3.3

Nr.crt.	Componenta analizată	Nr. nodului în care se înregistrează valoarea	Valoare extremă înregistrată	Localizarea nodurilor pentru care se înregistrează valoare maximă a tensiunilor
0	1	2	3	4
1.	σ_x	3123	132,164N/mm ²	
2.	σ_x	3080	-133,064 N/mm ²	
3.	σ_y	1702	-182,226 N/mm ²	
4.	σ_z	15104	155,315N/mm ²	
5.	τ_{xy}	1732	-46,996 N/mm ²	
6.	τ_{zy}	1809	30,73 N/mm ²	
7.	τ_{zx}	2517	-76,85 N/mm ²	
8.	$\sigma_{Von Mises}$	15104	182,895N/mm ²	

Localizarea nodurilor pentru care se înregistrează valoare maximă a tensiunilor

Tabel 3.3 (continuare)

0	1	2	3	4	
9.	σ_1	15104	182,89 N/mm ²		
10.	σ_2	3123	81,92 N/mm ²		
11.	σ_3	1702	-192,554 N/mm ²		
12.	u	15991	20,1832 mm		
13.	v	7880	-7,6429 mm		
14.	w	15343	-1,1586 mm		

Analizând componenta tensiunii tangențiale τ_{yz} se observă că valoarea extremă se înregistrează în nodul 1809, ($x = 0$ mm, $y = 500$ mm, $z = 112$ mm), fig.3.41 (tabel 3.3, poziția 6) și are valoarea $30,73$ N/mm². Acest nod este situat la o extremitate a traversei I. În apropierea acestui nod se află nodul 2513 pentru care $\tau_{yz} = -75,92$ N/mm², respectiv nodul 2512 pentru care $\tau_{yz} = -75,311$ N/mm², în care valorile tensiunii tangențiale τ_{yz} sunt apropiate de valoarea extremă. Alte zone critice în care această componentă înregistrează valori extreme sunt prezentate în fig.3.42 și fig.3.43.

Dintre componentele tensiunii normale remarcăm un vârf de tensiune al componentei $\sigma_y = -182,22$ N/mm² în zona extremității traversei I, în apropierea sistemului de axe de coordonate, tabel.3.3, poziția 3, zonă în care această grindă interacționează cu roata de rulare.

În ceea ce privește tensiunile normale principale $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, acestea înregistrează valori extreme în zona de îmbinare dintre cele două lonjeroane și traversa I, după cum urmează:

- tensiunea normală principală $\sigma_1 = 182,89$ N/mm² înregistrează o valoare maximă în același nod în care tensiunea echivalentă von Mises este maximă, tabel 3.3, poziția 9;

- tensiunea normală principală $\sigma_2 = 81,92$ N/mm² înregistrează o valoare maximă într-o zonă apropiată punctului de maxim al tensiunii σ_1 , în nodul 3123, tabel 3.3, poziția 10.

- tensiunea normală principală $\sigma_3 = -192,554$ N/mm² înregistrează o valoare extremă în nodul 1702, adică în același nod în care s-a înregistrat o valoare extremă pentru componenta tensiunii normale σ_y , tabel 3.3, poziția 11.

Analizând deplasările se constată că valori maxime ale acestora se înregistrează la mijlocul deschiderii lonjeronului I, fig.3.44 a,b. Deplasarea rezultantă maximă se înregistrează în nodul 15992 și are valoarea $u_{rez} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} = 20,87$ mm, componentele acesteia sunt:

$$u = 15,18 \text{ mm}, v = -3,27 \text{ mm}, w = 0,075 \text{ mm}.$$

Aceasta se explică prin faptul că, lonjeronul I pe lângă încovoiere mai este solicitat și la răsucire, iar forma secțiunii transversale este proiectată inițial pentru preluarea încovoierii produsă de sarcinile verticale. În nodurile din apropierea acestuia se înregistrează valori foarte apropiate de valoarea maximă, de exemplu :

- în nodul 15989, $u_{rez} = 20,86$ mm,
- în nodul 15994, $u_{rez} = 20,85$ mm,
- în nodul 15988, $u_{rez} = 20,85$ mm.

În fig.3.45 se prezintă componenta deplasării rezultante în plan orizontal după axa x (u), în fig.3.46 se prezintă componenta deplasării rezultante în plan orizontal după axa y (v) și în fig.3.47 se prezintă componenta deplasării rezultante în plan orizontal după axa z (w). Analizând aceste figuri se observă că deplasarea u are valori mult mai mari decât celelalte două. Aceste deplasări sunt evidențiate și în fig.3.48 ca fiind mult mai mari în comparație cu celelalte. Astfel se poate concluziona că și sub aspectul deformațiilor, lonjeronul I reprezintă o zonă critică a structurii de rezistență.

3.4. ANALIZA CALCULELOR EFECTUATE ȘI A REZULTATELOR OBȚINUTE

În problemele generale ale calculului structurilor de rezistență, stabilirea modului în care este evaluat răspunsul structurii la acțiunile ce se exercită asupra sa, precum și interpretarea fenomenului complex de comportare a structurii de rezistență sub încărcări, reprezintă factori semnificativi de care depinde exploatarea ulterioară a construcției. În acest sens, caracterizarea din punct de vedere cantitativ a răspunsului structurii de rezistență la acțiunile exterioare, poate fi efectuată prin mărimi fizice (tensiuni și deplasări) corespunzătoare stadiului de solicitare analizat, mărimi care pentru asigurarea unei bune exploatare a construcției, trebuie să se încadreze în anumite limite impuse prin prescripții tehnice.

Rezolvarea problemelor privind determinarea tensiunilor și deformațiilor din structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice aflate în exploatare se poate realiza printr-un procedeu aproximativ de calcul, având la bază metoda elementelor finite și care presupune determinarea valorilor unor funcții necunoscute, în cazul nostru tensiuni și deformații, într-un domeniu de analiză bine determinat. Fenomenele care determină apariția acestor tensiuni și deformații în structurile de rezistență ale acestor utilaje în exploatare sunt descrise din punct de vedere matematic de ecuații diferențiale, prin a căror integrare în condiții limită, specificate de domeniul de analiză, se obțin soluțiile exacte ale problemei. Analizând, structura metalică a podului rulant cu capacitatea de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m, din punct de vedere structural, al condițiilor de încărcare și al condițiilor limită, se observă că aceasta este deosebit de complexă, motiv pentru care integrarea ecuațiilor diferențiale caracteristice este extrem de dificilă. Datorită acestui fapt, rezolvarea analitică nu se poate efectua decât prin crearea unui model simplificat, astfel încât rezolvarea ecuațiilor diferențiale să fie realizabilă.

După cum am arătat în acest capitol, calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice efectuat pentru determinarea valorică a tensiunilor și deformațiilor (tensiuni și deplasări), constituie o analiză teoretică a răspunsului structurii la acțiunile exterioare și implică schematizarea fenomenului fizic real, în vederea exprimării sale în formă matematică. De aceea, ținând seama de faptul că, se calculează o schemă idealizată a structurii și nu structura ca atare, se poate afirma că dacă schema de calcul modelează cât mai fidel structura reală, atunci se va asigura o comportare corespunzătoare în exploatare a structurii de rezistență și implicit a utilajului, în ipoteza că și celelalte etape ale procesului de proiectare sunt rezolvate corect.

În cazul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, cum sunt cele specifice podurilor rulante a fost adoptată o schemă de calcul spațială, rezultatele obținute pe această cale fiind confirmate, în general de comportarea în exploatare a acestor construcții.

Evaluarea modului de comportare în exploatare și optimizarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice se efectuează cunoscând starea de tensiune și deformație din elementele acestora, determinată în acest capitol prin calcul spațial, condus pe baza a două modelări numerice care au relevat adoptarea unor modele de calcul ale structurii de rezistență.

În ceea ce privește rezultatelor finale, putem preciza faptul că programul COSMOS/M permite prezentarea lor în două moduri: **calitativ și cantitativ**, indiferent de varianta de discretizare.

Modalitatea de prezentare calitativă a rezultatelor implică o reprezentare globală a distribuției tensiunilor și deformațiilor în structura de rezistență la un moment dat și o vizualizare locală a distribuției tensiunilor și/sau deformațiilor într-o zonă mai restrânsă a domeniului de analiză, precum și vizualizarea diversilor parametri după anumite direcții impuse.

Modalitatea de prezentare cantitativă a rezultatelor presupune furnizarea datelor sub forma unor liste cu valori, ceea ce permite utilizarea acestora la trasarea unor grafice de variație a mărimilor studiate și compararea acestora cu cele determinate experimental.

Din analiza fișierelor cu rezultate obținute în urma calculului spațial condus cu programul COSMOS/M versiunea 1.6, în modelarea numerică folosind elemente finite BEAM 3 s-a determinat:

- forța tăietoare, momentul încovoietor și momentul de răsucire pentru toate elementele structurii și diagramele de variație corespunzătoare la nivelul întregii structuri de rezistență;
- tensiuni echivalente, normale, tangențiale;
- vizualizarea poziției deformată și nedeformată a structurii de rezistență.

Concluziile obținute prin modelarea numerică, folosind elemente finite BEAM 3 sunt:

- a) Tensiunile maxime apar la mijlocul deschiderii lonjeroanelor și la mijlocul traversei I;
- b) Tensiunile din porțiunile lonjeroanelor realizate cu înălțime variabilă sunt de trei ori mai mici decât cele corespunzătoare mijlocului deschiderii traverselor;
- c) Raportul dintre tensiunile echivalente maxime din lonjeron și traversă este 3,56.

Din analiza fișierelor cu rezultate obținute în urma calculului spațial condus cu programul COSMOS/M versiunea 2.5, au fost selectate valorile considerate semnificative ale tensiunilor și deplasărilor, care au permis trasarea:

- variației tensiunilor echivalente von Mises la nivelul întregii structuri de rezistență și pentru anumite zone considerate critice;
- variația componentelor tensorului tensiune tangențială τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} în zonele în care se înregistrează valori extreme ale acestora;
- variația tensiunilor normale principale σ_1 , σ_2 , σ_3 pentru zonele în care se înregistrează valori maxime ale acestora;
- câmpul de distribuție al componentelor deplasărilor u, v, w în plan orizontal după axele x, y respectiv z la nivelul întregii structuri de rezistență a podului rulant, precum și a deplasării rezultante.
- vizualizarea poziției deformată a structurii de rezistență în comparație cu cea nedeformată
- distribuția câmpurilor tensiunilor echivalente, tensiunilor normale principale și a componentelor tensorului tensiune tangențială la nivelul întregii structuri de rezistență și în zonele în care acestea înregistrează valori extreme.

Concluzii privind comportarea structurii de rezistență a podului rulant în modelarea numerică cu elemente finite SHELL 3 sunt:

a) Tensiunea echivalentă maximă calculată după teoria energiei specifice modificatoare de formă (von Mises) este $\sigma_{\text{Von Mises max}} = 182,895 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ și se înregistrează în nodul 15104 plasat în conformitate cu localizarea prezentată în tabelul 3.3, poziția nr. 8, pe suprafața laterală exterioară a longeronului I în apropierea de îmbinarea cu traversa I.

b) Componenta maximă (în modul) a tensiunii tangențiale este componenta τ_{xz} care are valoarea $|\tau_{xz}| = 76,85 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ și se înregistrează în nodul 2517 plasat în conformitate cu localizarea prezentată în tabelul 3.3, poziția nr. 7, la partea superioară a traversei I, la îmbinarea acesteia cu longeronul I.

c) Componentele tensiunilor tangențiale τ_{xy} și τ_{zy} înregistrează valori extreme în nodurile 1732 și 1809, după cum urmează: $\tau_{xy} = -46,996 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ și $\tau_{zy} = 30,73 \text{ [N/mm}^2\text{]}$. Aceste noduri sunt foarte apropiate și sunt amplasate conform tabelului 3.3, pozițiile 5 și 6 la traversei I în apropierea originii sistemului de axe global. În aceeași zonă corespunzător nodului 1702 se înregistrează valoarea extremă pentru tensiunea normală $\sigma_y = -182,226 \text{ [N/mm}^2\text{]}$, și tensiunea normală principală 3 cu valoarea $\sigma_3 = -192,554 \text{ [N/mm}^2\text{]}$.

d) În conformitate cu concluziile de la punctul c), rezultă că zona traversei I, plasată în apropierea originii sistemului de axe global este o zonă critică pentru care trebuie luate măsuri de îmbunătățirea soluției constructive în scopul micșorării vârfurilor de tensiune care apar. Situații similare apar conform concluziilor de la punctele a) și b) la îmbinarea dintre traversa I și longeronul I, unde înregistrează valori extreme componentele $\sigma_{\text{Von Mises max}}$, τ_{xz} , σ_1 , σ_2 .

e) Deplasarea totală maximă se înregistrează în nodul 15992, fiind de 20,87 mm, pentru care componentele deplasării liniare după cele trei direcții ale sistemului global de axe sunt:

$$u = 15,18 \text{ mm}, v = 3,75 \text{ mm}, w = 0,075 \text{ mm}.$$

Extremele acestor componente se înregistrează după cum urmează: $u_{\text{max}} = 20,1832 \text{ mm}$ în nodul 15991, $v_{\text{min}} = 7,6429 \text{ mm}$ în nodul 7880, $w_{\text{min}} = -1,1586 \text{ mm}$ în nodul 15343, în conformitate cu localizarea prezentată în tabelul 3.3, pozițiile 12, 13 și 14.

f) Analizând distribuția câmpurilor de tensiune se observă că zona critică a podului rulant o reprezintă îmbinarea dintre longeronul I și traversa I, motiv pentru care trebuie să i se acorde o atenție specială, atât în faza de proiectare (în cazul reproiectării structurii de rezistență), cât și în faza de execuție.

g) Analiza stării de deformație a structurii de rezistență permite efectuarea unui studiu al rigidității structurii de rezistență.

h) Studiul stării de tensiune și deformație efectuat, permite luarea unor decizii cu privire la creșterea capacității portante a structurii de rezistență a utilajului.

i) Studiul complet al problemei prezentate presupune după ameliorarea soluției constructive în scopul reducerii vârfurilor de tensiune, o analiză a comportării structurii și în regim dinamic.

Volumul calculului în modelarea cu elemente finite de tip SHELL 3 este mult mai mare decât în cazul modelării cu elemente finite de tip BEAM 3, acesta fiind direct proporțional cu numărul

nodurilor și a elementelor finite folosite în discretizare.

Modelul de calcul obținut prin modelarea numerică a structurii de rezistență cu elemente finite de tip BEAM 3 permite efectuarea unui studiu de ansamblu asupra modului de comportare al structurii de rezistență, fără să evidențieze aspecte legate de fenomenul de concentrare al tensiunilor sau o analiză în detaliu a distribuției stării de tensiune și deformație; aceste inconveniente însă sunt rezolvate de modelul de calcul obținut prin modelarea cu elemente finite de tip SHELL 3, deci rezultatele obținute în urma modelării cu elemente finite BEAM 3 sunt îmbunătățite prin alegerea elementelor finite SHELL 3, mult mai adecvate scopului propus din punct de vedere al formei și al mărimii și care modelează mai fidel structura de rezistență a podului rulant analizat.

Concluziile formulate în urma celor două variante de modelare numerică au evidențiat faptul că, adoptarea unui model de calcul are influențe calitative și cantitative asupra stării de solicitare a elementelor componente ale structurii de rezistență a podului rulant, acestea având implicații directe asupra procesului de optimizare.

Studiul stării de tensiune din structura de rezistență a podului rulant a evidențiat posibilitatea optimizării dimensionale în vederea reducerii consumului de material fără a depăși rezistența admisibilă a materialului.

3.5 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Studiile teoretice privind comportarea sub încărcări a structurii de rezistență a podului rulant au avut ca obiectiv analiza stării de tensiune și deformație din elementele acesteia. Pentru elaborarea obiectivului propus a fost elaborat un program de studii și cercetări care a urmărit :

- analiza geometriei și a legăturilor dintre elementele componente ale structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m, precum și analiza structurală a ansamblului acesteia ;
- modelarea numerică a structurii metalice a utilajului utilizând programul de calcul COSMOS/M, calculul fiind condus în două variante și anume în analiza cu elemente finite BEAM 3 și SHELL 3.

În cadrul acestui capitol contribuțiile personale au constat în :

- obținerea datelor necesare modelării prin analiza structurală și a legăturilor dintre elementele structurii metalice ;
- stabilirea caracteristicilor dimensionale necesare estimării geometriei podului rulant;
- specificarea încărcărilor și a combinațiilor acestora provenite din exploatare ;
- modelarea numerică în două variante. cu elemente finite BEAM 3 și SHELL 3;
- determinarea stării de tensiune și deformație din structura de rezistență a podului rulant prin specificarea calitativă și cantitativă a tensiunilor și deformațiilor atât pentru întreaga structură, cât și pentru anumite elemente componente ale acesteia.

CAPITOLUL 4

STUDII EXPERIMENTALE EFECTUATE ASUPRA STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PODULUI RULANT DE 100KN-17,3 m AFLAT ÎN EXPLOATARE

Procedeul de analiză al comportării structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice sub acțiunea încărcărilor din exploatare folosind metode teoretice de investigare nu poate fi aplicat cu succes numai dacă există mijloace concrete de analiză. În prezenta lucrare s-a elaborat un mijloc teoretic de studiu a realității, prin modelul fizic și matematic al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m. În scopul validării acestui studiu teoretic se impune efectuarea unor experimentări industriale care să pună în evidență comportarea în exploatare a structurii de rezistență a utilajului. Analiza experimentală industrială se efectuează în scopul determinării tensiunilor din structura de rezistență a podului rulant aflat în exploatare, respectiv a distribuției acestora în zonele cu concentratori de tensiune, care sunt considerate zone periculoase cărora li se va acorda o atenție deosebită în proiectare și exploatare.

4.1. PROGRAMUL DE CERCETĂRI EXPERIMENTALE. OBIECTIVE ȘI ETAPE

În general, optimizarea unei structuri de rezistență a unui utilaj metalurgic se poate efectua, conform prezentării din capitolul 2, atât în faza de proiectare, cât și ulterior, după o anumită perioadă de exploatare a construcției metalice sub încărcări. Problema optimizării însă, nu poate fi rezolvată fără un calcul al structurii de rezistență. Acest calcul implică, evaluarea răspunsului acesteia la acțiunile exterioare care solicită utilajul în exploatare.

În cazul podului rulant pentru turnarea oțelului analizat, evaluarea răspunsului structurii de rezistență sub încărcările din exploatare, s-a efectuat după recomandările din literatura de specialitate [73], prin utilizarea unor metode specifice tensometriei electrice, pe baza unui program de studii și măsurători întocmit în acest sens.

Programul de studii și măsurători, având ca scop determinarea valorică a tensiunilor și deplasărilor, corespunzătoare stadiului de solicitare al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN-17,3 m, a cuprins următoarele etape:

1. Pregătirea în laborator a măsurătorilor.
2. Alegerea aparatelor, a materialelor și a accesoriilor necesare efectuării măsurătorilor.
3. Stabilirea condițiilor de efectuare a măsurătorilor în incinta halei în care funcționează podul rulant analizat.
4. Alegerea metodelor tensometrice și întocmirea planelor de operații și măsurători aferente acestora, funcție de alcătuirea constructivă a structurii de rezistență.

5. Efectuarea măsurătorilor tensometrice urmate de prelucrarea datelor experimentale.
6. Întocmirea tabloului final cu rezultate.
7. Analiza critică și interpretarea valorică a mărimilor obținute.

Determinarea valorică a tensiunilor prin tensometrie electrică rezistivă, împreună cu cercetările teoretice prezentate în cap. 3, oferă o imagine completă asupra stări de tensiune din structura de rezistență a podului rulant analizat, permițând optimizarea dimensională a acestuia, în vederea reproiectării.

4.2 MĂSURĂTORI EFECTUATE. REZULTATE OBȚINUTE

Structura spațială, static nedeterminată, a podului rulant cu capacitatea de ridicare de 100 KN și înălțimea de ridicare de 17,3 m, analizată prin metodele teoretice prezentate în cap.3, pentru domeniul elastic, a fost studiată și experimental, prin metoda tensometriei electrice rezistive. Această metodă presupune măsurarea electrică a mărimilor mecanice cu ajutorul unor traductori tensometrici rezistivi, [60], [73], [109].

Măsurătorile cu ajutorul traductorului tensometric rezistiv se bazează, în principiu, pe faptul că atunci când un conductor sau un semiconductor, care constituie elementul sensibil, se lungeste sau se scurtează, rezistența sa electrică se modifică. Dacă acest element sensibil este fixat pe un element de rezistență supus unei solicitări de orice natură, el se va deforma la fel ca și elementul respectiv. Măsurând prin mijloace electrice sau electronice, variația de rezistență a elementului sensibil, care este proporțională cu deformația sa, se poate determina pe baza unei etalonări prealabile, deformația elementului studiat. Variația de rezistență se măsoară prin variații corespunzătoare de tensiune și curent. Această măsurare nu se face direct la bornele rezistenței, ci introducând-o într-un circuit amplificator care mărește sensibilitatea și precizia măsurării, [73].

În scopul determinării valorilor maxime ale tensiunilor din structura de rezistență a podului rulant s-au folosit traductoare tensometrice rezistive de la firma Microtehnă cu baza de măsurare de 10 mm, rezistență nominală de 120 Ω și constanta traductorului $k = 2,02 \div 2,06$. Întrucât acestea nu pot funcționa singure ele se înglobează într-un lanț de măsurare, a cărui schemă bloc este prezentată în fig.4.1.

În vederea efectuării măsurătorilor, conform programului întocmit în cadrul acestui capitol în paragraful 4.1, pentru încărcarea podului rulant s-au folosit lingouri de oțel cu greutate cunoscută. Astfel, sarcinile utilizate la efectuarea măsurătorilor experimentale sunt:

$$Q_0 = 20 \text{ KN}, Q_1 = 75 \text{ KN}, Q_2 = 120 \text{ KN}, Q_3 = 148 \text{ KN}.$$

Structura de rezistență analizată, cu dimensiunile secțiunilor transversale prezentate în capitolul 3, paragraful 3.2.2 a fost supusă unor solicitări în regim static, cu sarcini crescătoare până la depășirea sarcini limită. În fig.4.2 sunt prezentate secțiunile explorate pe lonjeroanele I și II. Se precizează faptul că pe lonjeronul II este montată cabina macaragiului și având în vedere acest aspect, notarea secțiunilor în care s-au efectuat măsurătorile s-a făcut în felul următor:

- dacă se privește lonjeronul I cu cabina macaragiului în dreapta, atunci secțiunile notate în fig.4.2 cu SI, SII, SIII sunt de la mijloc spre stânga, iar secțiunile S1, S2, S3 de la mijloc spre dreapta (înspre cabina macaragiului).

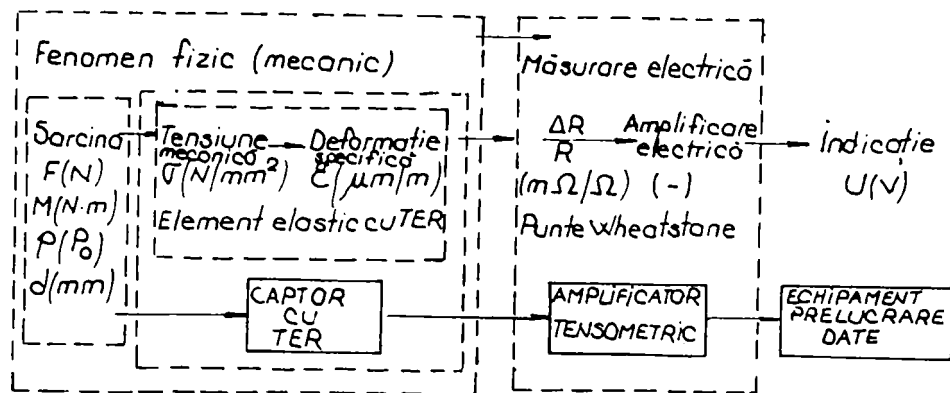


Fig.4.1 Schema bloc aferentă lanțului de măsurare al tensiunilor maxime din structura de rezistență a podului rulant

- dacă se privește lonjeronul II cu cabina macaragiului spre stânga, atunci secțiunea notată în fig.4.2 cu SI* este de la mijloc spre dreapta, iar secțiunea S1* de la mijloc spre stânga.

Se precizează faptul că secțiunile SI* și S1* au fost explorate ca martor, acesta fiind motivul pentru care măsurătorile s-au efectuat numai în două secțiuni. Spre deosebire de acesta, lonjeronul I, pe care nu se află cabina macaragiului a fost explorat în șase secțiuni.

Se precizează că se neglijează greutatea proprie a construcției metalice și a celorlalte mecanisme montate pe pod, iar sarcinile de încărcare se consideră că au punctul de aplicație în centrul geometric al căruciorului podului. Pozițiile mijlocului geometric al căruciorului s-au marcat cu P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, fig.4.2. Prezentarea acestora s-a realizat și în fig.4.3, fig.4.4 și fig.4.5 care prezintă schema reală de lucru din timpul măsurătorilor.

Determinările experimentale s-au făcut în pozițiile P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, cu aplicarea succesivă a sarcinilor Q₀, Q₁, Q₂, Q₃, în ordine crescătoare, de fiecare dată făcându-se înregistrările în secțiunile SI, SII, SIII, S1, S2, S3. În fiecare din cele șase secțiuni în care s-au realizat măsurătorile s-au plasat câte două traductoare tensometrice pe talpa superioară, respectiv inferioară a lonjeronului I pentru care s-au făcut măsurătorile experimentale, la 120 mm de extremitățile aripilor laterale, fig.4.6.

În vederea realizării măsurătorilor electrotensometrice au fost folosite două punți tensometrice pentru care s-au efectuat echilibrări (prin "echilibrare" se înțelege fixarea originii deformațiilor specifice în dreptul traductorului, neglijându-se sarcinile care se găsesc în acel moment pe pod, de exemplu: sarcina permanentă provenind din greutatea proprie și greutatea căruciorului), [73], în modul următor:

- a) Pentru măsurătorile statice cu sarcina Q₀, căruciorul fiind gol, echilibrarea s-a făcut cu sarcina Q₀:
- la lonjeronul I, pentru traductorii tensometrici rezistivi din secțiunile S1, S2, S3, echilibrarea s-a făcut în poziția P1 a sarcinii Q₀;
 - la lonjeronul II, pentru traductorii tensometrici rezistivi din secțiunea S1*, echilibrarea s-a făcut în poziția P1 a sarcinii Q₀;
 - la lonjeronul I, pentru traductorii tensometrici rezistivi din secțiunile SI, SII, SIII, echilibrarea s-a făcut în poziția P5 a sarcinii Q₀;
 - la lonjeronul II, pentru traductorii tensometrici rezistivi din secțiunea SI*, echilibrarea s-a făcut în poziția P5 a sarcinii Q₀;

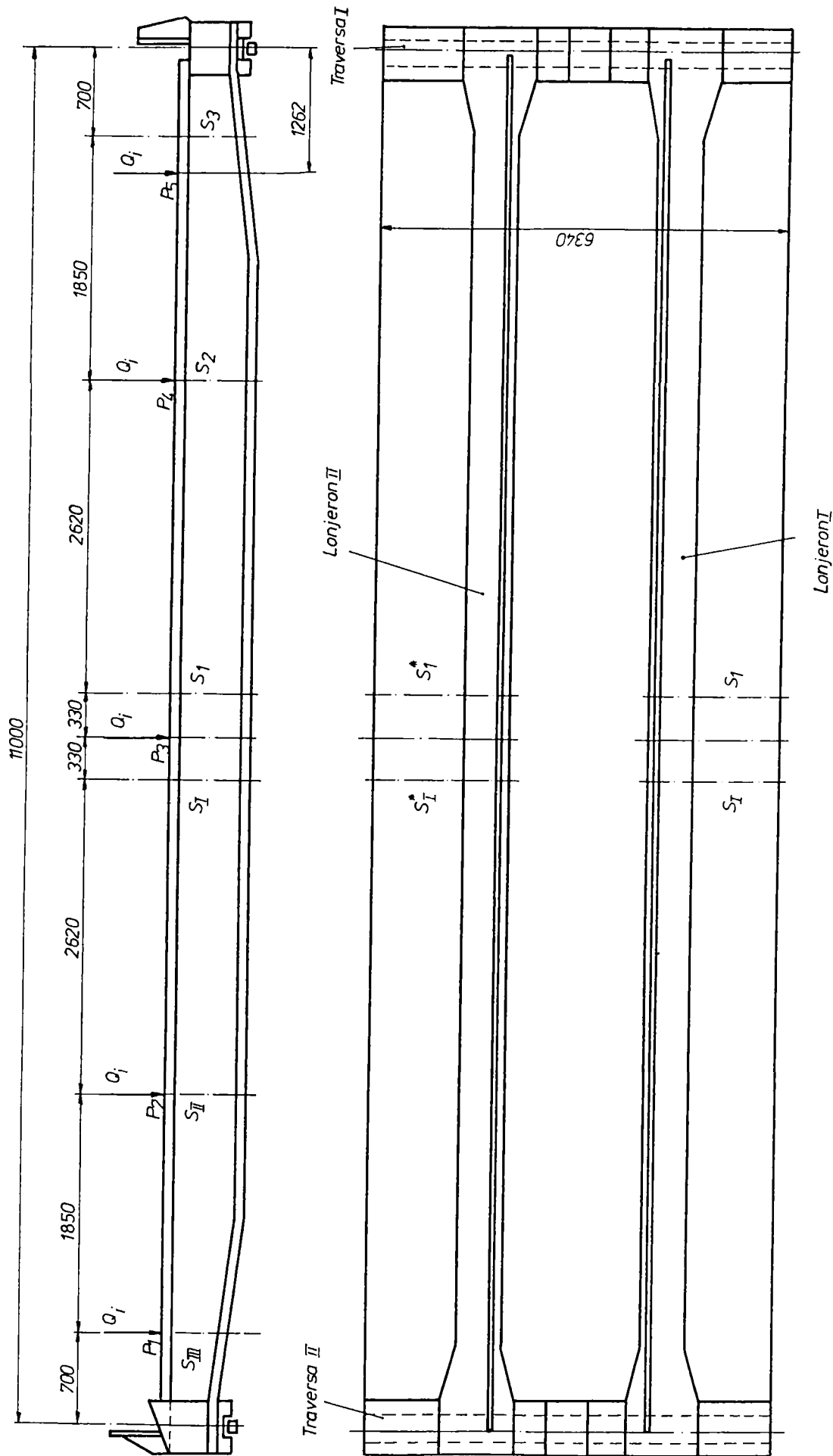


Fig.4.2 Prezentarea secțiunilor explorate pe structura de rezistență a podului rulant



Fig.4.3 Schema reală de lucru în vederea evidențierii poziției de măsurare P_2



Fig.4.4 Schema reală de lucru în vederea evidențierii poziției de măsurare P_3

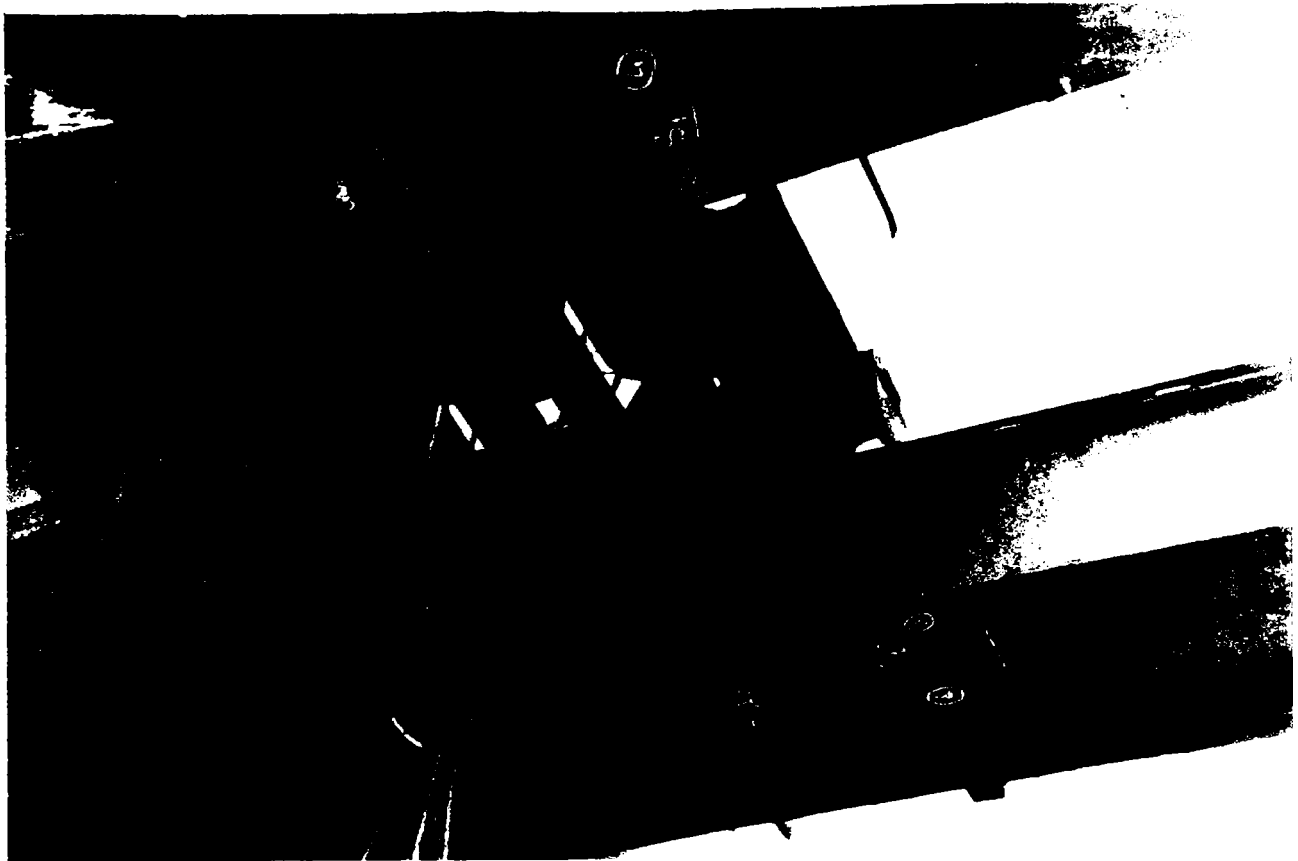


Fig.4.5 Schema reală de lucru în vederea evidențierii secțiunilor S_1 și S_1 pe structura de rezistență a podului rulant

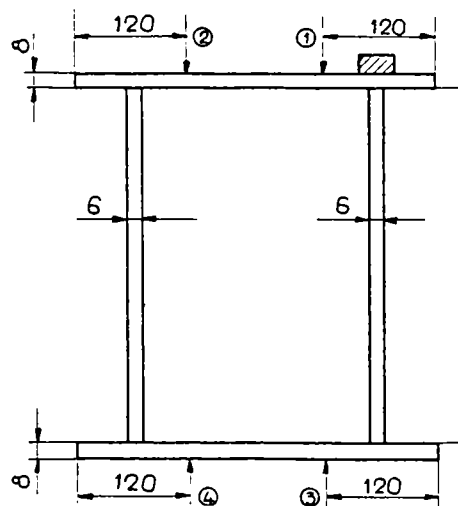


Fig.4.6 Poziționarea traductorilor tensometrici rezistivi pe talpa superioară, respectiv inferioară a lonjeronului I

b) Pentru măsurătorile statice cu sarcinile Q_1 , Q_2 , Q_3 , echilibrarea s-a făcut cu sarcina Q_0 , în poziția în care s-a făcut încărcarea.

Măsurătorile experimentale efectuate au permis:

- trasarea diagramelor de variație a tensiunilor în cele șase secțiuni analizate (SIII, SII, SI, S1, S2, S3);
- trasarea diagramelor de variație a deformațiilor pe lungimea lonjeronului I;

- studiul cantitativ și calitativ al corelațiilor între rezultatele obținute analitic și experimental;
- analiza critică comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin calcul cu ajutorul programului cu elemente finite.

La fiecare treaptă de încărcare s-au măsurat deformațiile specifice cu ajutorul cărora s-au calculat tensiunile normale după direcția „x”, direcție pe care s-au realizat măsurătorile, și care sunt prezentate în anexa A.5. Astfel, pe talpa superioară, respectiv inferioară a chesonului s-au reprezentat tensiunile specifice ținând seama de mărimile măsurate cu traductorii tensometrici rezistivi plasați în punctele 1 și 2, respectiv 3 și 4, iar lateral s-au reprezentat diagramele de variație a tensiunilor specifice în secțiunile laterale ale chesonului, pe baza rezultatelor obținute din valorile mediilor aritmetice ale tensiunilor măsurate, pentru fiecare din cele șase secțiuni analizate. Legenda acestor diagrame pentru diferite poziții ale căruciorului pe podul rulant este următoarea:

- pentru poziția P1 „ _____ „
- pentru poziția P2 „- - - - - „
- pentru poziția P3 „— · — · — „
- pentru poziția P4 „· · · · · „
- pentru poziția P5 „— · — · — „

Aceste diagrame au servit la stabilirea stării de tensiune din talpa superioară, respectiv inferioară a grinzii principale. Analizând aceste diagrame se observă că: traductorii 1 și 2, aparținând părții superioare a chesonului, respectiv 3 și 4 aparținând părții inferioare a acestuia nu înregistrează aceleași valori. Aceasta se poate explica prin existența erorilor de înregistrare inerente oricărei măsurări electrotensometrice. În ceea ce privește distribuția tensiunilor în secțiunea transversală a lonjeronului I s-a evidențiat faptul că distribuția traductoarelor tensometrice rezistive nu a acoperit toate zonele cu tensiuni maxime și de asemenea, s-au efectuat măsurători în ipoteze ne semnificative.

Cu ajutorul datelor experimentale obținute s-au trasat și diagramele de variație a deformațiilor în lungul lonjeronului I, care au fost folosite în studiul stării de deformație a acestuia, anexa A.6.

4.3 STUDIU COMPARATIV ÎNTRE REZULTATELE OBȚINUTE PRIN CALCUL ȘI CELE OBȚINUTE PRIN MĂSURĂTORI EXPERIMENTALE

Comportarea sub încărcări a structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m pe baza calculului de conlucrare spațială, a relevat faptul că adoptarea unui model de calcul a structurii presupune și acceptarea unor ipoteze simplificatoare care conferă rezultatelor analitice un anumit grad de aproximare, dependent de modelul fizic și matematic atașat. În aceste condiții, pentru a verifica justetea ipotezelor admise și implicit validitatea metodei de calcul, se recurge la analiza comparativă între rezultatele determinate prin calcul și cele obținute prin măsurători experimentale. Dacă analiza comparativă se efectuează asupra unui utilaj aflat deja în exploatare de o perioadă mai îndelungată de timp se pot obține informații referitoare la fenomenul complex al comportării sale în timp, pe baza cărora, fie poate fi evaluată siguranța în exploatare a utilajului, fie se pot efectua

optimizări dimensionale în scopul reproiectării acestuia.

Având în vedere aceste aspecte, concluziile studiilor teoretice și experimentale au fost formulate pe baza interpretării comparative a rezultatelor determinate prin calcul analitic pe baza metodei elementelor finite, cu cele obținute în urma măsurărilor electrotensometrice.

În problemele generale de proiectare a unei structuri de rezistență, stabilirea modului în care este evaluat răspunsul structurii la acțiunile ce se exercită asupra sa, dar îndeosebi interpretarea fenomenului complex de comportare a structurii sub încărcări, constituie factori semnificativi de care depind deciziile în ceea ce privește posibilitățile de optimizare a respectivei structuri. În acest sens, caracterizarea din punct de vedere cantitativ a răspunsului structurii de rezistență a podului rulant supus studiului, respectiv evaluarea stării de tensiune dintr-o grindă principală a acestuia, s-a efectuat în prezenta lucrare atât pe baza rezultatelor cercetărilor experimentale, expuse în cap.4, cât și în urma studiilor teoretice întreprinse și detaliate în cap.3.

Pe baza măsurărilor efectuate de fiecare traductor în funcție de diferitele sarcini și diferite poziții ale căruciorului pe podul rulant s-au trasat diagramele de variație a tensiunilor specifice secțiunilor transversale SIII, SII, SI, S1, S2, S3, considerate semnificative, aceste diagrame fiind prezentate în anexa A.5 și diagramele de variație a deformațiilor în lungul lonjeronului I; prelucrarea acestor date experimentale s-a făcut pe calculator, utilizând programul de calcul EXCEL 2000, iar diagramele de variație a acestora sunt prezentate în Anexa A.6.

Ținând seama de aspectele prezentate, în acest paragraf, concluziile studiilor efectuate au fost formulate pe baza analizei comparative între rezultatele determinate experimental și cele obținute analitic, din analiza cu elemente finite. Obiectivele menționate au fost realizate urmărind:

- *aspectul geometric al comportării lonjeronului I*, prin interpretarea calitativă a deformațiilor măsurate, față de cele calculate
- *aspectul fizic al comportării lonjeronului I*, prin studiul corelațiilor între tensiunile obținute experimental și cele determinate analitic.

Studiul comparativ al aspectelor menționate a fost condus în patru ipoteze de încărcare considerate semnificative și anume Q_0 în P_1 , Q_1 în P_2 , Q_2 în P_3 , Q_3 în P_4 .

Analiza calitativă a aspectului geometric a fost efectuată pe baza diagramelor trasate în fig. 4.7 a, b, c, d cu valorile calculate ale deplasărilor nodale obținute din calculul teoretic prezentat în cap.3, paragraful 3.3.4. și valorile experimentale prezentate în anexa A.6, fig.A.6.1, fig.A.6, fig.A.6.10, fig.A.6.15.

Ca element comun al celor două seturi de diagrame se remarcă creșterile semnificative ale deplasărilor verticale în zona de acțiune a forței concentrate, direct aplicată pe structura de rezistență și totodată faptul că variația deplasărilor păstrează, în general, aceeași alură. Această constatare relevă faptul că schema de calcul modelează corespunzător comportarea grinzii sub aspectul rigidităților la deplasare. Din aceleași seturi de diagrame rezultă însă și existența, în dreptul aceluiași secțiuni transversale, a unor diferențe semnificative între înregistrările realizate la nivelul tălpii superioare (în punctele marcate cu 1 și 2, fig.4.6) și cele de la talpa inferioară (marcate cu 3, respectiv 4, fig.4.6). Pentru justificarea acestor diferențe se poate admite ipoteza că între cele patru elemente componente ale secțiunii transversale, realizate sub forma unui cheson închis, se manifestă

fenomenul de conlucrare. Consecințele acestui fenomen ar fi acelea de atenuare a efectului defavorabil al răsucirii cauzată, prin poziția excentrică față de axa verticală de simetrie, de încărcarea provenită din sarcina suspendată în cârlig, transmisă la nivelul superior în punctul 1.

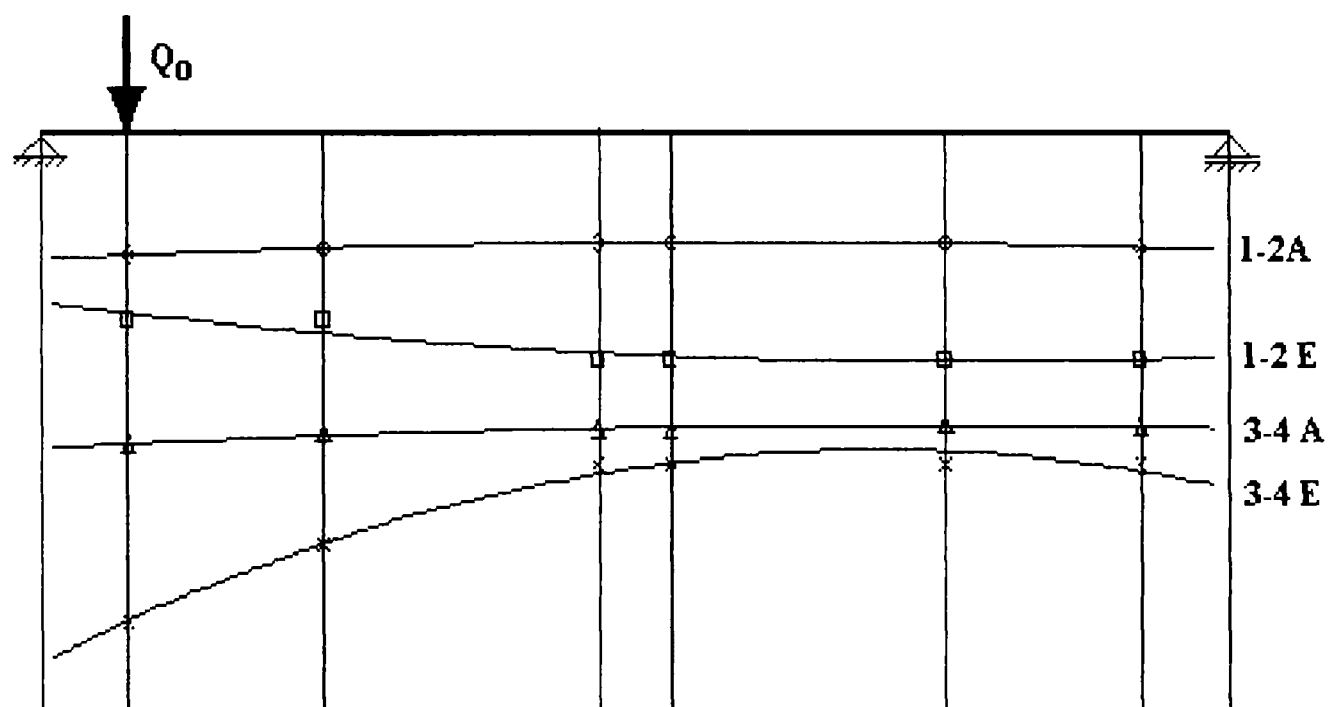


Fig.4.7a. Variația deformației lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_0 in P1

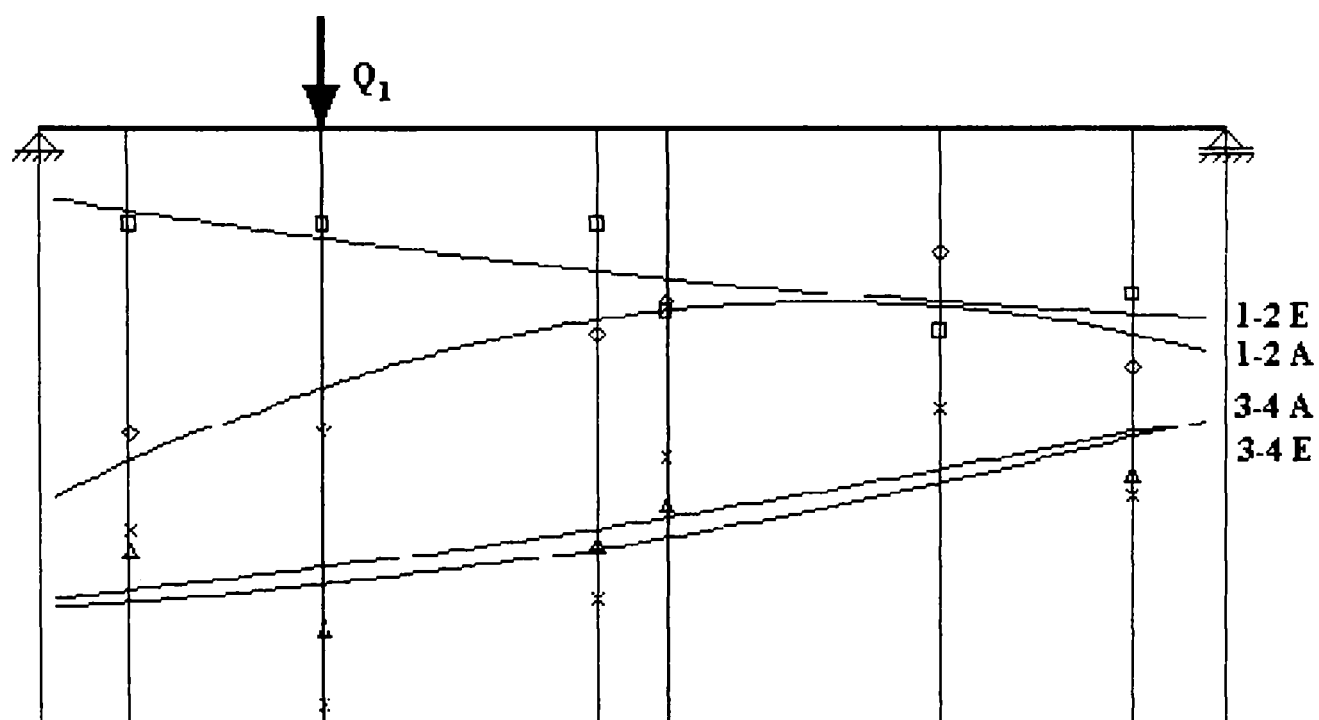


Fig.4.7b. Variația deformației lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_1 in P2

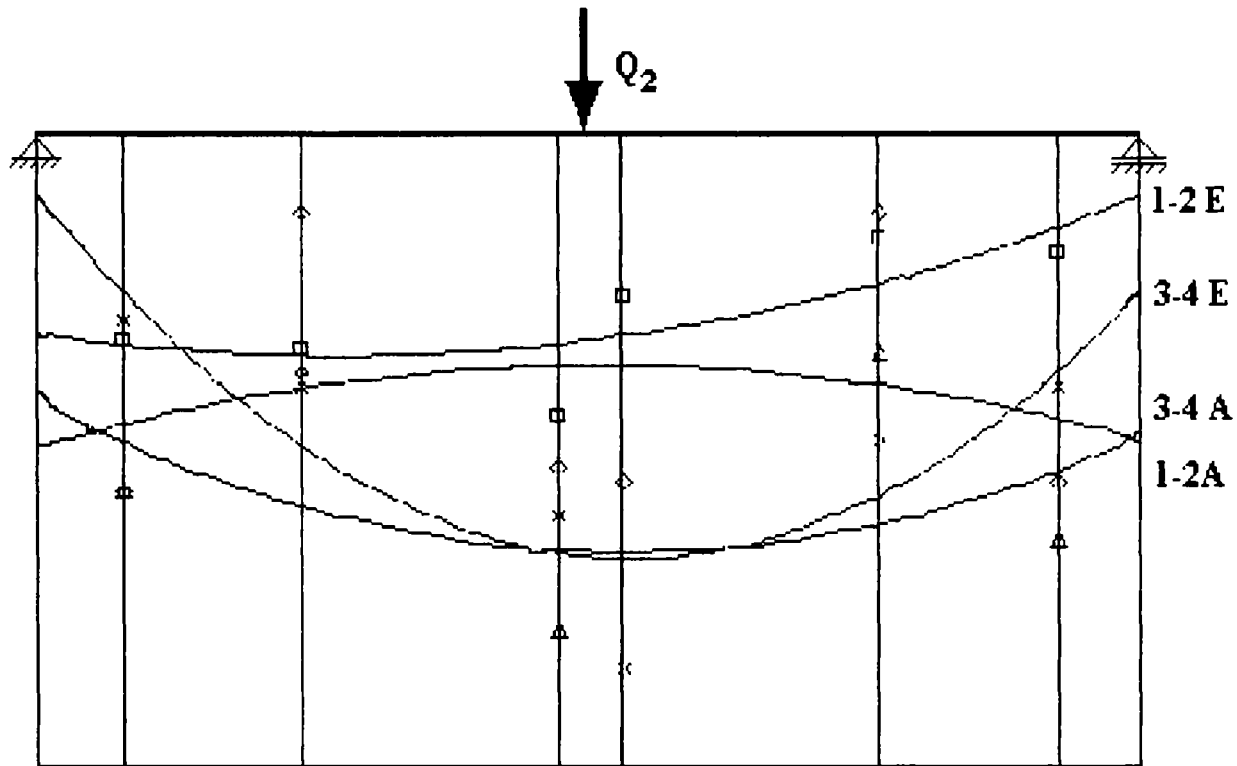


Fig.4.7c. Variația deformației lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_2 in P3

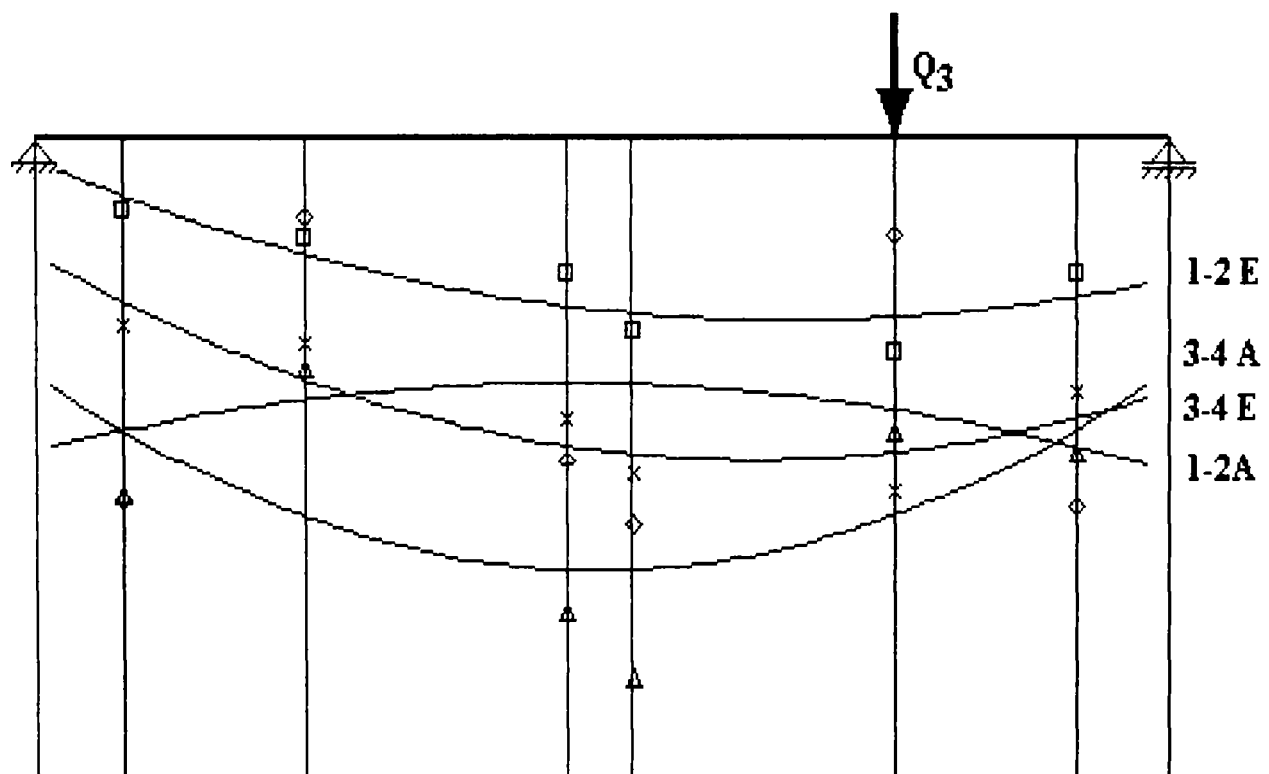


Fig.4.7d. Variația deformației lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_3 in P4

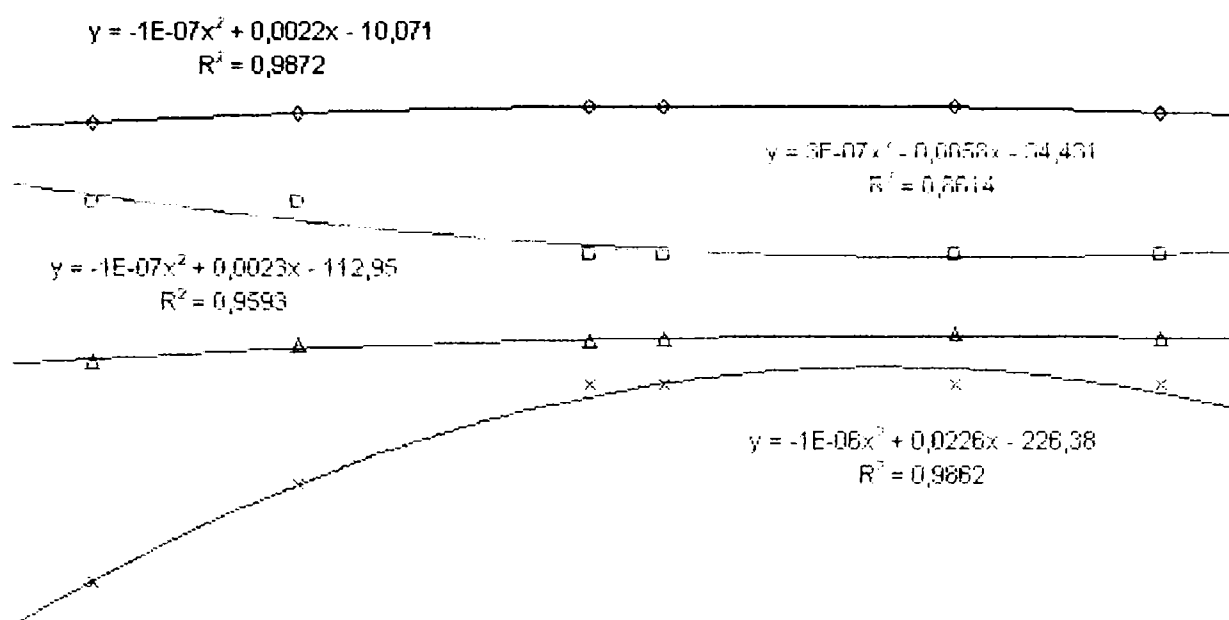


Fig.4.8 a. Variatia tensiuni în lungul lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_0 in P1

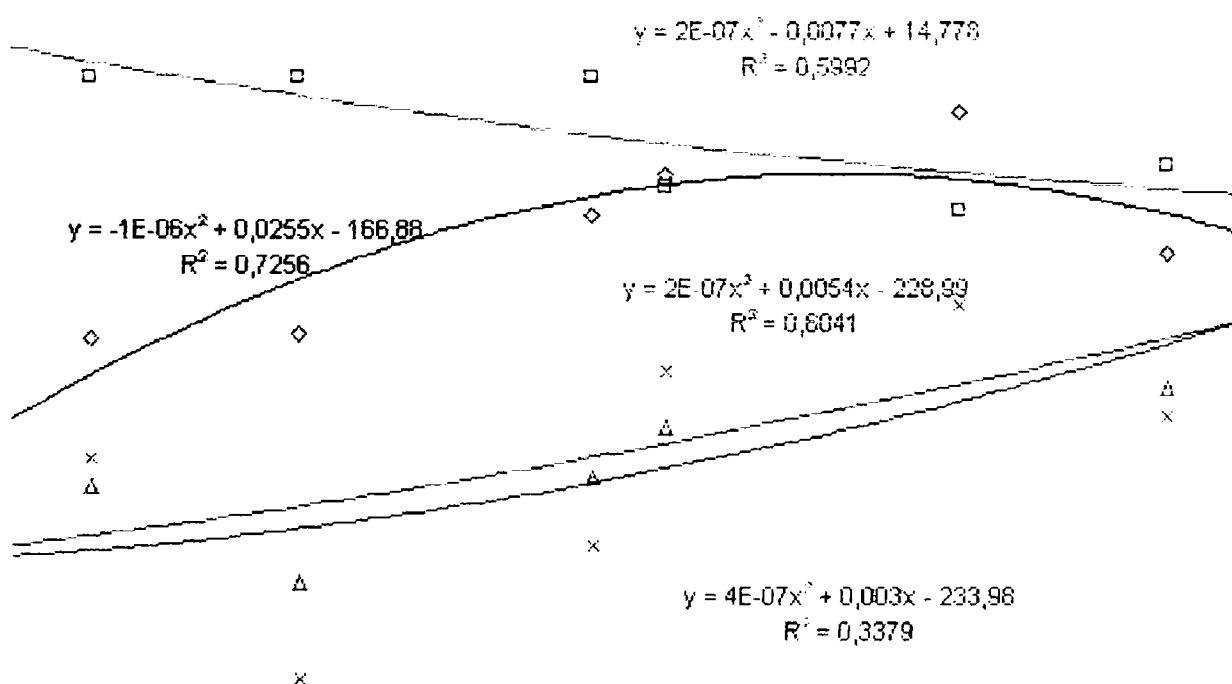


Fig.4.8 b. Variatia tensiuni în lungul lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_1 in P2

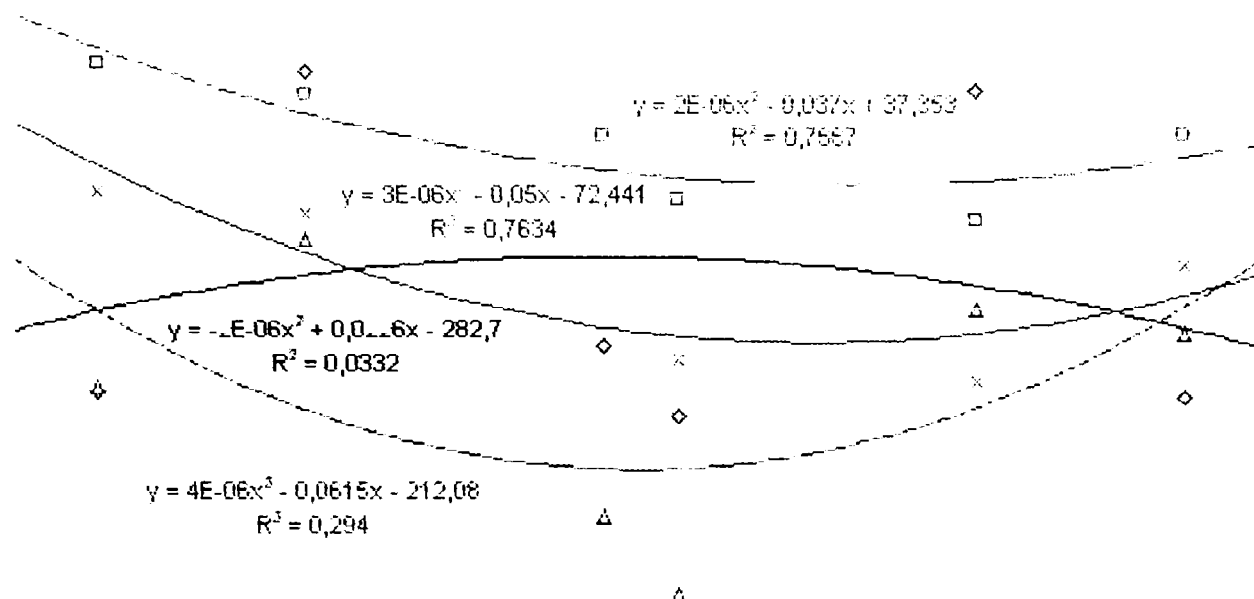


Fig.4.8 c. Variația tensiuni în lungul lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_3 in P3

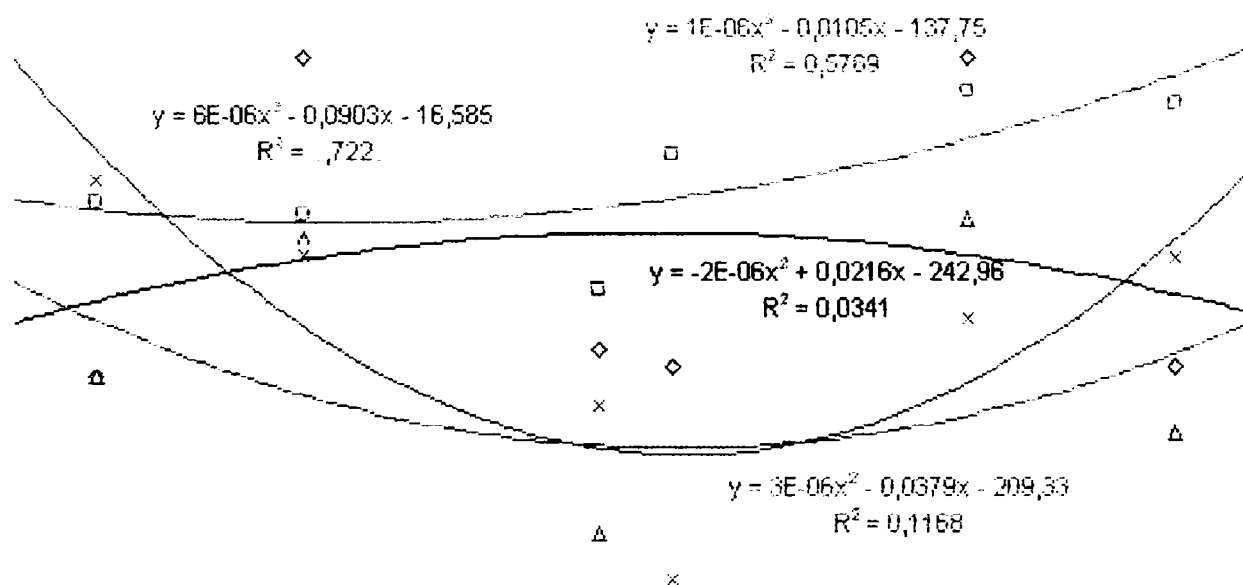
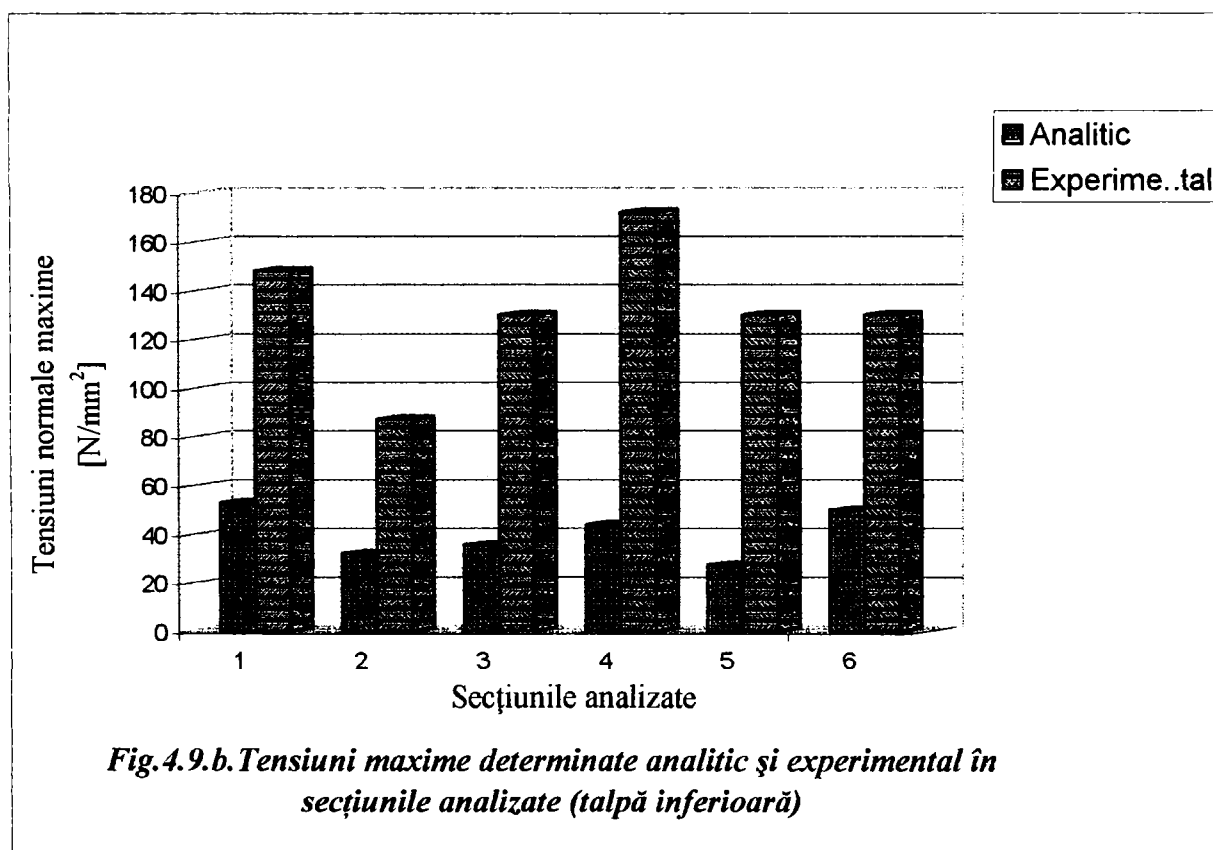
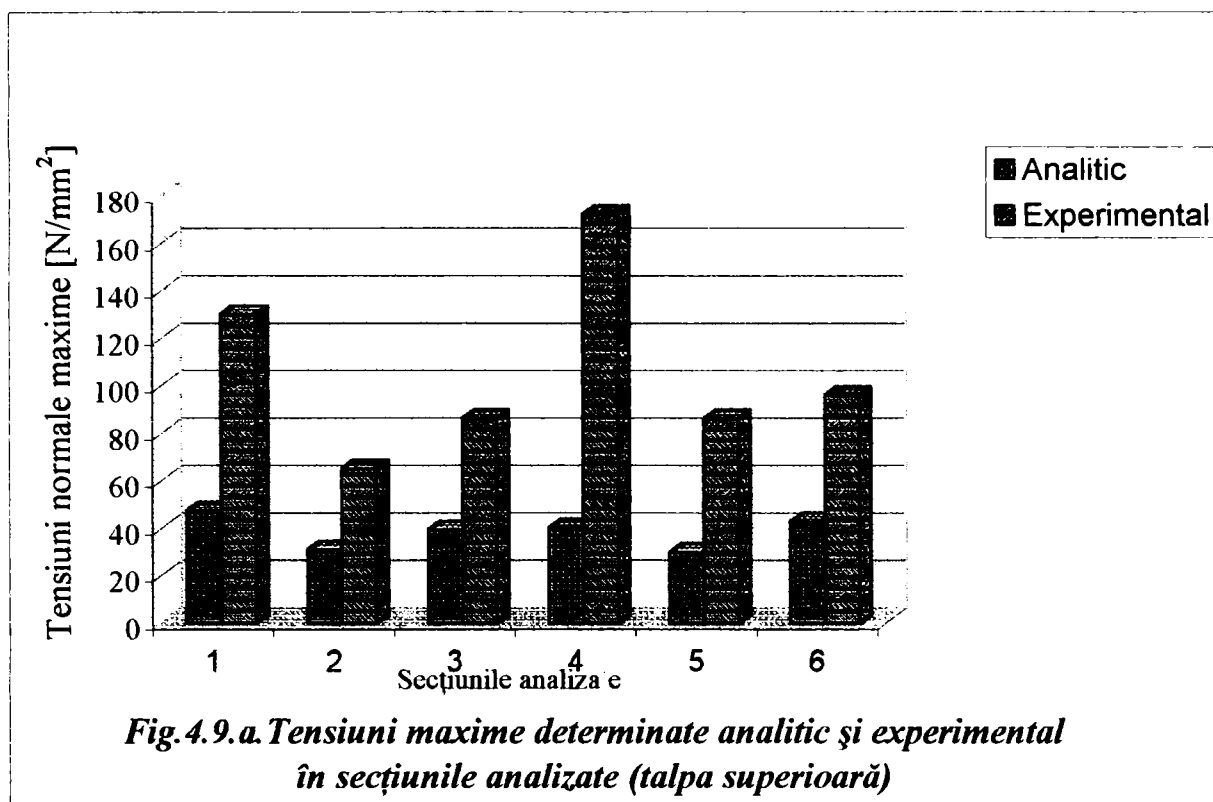


Fig.4.8 d. Variația tensiuni în lungul lonjeronului I pe baza rezultatelor teoretice și experimentale, ipoteza Q_3 in P4



Tabel 4.1

Valori comparative ale tensiunilor maxime obținute analitic și experimental la nivelul tălpilor superioară, respectiv inferioară a lonjeronului I

Nr.crt	Secțiuni	Tensiuni max.(talpa superioară) [N/mm ²]		Tensiuni max.(talpa inferioară) [N/mm ²]	
		Analitic	Experimental	Analitic	Experimental
Ipoteza de încărcare Q₀ în P1					
1.	SIII	37,1	65	41,7	56
	SII	27,9	43	27,8	33
	SI	21,8	56	45,3	49
	S1	39,1	33	30,1	36
	S2	20,0	48	22,7	23
	S3	31,9	76	39,7	48
Ipoteza de încărcare Q₁ în P2					
2.	SIII	51,7	65	57,8	65
	SII	45,5	39	31,1	33
	SI	37,8	46	47,4	51
	S1	49,8	67	30,8	33
	S2	45,7	49	39,7	43
	S3	79,8	86	69,1	76
Ipoteza de încărcare Q₂ în P3					
3.	SIII	47,3	130	52,6	148
	SII	30,7	65	31,7	87
	SI	39,1	86	35,2	130
	S1	40,1	172	43,7	172
	S2	29,6	86	27,1	130
	S3	42,6	96	49,6	130
Ipoteza de încărcare Q₃ în P4					
4.	SIII	89,9	172	88,1	189
	SII	91,7	130	110,6	176
	SI	101,7	143	120,4	130
	S1	107,8	197	81,5	143
	S2	74,6	86	98,7	160
	S3	111,8	172	99,8	150
Ipoteza de încărcare Q₃ în P5					
5.	SIII	97,6	187	151,2	180
	SII	75,7	86	98,7	101
	SI	96,5	172	126,7	172
	S1	101,8	154	99,7	105
	S2	87,4	97	96,6	105
	S3	96,5	150	91,7	147

Aspectul fizic al comportării lonjeronului I a fost analizat pe baza diagramelor trasate în fig.4.8.a,b,c,d obținute cu valorile experimentale și cele rezultate din calculul teoretic ale tensiunilor în fiecare din secțiunile explorate. Alături de curbe sunt evidențiate și ecuațiile analitice ale acestora, obținute prin prelucrarea datelor cu programul de calcul EXCEL 2000.

Comparând alura curbelor tensiunilor experimentale cu cele analitice se constată că diferențele sunt evidente în următoarele cazuri:

- *pe secțiunea transversală*, la nivelul tălpii superioare - fapt ce confirmă ipoteza conlucrării între inimile și tălpile secțiunii cheson.
- *în sensul longitudinal al grinzii*, unde diferențe cantitative remarcabile se observă în deosebi înspre secțiunile transversale din zonele apropiate reazemelor, mai ales în ipotezele de încărcare în care și forțele concentrate sunt poziționate în aceste secțiuni.

Manifestarea acestui fenomen se poate remarca la nivelul ambelor tălpi ale lonjeronului I, fiind pus în evidență prin compararea diagramelor experimentale cu cele teoretice trasate pentru toate ipotezele de încărcare. Astfel, observațiile prezentate conduc la concluzia că, sub aspectul răspunsului la solicitări, lonjeronul I se comportă diferit comparativ cu modelul său fizic adoptat în vederea analizei cu metoda elementelor finite. Această diferență de comportare își poate găsi justificare fie în ipotezele simplificatoare admise, cu privire la acțiuni și grupările acestora, fie în cele privind alcătuirea și rezemarea structurii de rezistență. În prima categorie se pot include simplificările admise la stabilirea punctelor de aplicație ale forțelor concentrate; acestea au fost considerate ca fiind aplicate în pozițiile aferente mijlocului geometric al căruciorului. În realitate forțele provenite din sarcina suspendată în cârlig se transmit prin apăsările maxime pe roți, în secțiunile de contact ale acestora cu șina, iar din a doua categorie se menționează efectele generate de condițiile specifice exploatării utilajului, evidențiate în capitolul 1, paragraful 1.3.

Din analiza comparativă între valorile tensiunilor calculate pe baza metodei elementelor finite, cap.3, paragraful 3.3.4, și cele determinate experimental, prin măsurători electrotensometrice, rezultă deosebiri evidente, atât în ceea ce privește valorile lor curente, cât și în ceea ce privește valorile extreme înregistrate, tabel 4.1. Se observă de asemenea că valorile maxime absolute determinate experimental depășesc valorile tensiunilor rezultate din calcule pentru toate ipoteze de încărcare, atât la nivelul tălpii superioare, cât și la nivelul tălpii inferioare a lonjeronului I. Evidențierea acestui aspect s-a realizat în fig.4.9.a, respectiv fig.4.9.b pentru ipoteza de încărcare Q_2 în P_3 . Această observație relevă faptul că modul de comportare al structurii de rezistență în exploatare diferă de modelul de calcul adoptat, sub aspect cantitativ, adică structura de rezistență este supradimensionată, aceasta prezentând însemnate rezerve de rezistență. Din punct de vedere calitativ însă, structura de rezistență a podului rulant analizat, respectiv modelul de calcul al acesteia se comportă aproximativ identic, ceea ce confirmă validitatea modelului de calcul folosit în studiul teoretic.

Aprecierea comportării în exploatare a structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m s-a efectuat în urma verificării acesteia la starea limită a exploatării normale, în conformitate cu normativele în vigoare, [119], [123], pe baza rezultatelor obținute analitic în cap.3 și experimental în cap.4. Astfel, starea limită a exploatării normale a structurii de rezistență a podului rulant analizat a fost verificată din punct de vedere al tensiunilor și deplasărilor, prin compararea valorilor determinate analitic și experimental, cu cele admisibile, prevăzute în normativele menționate anterior. Rezultatele acestor verificări au evidențiat că, în situația de încărcare considerată pentru podul rulant de 100 KN – 17,3 m, aflat în exploatare în hala unei oțelării dintr-un combinat siderurgic, sunt îndeplinite condițiile stărilor limită ale exploatării normale.

Valorificarea rezultatelor studiilor și cercetărilor experimentale întreprinse, poate fi realizată prin utilizarea acestora atât ca bază în elaborarea programelor de urmărire a comportării în timp a structurii de rezistență a podului rulant, cât și în scopul realizării unor modele fizice mai fidele a structurilor de rezistență reale, în vederea optimizării lor dimensionale având ca scop reproiectarea acestora.

4.4 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Studiile experimentale privind comportarea sub încărcări a structurii de rezistență a podului rulant au avut ca obiectiv determinarea valorică a deplasărilor, corespunzătoare stadiului de solicitare din exploatarea utilajului și determinarea valorile maxime absolute ale tensiunilor pentru toate ipoteze de încărcare considerate, atât la nivelul tălpii superioare, cât și la nivelul tălpii inferioare a lonjeronului I. Acest studiu relevă faptul că modul de comportare al structurii de rezistență în exploatare diferă de modelul de calcul adoptat, sub aspect cantitativ, iar din punct de vedere calitativ acestea se comportă aproximativ identic. Comportarea diferită din punct de vedere cantitativ evidențiază faptul că structura de rezistență a podului rulant aflat în exploatare prezintă însemnate rezerve de rezistență, deci aceasta poate fi supusă operației de optimizare, iar comportarea identică din punct de vedere calitativ confirmă modelul de calcul folosit în studiul teoretic.

În cadrul acestui capitol contribuțiile personale au constat în:

- trasarea diagramelor de variație a tensiunilor în cele șase secțiuni analizate (SIII, SII, SI, S1, S2, S3);
- trasarea diagramelor de variație a deformațiilor pe lungimea lonjeronului I;
- studiul cantitativ și calitativ al corelațiilor între rezultatele obținute;
- analiza critică comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin calcul cu ajutorul programului cu elemente finite.
- verificarea stărilor limită ale exploatării normale pentru structura de rezistență a podului rulant analizat, în conformitate cu normativele în vigoare.

CAPITOLUL 5

STUDII DE OPTIMIZARE A UNOR ELEMENTE COMPONENTE ALE STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PODULUI RULANT DE 100 KN –17,3 m

5.1 OPTIMIZAREA DIMENSIONALĂ A UNEI GRINZI PRINCIPALE DIN STRUCTURA DE REZISTENȚĂ A PODULUI RULANT

În general, proiectarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice și în particular, a podurilor rulante trebuie realizată astfel încât să răspundă unor cerințe multiple, de multe ori antagonice, privind rezistența, rigiditatea, stabilitatea, funcționalitatea, fiabilitatea, consumul de material, posibilitățile de execuție. Această activitate de proiectare se consideră că a fost realizată la cel mai înalt nivel, atunci când **soluția finală** obținută **este cea optimă**. Soluția optimă a unei probleme de proiectare este aceea soluție care conduce la cea mai bună alegere a valorilor variabilelor, în condițiile îndeplinirii tuturor restricțiilor impuse. Obținerea acestei soluții optime rezultă în urma unui proces de optimizare care este condus pe baza metodelor de optimizare (prezentate în subcap.2.2, paragraful 2.2.3) a căror evoluție este stimulată de existența calculatoarelor și a programelor de calcul. Așa cum s-a arătat în cap.2, metodele de proiectare optimă sunt structurate pe metode numerice de calcul, care permit obținerea soluțiilor optime ale diverselor probleme în concepția de proiectare a utilizatorului. Evoluția metodelor de optimizare a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice este stimulată de necesitatea de îmbunătățire continuă a condițiilor de funcționare și exploatare a acestor utilaje, simultan cu cerințele de reducere a dimensiunilor și a greutateii acestora.

Optimizarea elementelor componente ale utilajelor metalurgice reprezintă un domeniu de cercetare căruia până la ora actuală i s-a acordat puțină atenție din partea specialiștilor, datorită numărului mare și a diversității parametrilor ce condiționează proiectarea și realizarea acestora.

Studiul stării de tensiune realizat în această lucrare în cap. 3 și 4 în vederea reducerii greutateii unui pod rulant, proiectat și realizat, a scos în evidență posibilitatea realizării unor soluții de optimizare dimensională în vederea reducerii consumului de material. Astfel, considerând modificarea grosimii pereților secțiunilor transversale de tip cheson, cu păstrarea nemodificată a înălțimii acestora s-au obținut rezultatele prezentate în tabelele și diagramele din acest capitol.

Formularea modelului matematic pentru orice problemă de optimizare (cap.2, paragraful 2.2.1) trebuie să ia în considerare cele trei aspecte de bază: *variabilele de proiectare, restricțiile de proiectare și funcția obiectiv*, considerând cunoscute caracteristicile mecanice ale materialelor și acțiunile exterioare în scopul determinării configurației geometrice și a stării lor mecanice. **În formularea modelului matematic folosit în optimizare, tehnica modelării joacă un rol decisiv în aplicarea practică a rezultatelor** obținute pe baza unui model matematic corespunzător.

Criteriile de optimizare utilizate în practica de proiectare optimală a unei structuri de rezistență sunt: greutatea minimă, prețul de cost minim, greutatea minimă a materialelor de rigidizare, reducerea costului construcției raportat la costul timpului de calcul, etc. În general, *proiectarea optimă* are grade diferite de eficiență în funcție de structurile de rezistență analizate, [75]. În contextul acestei afirmații, la ora actuală se remarcă o răspândire foarte mare a *metodelor de optimizare secvențiale*, care presupun optimizarea riguroasă a elementelor componente ale structurii de rezistență separat de ansamblul din care face parte. Optimizarea riguroasă a acestor elemente nu se poate realiza decât prin efectuarea unei analize cantitative și calitative a comportării structurii din care elementul de rezistență face parte. În concluzie, **una dintre metodele de proiectare optimală pentru structurile continue concrete este metoda elementelor finite**. Pe de altă parte, așa cum s-a arătat în cap.2, la ora actuală nu este posibilă efectuarea unei optimizări de ansamblu care să conducă la o soluție generală capabilă să satisfacă mai multe criterii de optimizare în același timp. Din acest motiv, în cazul structurii de rezistență a podului rulant analizat în această lucrare am abordat problema optimizării la nivelul unei grinzi principale a structurii de rezistență, realizarea optimizării în ansamblul structurii fiind o problemă deosebit de complexă și dificilă, datorită volumului mare de ecuații ce trebuie rezolvate. Astfel, în acest capitol se va realiza o optimizare dimensională a lonjeronului I din structura de rezistență a podului rulant de 100 KN –17,3 m, optimizarea realizându-se cu ajutorul modulului OPTSTAR de care dispune programul de calcul COSMOS/M, versiunea 2.5.

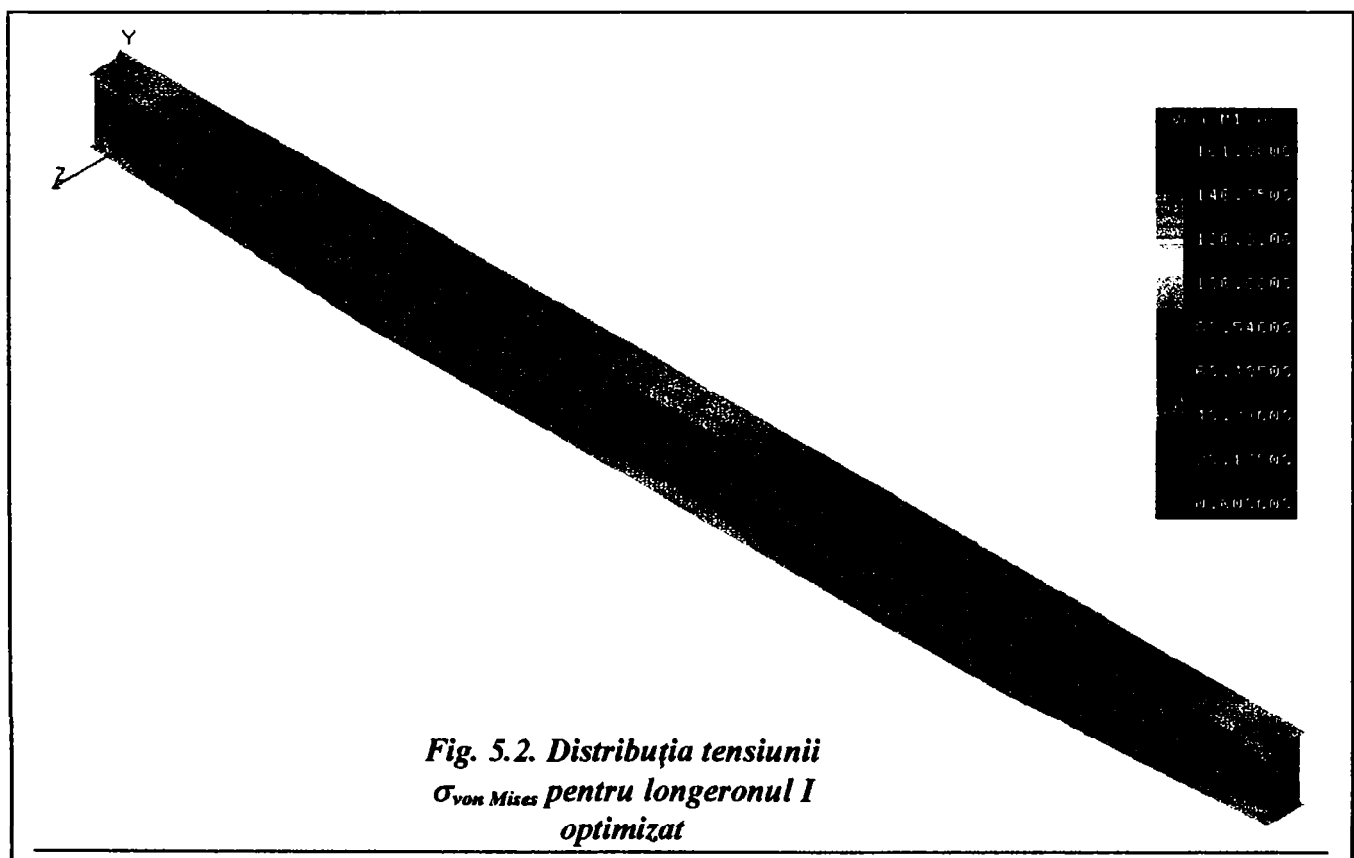
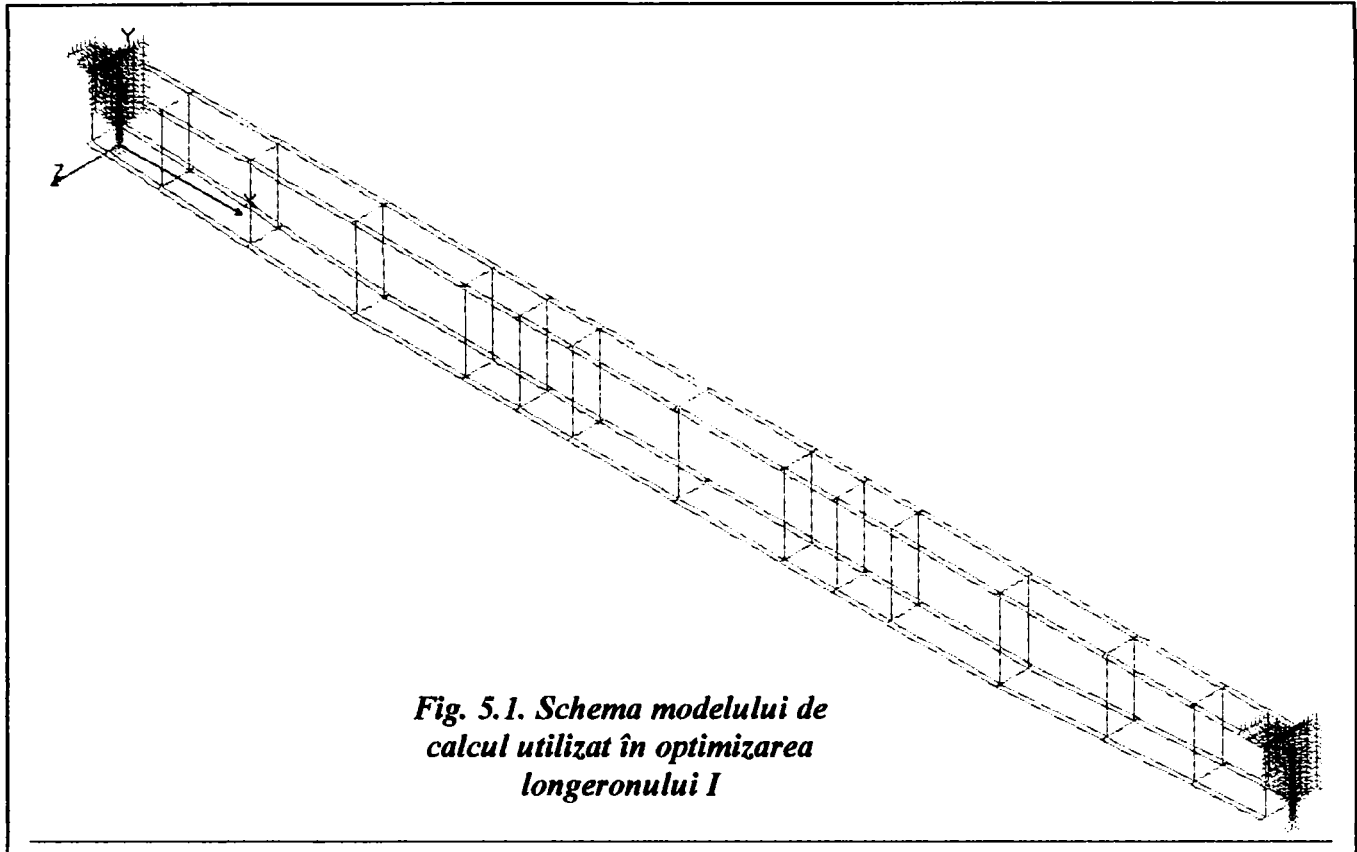
În vederea efectuării operației de optimizare, s-a realizat o modelare a lonjeronului I, modelare în care s-a respectat configurația geometrică și încărcările acestuia, prezentate detaliat în cap.3, paragraful 3.2.2. Schema modelului de calcul utilizat în optimizarea lonjeronului I este prezentată în fig.5.1, iar modul de organizare al datelor de intrare în vederea optimizării s-a prezentat în anexa A.7. În optimizare, parametrii de proiectare se consideră necunoscute și se determină din condiția ca greutatea lonjeronului să fie minimă, în condițiile nedepășirii restricțiilor de proiectare. Astfel, în formularea matematică concretă a problemei de optimizare a lonjeronului I s-au considerat:

variabile de proiectare - grosimea tablei din care este confecționat lonjeronul, $\delta_{min} < \delta < \delta_{max}$,
restricțiile de proiectare - tensiunea echivalentă specifică modificatoare de formă $\sigma_{von Mises} < \sigma_{adm}$,
funcția obiectiv – greutatea totală a lonjeronului $G = G_{min}$.

Rularea programului de calcul s-a realizat pentru mai multe variante, considerând pentru tălpi și inimi, grosimi diferite. Astfel s-au făcut rulări ale programului pentru grosimi de: 7,5 mm; 6 mm; 5,5 mm pentru tălpi, respectiv 5,5 mm pentru inimile laterale. Astfel, variantele de optimizare au fost:

- **varianta 2** pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 7,5\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 6\ mm$;
- **varianta 3** pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 7,5\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 5\ mm$;
- **varianta 4** pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 6\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 6\ mm$;
- **varianta 5** pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 6\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 5\ mm$;
- **varianta 6** pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 5,5\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 6\ mm$;
- **varianta 7** pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 5,5\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 5\ mm$;

Varianta 1 a fost considerată varianta originală pentru care $\delta_{t\ sup} = \delta_{t\ inf} = 8\ mm$ și $\delta_{i\ lat} = 6\ mm$.



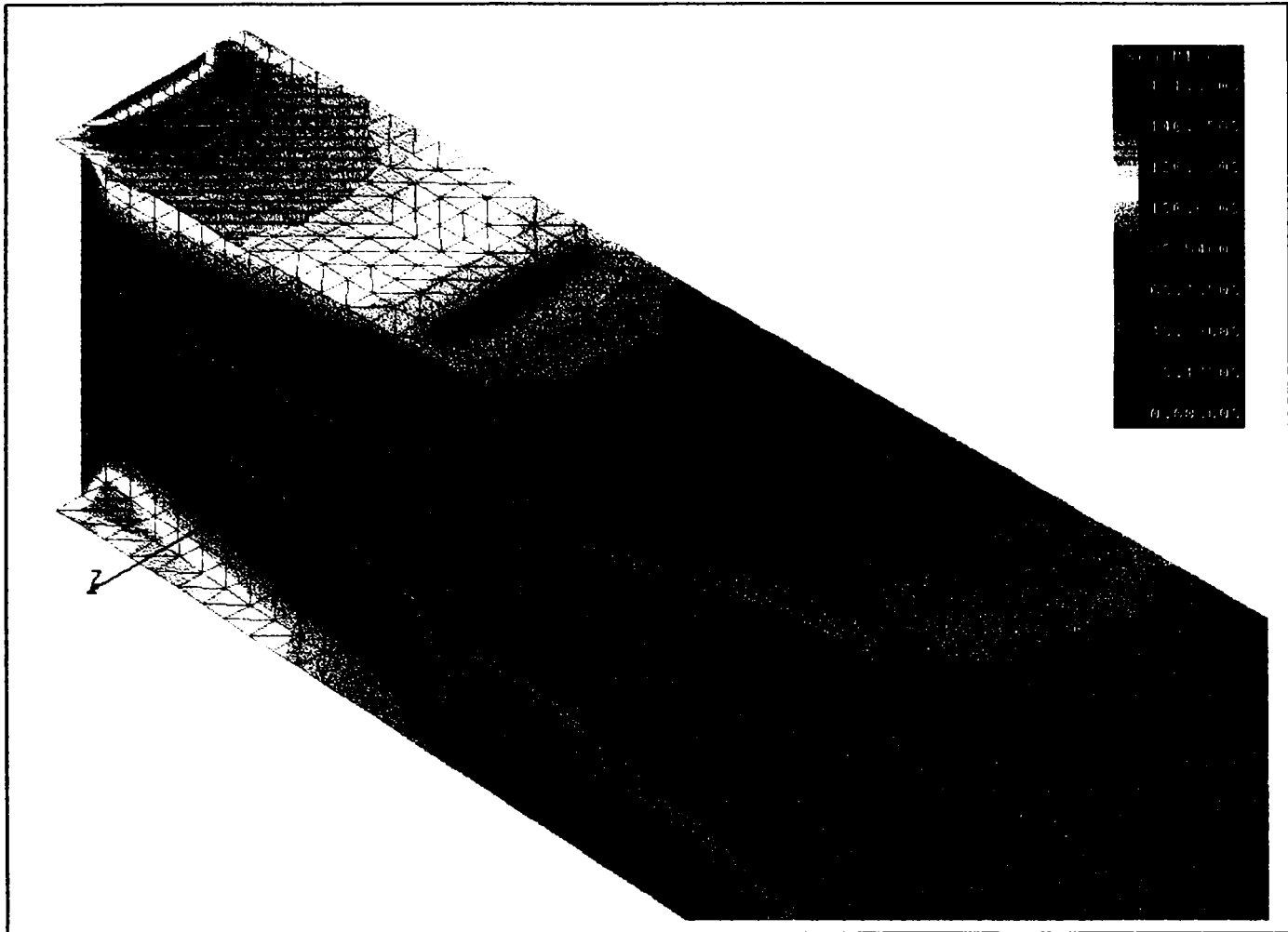


Fig. 5.3. Detaliu privind distribuția tensiunii $\sigma_{Von Mises}$ pentru longeronul I optimizat în zona de îmbinare cu traversa II

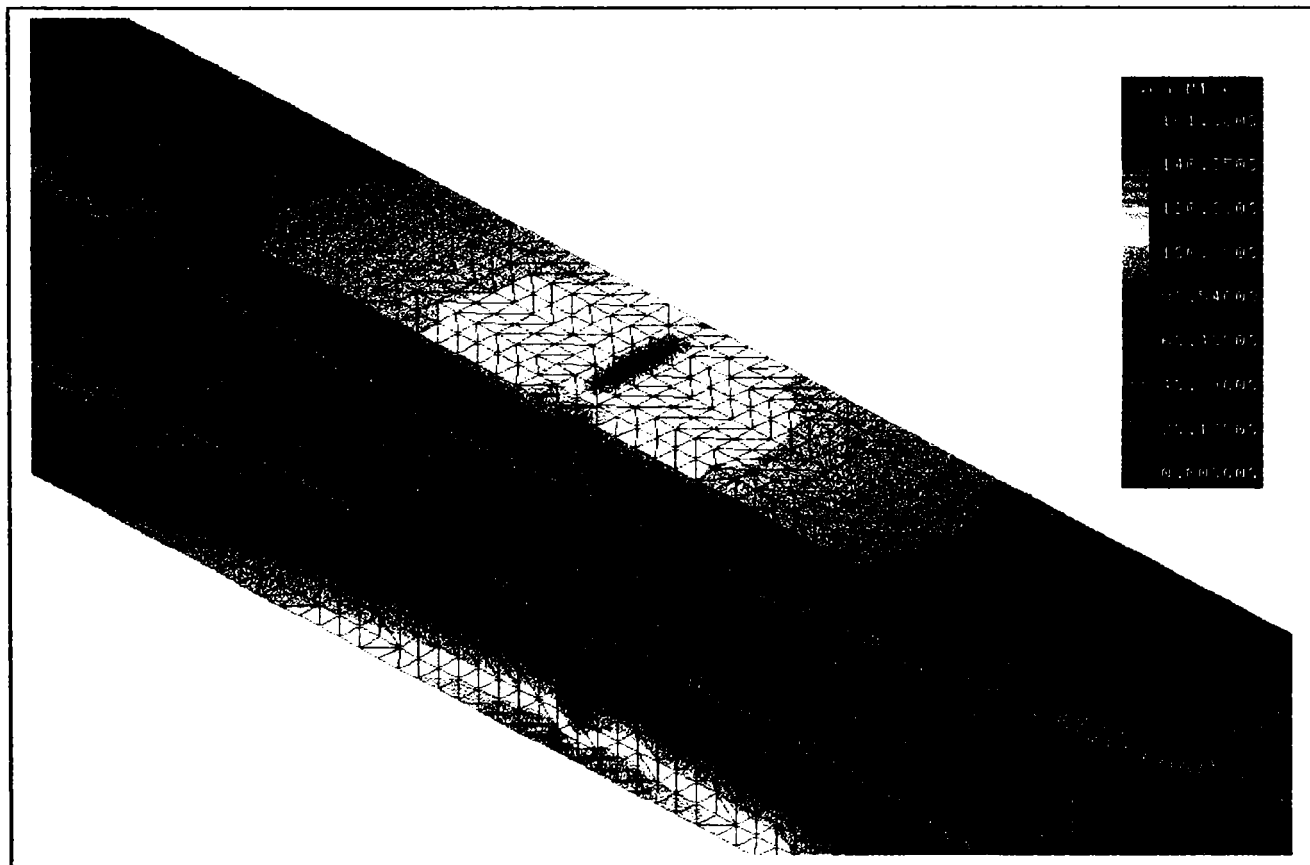


Fig. 5.4. Distribuția tensiunii $\sigma_{Von Mises}$ pentru longeronul I optimizat la mijlocul deschiderii

Tabel 5.1

Valorile tensiunilor maxime în tălpile superioare și inferioare ale lonjeronului I pentru diferite grosimi „ δ ”

Zona analizată	Elementul de rezistență optimizat		Grosime tablă δ [mm]			
			8	7,5	6	5,5
			$\sigma_{\text{von Mises}}$ [N/mm ²]	$\sigma_{\text{von Mises}}$ [N/mm ²]	$\sigma_{\text{von Mises}}$ [N/mm ²]	$\sigma_{\text{von Mises}}$ [N/mm ²]
Mijlocul deschiderii lonj. I	Talpa superioară	1	100,37	127,69	139,81	151,78
		2	78,36	95,78	107,61	120,11
	Talpa inferioară	3	89,023	120,97	112,78	143,78
		4	91,31	117,65	121,96	123,25
Îmbinare lonj. I cu traversa I	Talpa superioară	1	87,73	138,12	147,12	159,74
		2	133,99	109,17	111,34	156,85
	Talpa inferioară	3	108,94	134,72	139,9	153,71
		4	169,00	121,6	141,78	161,8

Tabel 5.2

Valorile tensiunilor maxime în diverse noduri ale inimilor laterale ale lonjeronului I pentru diferite grosimi „ δ ”

Zona analizată	Grosime tablă δ [mm]	
	6	5,5
	$\sigma_{\text{von Mises}}$ [N/mm ²]	$\sigma_{\text{von Mises}}$ [N/mm ²]
Mijlocul deschiderii lonjeronului I	50,34	60,87
	40,67	80,91
	31,003	47,6
	32,29	48,9
	30,9	80,54
Îmbinare lonj. I cu traversa I	168,90	161,08
	88,06	97,8
	128,56	134,57
	68,9	87,6

În tabelul 5.1 se prezintă valorile tensiunilor echivalente von Mises pentru patru variante de optimizare pentru care s-a menținut constantă grosimea inimilor laterale și s-au făcut modificări ale celor două tălpi ale lonjeronului I, (variantele analizate fiind 1, 2, 4, 6), iar în tabelul 5.2 se prezintă valorile tensiunilor echivalente von Mises la nivelul lonjeronului I, în câteva noduri considerate semnificative, aparținând mijlocului deschiderii lonjeronului I, respectiv zonei de îmbinare dintre lonjeronul I și traversa I. În acest tabel sunt prezentate comparativ varianta originală (varianta 1) și varianta 7 de optimizare, valorile tensiunii echivalente von Mises aparținând la cinci noduri

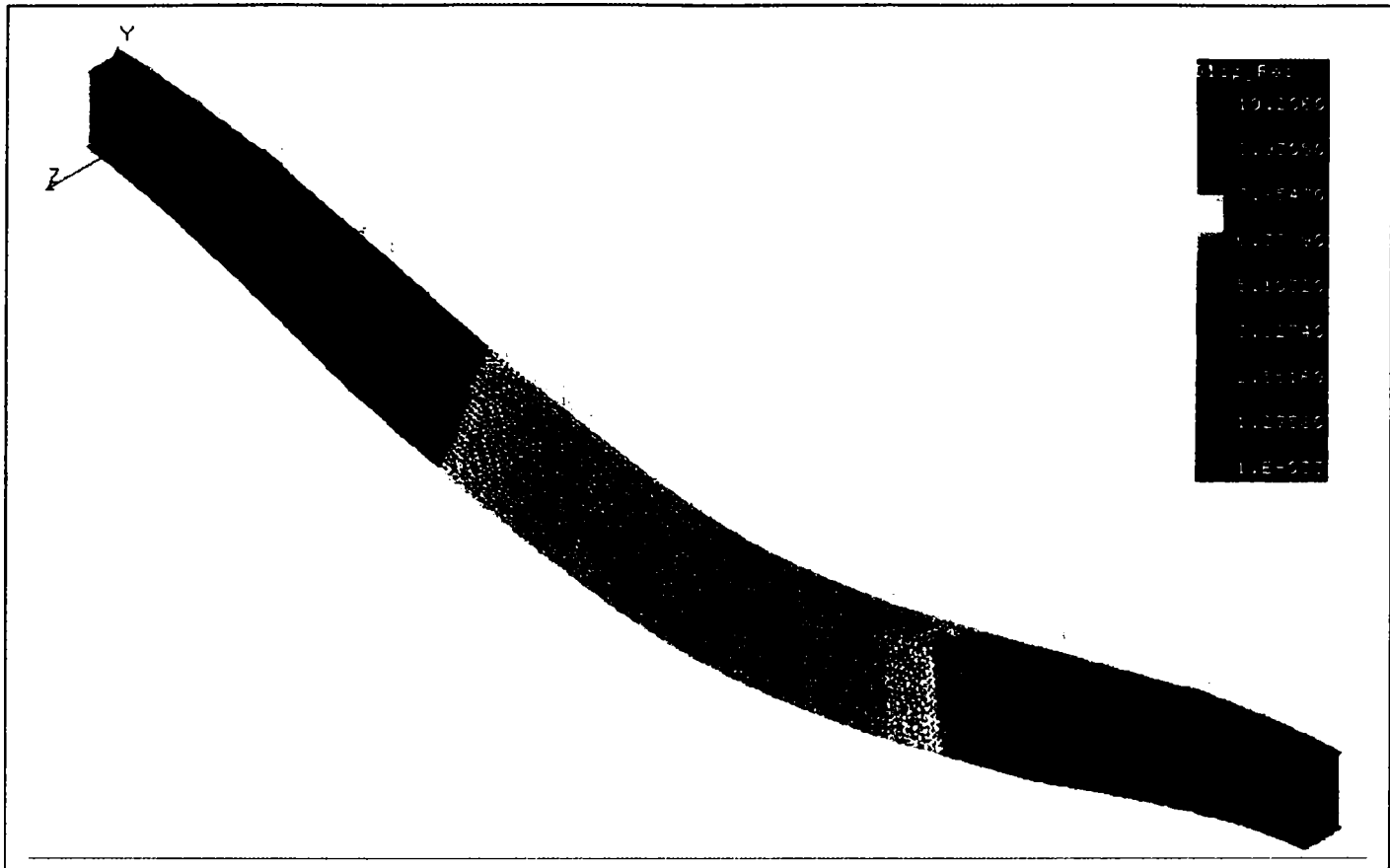


Fig. 5.5. Distribuția deplasărilor rezultante pe longeronul I optimizat

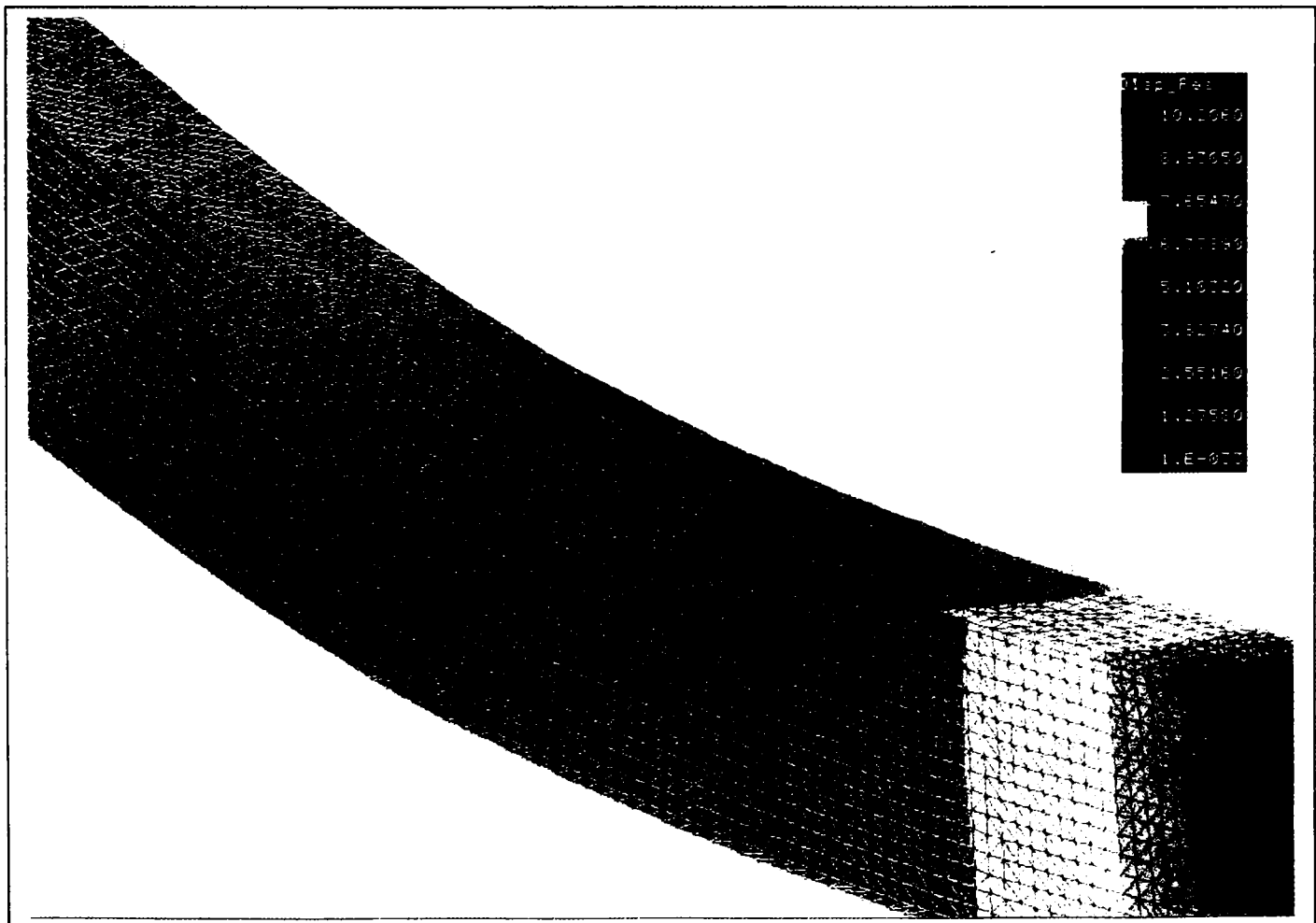


Fig. 5.6 Detaliu privind deplasările rezultante pe longeronul I optimizat, la mijlocul deschiderii

succesive situate pe inima laterală exterioară a lonjeronului I, din zona de mijloc a deschiderii acestuia, respectiv pentru zona de îmbinare dintre lonjeronul I și traversa I, pentru patru noduri succesive aparținând muchiei de îmbinare dintre cele două. Din analiza rezultatelor prezentate în aceste tabele se observă că valorile tensiunilor echivalente modificatoare de formă cresc pe măsură ce se reduce grosimea tălpilor chesonului.

În urma studierii rezultatelor obținute s-a observat că dimensiunea minimă până la care se poate reduce grosimea tălpilor și a inimilor este 5,5 mm, respectiv 5 mm. Pentru această variantă de optimizare tensiunea echivalentă specifică modificatoare de formă determinată la nivelul lonjeronului I se încadrează între limitele 20,135 N/mm² și 161,08 N/mm², fig.5.2. Analizând detaliat valorile acestei tensiuni la nivelul lonjeronului I optimizat, se observă că se înregistrează valori extreme în zonele de îmbinare cu traversele, fig.5.3, respectiv la mijlocul deschiderii acestuia, fig.5.4. După cum se observă din aceste figuri, la extremitățile lonjeronului, în zonele de îmbinare cu traversele, atât la nivelul tălpii superioare, cât și la nivelul tălpii inferioare, tensiunea echivalentă von Mises are valoarea de 161,08 N/mm², iar în ceea ce privește mijlocul deschiderii acestuia, se observă că s-au obținut valori extreme la nivelul aripilor chesonului de 143,78 N/mm² (extremitățile laterale ale tălpii inferioare), respectiv la îmbinarea dintre talpa superioară și inima laterală exterioară a acestuia de 151,74 N/mm².

În ceea ce privește deplasările rezultante, se observă că valoare extremă obținută după efectuarea optimizării, pentru varianta considerată, este de 10,20 mm, înregistrată la mijlocul deschiderii lonjeronului I, fig.5.5 și fig.5.6.

Analizând distribuția rezultatelor pentru tensiunea echivalentă $\sigma_{\text{von Mises}}$ obținute prin optimizare cu cele înregistrate experimental, considerând structura de rezistență încărcată cu sarcina Q_2 , se observă o diferență de maxim 10% între acestea, acest fapt confirmând modelul de calcul folosit în modelare, fig.5.7.

Vom calcula în continuare care este economia de material obținută în urma acestei optimizări. Pentru aceasta se determină greutatea lonjeronului I cu relația 5.1, înainte de optimizare și după efectuarea acestei operații.

$$G = g \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^4 A \cdot l_i \quad (5.1)$$

în care: G – greutatea totală a lonjeronului, [kg];

g – accelerația gravitațională, [m/s²];

A – aria secțiunii transversale a unui element component al lonjeronului, [m²];

l – lungimea lonjeronului, [m];

ρ - densitatea materialului, [kg/m³].

În urma efectuării acestui calcul, s-a obținut o reducere a greutății lonjeronului I de aproximativ 8,46 %, pentru varianta 2 de optimizare și 20,6 % pentru varianta 7.

În fig.5.8 se prezintă variația tensiunii echivalente maxime dintr-un element situat la mijlocul deschiderii lonjeronului I, pe talpa inferioară, în apropierea îmbinării cu inima laterală, în funcție de greutatea G a întregii structuri și în funcție de reducerea greutății ΔG .

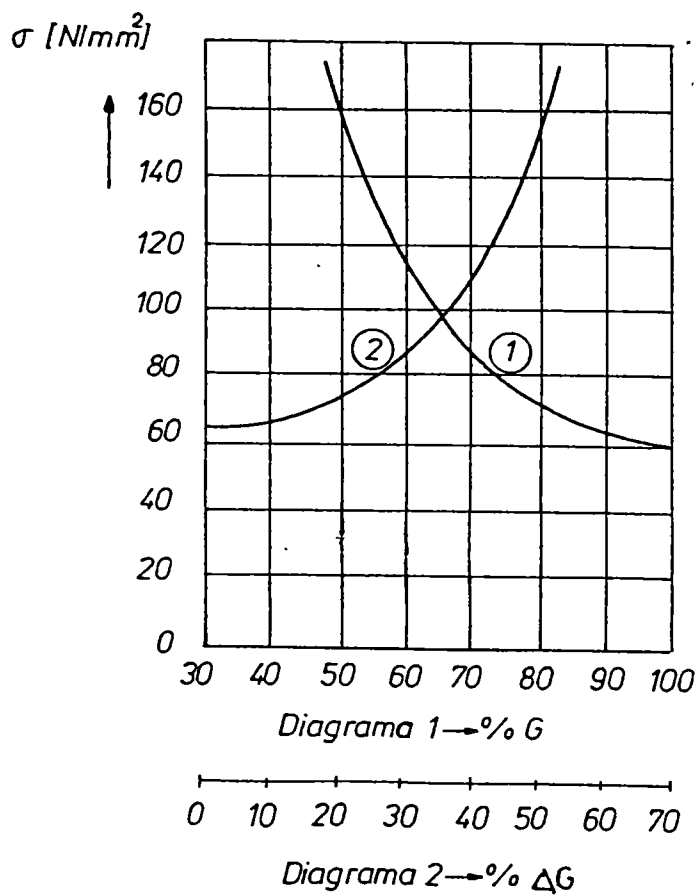
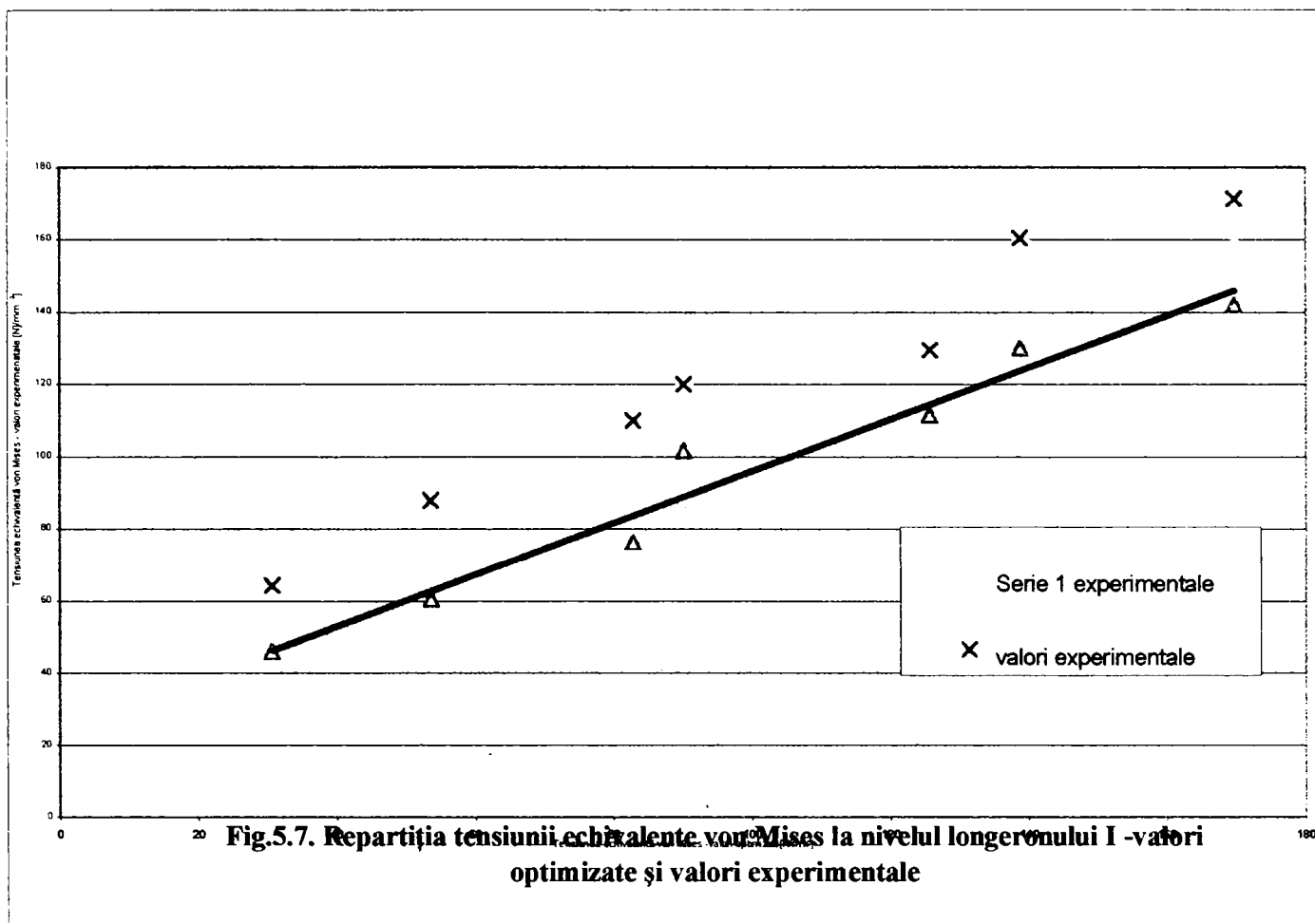


Fig. 5.8 Variația tensiunii echivalente maxime dintr-un element situat la mijlocul deschiderii lonjeronului I

Comparând valorile tensiunii echivalente $\sigma_{\text{von Mises}}$ la nivelul lonjeronului I înainte de optimizare și după efectuarea acesteia, s-a observat că:

a) Înainte de efectuarea optimizării s-au obținut valori maxime ale acestei tensiuni la mijlocul deschiderii lonjeronului I, la nivelul tălpii superioare, la o extremitate a aripilor chesonului, fig 3.25, zonă pentru care și după optimizare tensiunea echivalentă von Mises are tot valoare maximă, fig.5.4;

b) Se observă că prin reducerea grosimii tălpiilor, respectiv a inimilor, se obține o creștere a tensiunii echivalente;

c) Altă zonă pentru care se înregistrează valori maxime ale tensiunii echivalente este cea de la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I, înainte de optimizare pentru această zonă s-a obținut pentru tensiunea echivalentă $\sigma_{\text{von Mises}}$ valoarea maximă de $182,89 \text{ N/mm}^2$, iar după optimizare valoarea maximă este de $161,08 \text{ N/mm}^2$. Faptul că, după optimizare s-a obținut valoare inferioară celei obținută înaintea efectuării acesteia se explică prin aceea că, în primul caz acest vârf de tensiune s-a datorat efectului de concentrare al tensiunilor la îmbinarea dintre lonjeronul I și traversa I, iar la optimizare lonjeronul I s-a considerat separat de restul structurii de rezistență.

d) Din punct de vedere al deplasărilor rezultante, acestea au valori mai mici după optimizare, decât valorile obținute prin calcul în cap.3. Aceasta se explică prin faptul că o influență deosebită în generarea diferențelor valorice specificate anterior, poate să provină din efectul izolării lonjeronului I de restul structurii podului, cu modelarea insuficient de precisă a condițiilor de rezemare. În acest sens se remarcă faptul că lonjeronul I studiat, prezentat în fig.3.2, alcătuiește împreună cu lonjeronul II și cu traversele podului rulant un cadru orizontal închis, având rigiditățile de nod dependente de rigiditățile barelor concurente. În aceste condiții grinda principală supusă investigațiilor poate fi considerată ca având reazeme de tipul încastrărilor elastice, deplasările și rotațiile nodale permise de un astfel de reazem, determinându-se printr-un calcul suplimentar.

e) Comparând valorile tensiunilor von Mises obținute după optimizare la nivelul lonjeronului I cu valorile stărilor limită ale exploatarei normale, determinate conform normativelor în vigoare, se observă că rezultatele nu depășesc valorile admisibile.

f) Pe baza concluziilor comparative formulate se observă că, comportarea modelului lonjeronului I considerat separat de structura de rezistență se deosebește doar cantitativ de comportarea structurii reale, iar din punct de vedere calitativ cele două se comportă identic. Comportarea cantitativă diferită se explică pe baza concluziilor formulate la punctele c și d, astfel, modelul obținut permite efectuarea unor cercetări teoretice care să poată fi utilizate pentru optimizarea structurilor de rezistență.

g) Din punct de vedere teoretic, varianta 7 este cea optimă, însă nu și din punct de vedere al tehnologiei de execuție, deoarece aceasta nu se adaptează la posibilitățile de fabricație ale întreprinderilor producătoare de tablă din care se confecționează lonjeroanele structurilor de rezistență ale podurilor rulante. Mai mult decât atât, conform STAS 8290-83 se recomandă ca în cazul grinzilor principale ale structurilor de rezistență ale acestor utilaje, grosimea tălpiilor să fie cu 2 mm mai mare decât grosimea inimilor, dar nu mai mult de 2,5 ori grosimea acesteia. În acest context, adoptăm ca variantă optimizată a lonjeronului I al podului rulant, varianta în care tălpile

superioare au grosimea de 7,5 mm, respectiv inimile laterale 5, 5 mm.

h) Pentru varianta 7 de optimizare economia de material este de 20,6 %, iar pentru varianta 2 8,64 %.

În scopul reducerii greutateii structurii de rezistență se poate recurge și la alte soluții de optimizare care se referă la: variația înălțimii grinzii sau variația lățimii tălpilor, aceste variante constituind recomandări cu privire la studiile de optimizare viitoare care se pot realiza pe baza cercetărilor efectuate în această lucrare.

5.2 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Considerând modificarea grosimilor pereților secțiunilor transversale de tip cheson a lonjeronului I a structurii de rezistență a podului rulant, cu păstrarea nemodificată a înălțimii secțiunilor, s-a realizat din punct de vedere teoretic o reducere substanțială a greutateii acestuia, de aproximativ 20,6 %, iar din punct de vedere practic, luând în considerare și tehnologia de fabricație a tablelor din care se confecționează chesoanele și normativele în vigoare, o reducere de 8,46 %, fără a depăși rezistență admisibilă a materialului.

În acest capitol contribuțiile personale au constat în:

- realizarea concretă a optimizării pentru lonjeronul I a structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN –17,3 m;
- analiza critică asupra optimizării efectuate.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DE REZISTENȚĂ ALE UTILAJELOR METALURGICE

În construcția utilajelor metalurgice, alinierea la normele interne și internaționale privind comportarea structurilor de rezistență ale acestor utilaje sub acțiunea încărcărilor din exploatare, alături de alte direcții cum sunt: îmbunătățirea fiabilității globale a utilajului, identificarea corectă a zonelor de maximă solicitare, creșterea calității proiectării prin folosirea unor metode de calcul moderne, degrevarea bugetului de timp al proiectantului prin aplicarea pe scară largă a metodei elementelor finite, reducerea la minim a determinărilor experimentale, deosebit de complexe și costisitoare, realizarea optimizării în faza de proiectare, constituie probleme de strictă actualitate în acest domeniu.

În acest context, studiile și cercetările efectuate în teza de doctorat au avut ca scop analiza comportării în timp a structurii de rezistență a unui utilaj metalurgic, în vederea cunoașterii stării de tensiune și deformație, precum și optimizarea structurii de rezistență a utilajului în vederea reproiectării acestuia, iar rezultatele finale obținute putând fi utilizate în proiectarea altor structuri de rezistență ale diverselor utilaje. În acest sens, au fost analizate numeroase titluri bibliografice din domeniu și au fost efectuate studii teoretice și cercetări experimentale pentru a putea analiza sub diverse aspecte domeniul studiat, așa cum rezultă din conținutul lucrării.

Obiectul acestei lucrări a pornit de la ideea că în general structurile de rezistență static nedeterminate, dimensionate și verificate prin metodele clasice ale rezistenței materialelor conduc de cele mai multe ori la supradimensionări, datorită aproximărilor care se introduc în vederea micșorării volumului de calcul. Astfel, în lucrare s-a analizat structura de rezistență a unui pod rulant care funcționează în hala unei oțelării dintr-un combinat siderurgic.

În vederea abordării calculului și optimizarea structurii de rezistență a utilajului metalurgic considerat, în cap.1 al lucrării s-au analizat principalele categorii de structuri de rezistență întâlnite la utilajele metalurgice, în general, și la podurile rulante, în particular; principalele mărci de oțeluri folosite la fabricarea elementelor structurilor de rezistență și principalele tipuri de acțiuni mecanice specifice proceselor industriale metalurgice, deservite de aceste categorii de utilaje. În urma efectuării acestor cercetări se apreciază că, evaluările incomplete a unor acțiuni din exploatare, deficiențele de ordin constructiv în concepția de alcătuire a elementelor structurilor de rezistență, a legăturilor dintre acestea sau a structurii în ansamblu, precum și efectuarea necorespunzătoare a unor operațiuni în faza de montaj a structurii, urmate de verificări insuficiente sau superficiale a geometriei elementelor componente ale acesteia, duc la apariția unor efecte defavorabile care solicită structura de rezistență a utilajului în exploatare (cap.1, paragraful 1.3), care creează deficiențe majore în realizarea procesului de optimizare.

În general, concepția unei structuri de rezistență necesită, așa cum am arătat în cap.2,

calculul tensiunilor și deformațiilor produse de acțiunile la care este supusă construcția din care face parte respectiva structură. Pe baza acestora, se evaluează răspunsul structurii, în regim static și/sau dinamic și se dimensionează elementele ei componente, având în vedere siguranța și comportarea normală în exploatare.

Procedeele utilizate în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, constând, ca principiu în compararea răspunsului structurii la încărcările din exploatare cu anumite valori stabilite prin metoda de calcul adoptată, sunt influențate de **evoluția și fundamentarea conceptului de optimizare**.

Din punct de vedere al conceptelor de optimizare, până la ora actuală s-au acceptat trei concepte și anume: determinist, probabilist și semiprobabilist.

Conceptul de optimizare determinist presupune pe de o parte considerarea datelor inițiale de proiectare ca având valori certe (de exemplu: proprietățile materialului structurii, caracteristicile geometrice, acțiunile care solicită elementele structurii), iar pe de altă parte determinarea tensiunii maxime din elementele structurii de rezistență, astfel încât aceasta să nu depășească o anumită fracțiune din valoarea limitei de curgere a materialului din care este confecționată structura. În aceste condiții, datele inițiale au valori fixate prin prescripții de proiectare și reprezintă valori medii acoperitoare, cu caracter convențional; deci, **alegerea unui coeficient de siguranță acoperitor pentru toate cazurile posibile de cedare ale structurii de rezistență duce la supradimensionarea acesteia**. Datorită specificului lor afectat de incertitudine, datele menționate trebuie însă privite ca mărimi aleatoare, și de aceea, este mai potrivit să fie definite statistic. Astfel, proiectarea deterministă reprezintă un punct de vedere îngust al procesului de optimizare și poate avea uneori implicații periculoase, deoarece metodele de optimizare bazate pe concepte deterministe riscă să reducă nivelul de siguranță al structurii de rezistență, sub nivelul minim admis.

Abordarea procedurii de calcul al structurilor de rezistență sub aspectul **conceptului de optimizare probabilist**, presupune aplicarea calculului statistic în stabilirea datelor inițiale de proiectare (încărcări, proprietăți fizico-mecanice ale materialului, dimensiunile geometrice) ale elementelor componente ale structurii de rezistență. Acest concept conduce la dificultăți ce derivă din aplicarea practică a teoriilor statistice în proiectarea curentă a structurilor complexe, cum sunt și structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice. În acest sens se remarcă și insuficiența, îndeosebi cantitativă, a unor informații referitoare, de exemplu, la variabilitatea încărcărilor, a proprietăților fizico-mecanice ale materialelor sau a caracteristicilor geometrice ale elementelor structurii metalice. Din acest motiv, unele mărimi cu care se operează se presupune a avea un caracter determinist (înălțimea secțiunii elementelor, ariile secțiunilor transversale ale barelor, greutatea proprie a structurii), iar altele caracter probabilist (limita de curgere a oțelului).

Datorită acestui fapt, în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice se operează cu mărimi dintre care, unele au un caracter determinist și altele au un caracter probabilist, deci se acceptă **conceptul semiprobabilist de calcul**, iar metoda de calcul aferentă acestui concept este **metoda stărilor limită**, în care determinarea capacității portante a structurii de rezistență se efectuează pe baza coeficienților de siguranță diferențiați. Această metoda constă, principial, în **asigurarea rațională a elementelor și a structurilor de rezistență față de atingerea stărilor limită**, stări care ar implica fie pierderea capacității de a satisface condițiile de

exploatare, fie generarea unor pericole pentru oameni sau bunurile materiale deservite .

Folosirea în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice a acestei metode implică:

- respectarea regulilor de alcătuire constructivă și de calcul (dimensionare și verificare) a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice;
- execuția corectă a elementelor structurii, în conformitate cu reglementările în vigoare;
- exploatarea corespunzătoare a structurii de rezistență, în concordanță cu condițiile admise la proiectare;
- verificarea periodică a comportării structurii metalice, conform regulilor stabilite la proiectare.

Din punct de vedere al stărilor limită ale structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, în această lucrare s-a verificat atingerea **stării limită ale exploatării normale** pentru structura de rezistență a podului rulant considerat, care permite calculul structurilor de rezistență atât în faza de proiectare, cât și după o anumită perioadă de exploatare a construcției sub acțiunea diverselor încărcări.

Adoptarea metodei stărilor limită în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice implică evaluarea răspunsului acestora la acțiunile exterioare, atât din punct de vedere calitativ, cât și cantitativ. Aspectul calitativ se referă la modalitățile de evaluare a mărimilor fizice corespunzătoare stadiului de solicitare analizat (deplasări și tensiuni), iar cel cantitativ, la determinarea valorică a acestora.

Luarea în considerare însă, a tuturor parametrilor ce intervin în exploatarea structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice este dificilă și, din punct de vedere practic, imposibilă. Din acest motiv, se admit o serie de simplificări care se referă la acțiuni, la comportarea materialelor din care sunt confecționate elementele structurii și la alcătuirea ei. În urma acceptării acestor ipoteze simplificatoare se obține **modelul fizic** al structurii reale, căruia, pentru a-i defini comportarea, i se atașează un **model matematic**. Acesta, la rândul său, poate fi afectat de o serie de ipoteze simplificatoare care vizează definirea matematică a problemei. Cele două seturi de ipoteze conduc la simplificarea calculelor, însă conferă rezultatelor un grad de aproximare, dependent de finețea ipotezelor admise. Modelul fizic al structurii de rezistență împreună cu modelul matematic definesc **modelul de calcul** al acesteia. Definirea modelului de calcul este posibilă numai după ce s-au analizat condițiile generale și de principiu privind performanțele ansamblului din care face parte structura, tehnologia de execuție a acesteia, materialul din care este confecționată, durata sa de viață și condițiile în care aceasta lucrează.

Elaborarea modelului de calcul al unei structuri de rezistență, în vederea aprecierii răspunsului acesteia la acțiunile din exploatare, trebuie riguros corelat cu metoda de calcul folosită. Astfel, putem concluziona că, în mecanica structurilor există două categorii de metode și anume: **analitice și aproximative**.

Metodele analitice au un câmp restrâns de aplicabilitate în calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, datorită dificultăților care apar, pe de o parte datorită configurației geometrice a structurii, și de modul uneori foarte complex de încărcare și rezemare a

acesteia, respectiv pe de altă parte, de varietatea proprietăților mecanice ale materialelor componente. Din acest motiv, soluțiile aproximative, obținute în urma aplicării în calculul structurilor a metodelor aproximative, sunt mult mai eficiente din punct de vedere practic.

Eficiența folosirii metodelor aproximative derivă din faptul că acestea s-au dezvoltat pe metode numerice de calcul care conferă următoarele avantaje:

- restrâng, în mod considerabil, diversitatea cazurilor ce trebuie rezolvate prin transferarea analizei de la nivelul structurilor la cel al unor elemente de formă standard;
- permit formularea matriceală a algoritmilor, asigurând suportul matematic necesar folosirii programelor de calcul automat;
- oferă un algoritm de calcul general, unic, pentru structurile alcătuite din bare sau elemente continue bi- și tridimensionale;
- permit abordarea unitară a analizei statice și dinamice a structurilor;
- permit extinderea domeniului de analiză și în sfera comportării neliniare a structurilor.

În general, **metodele analitice se folosesc la structurile de rezistență relativ simple**, în cazul cărora rezolvarea ecuațiilor ce definesc comportarea modelului fizic al acestora se poate face prin integrare numerică sau diferențe finite, în timp ce **metodele aproximative se folosesc la structurile complexe**, (cum este cazul structurilor metalice ale utilajelor metalurgice), a căror comportare este descrisă (din punct de vedere matematic) matriceal și a căror rezolvare se efectuează cu ajutorul programelor de calcul care oferă posibilitatea înlocuirii sistemelor de ecuații diferențiale prin sisteme de ecuații liniare. La ora actuală, majoritatea programelor de calcul au la bază **metoda elementelor finite care permite studiul teoretic al unor probleme deosebit de complexe**, cu luarea în considerare atât a fenomenelor liniare, cât și a celor neliniare. În ceea ce privește **problemele de optimizare ale structurilor complexe, acestea folosesc tehnici iterative de calcul, care duc la un proces de proiectare iterativă a acestor structuri.**

Eficiența unui model de calcul, pentru analiza cu metoda elementelor finite pe care sunt structurate majoritatea programelor de calcul automat cu caracter multifuncțional, cum este de exemplu și programul COSMOS/M, utilizat în prezenta lucrare, depinde de tipul elementelor finite folosite în modelare și de gradul de finețe al discretizării, corelate cu precizia necesară a rezultatelor în cadrul problemei studiate.

Pe baza celor anterior prezentate, în prezenta lucrare s-a efectuat calculul structurii de rezistență a unui pod rulant care lucrează în hala unei oțelării, dintr-un combinat siderurgic și optimizarea acestuia, pe baza conceptului semiprobabilist. Astfel, este evaluată starea de tensiune și deformație din structura de rezistență a acestui utilaj prin evaluarea răspunsului acesteia la acțiunea încărcărilor exterioare, răspuns ce poate fi caracterizat calitativ și cantitativ în diferite moduri. De exemplu, în prezenta lucrare, tensiunile și deformațiile structurii sunt evaluate valoric prin cercetări experimentale și determinări prin calcule teoretice aproximative, corespunzătoare stadiului de solicitare analizat, **mărimi care pentru asigurarea unei bune exploatare a construcției, trebuie să se încadreze în anumite limite impuse prin prescripții tehnice.**

Rezolvarea problemelor privind determinarea tensiunilor și deformațiilor din structura de rezistență a unui pod rulant aflat în exploatare prin procedeul aproximativ de calcul, care are la bază

metoda elementelor finite, presupune determinarea valorilor unor funcții necunoscute, în cazul nostru tensiuni și deformații, într-un domeniu de analiză bine determinat. Fenomenele care determină apariția acestor tensiuni și deformații în structurile de rezistență ale acestor utilaje în exploatare sunt descrise din punct de vedere matematic de ecuații diferențiale, prin a căror integrare în condiții limită, specificate de domeniul de analiză, se obțin soluțiile exacte ale problemei. Analizând, structura metalică a podului rulant considerat, din punct de vedere structural, al condițiilor de încărcare și al condițiilor limită, se observă că aceasta este deosebit de complexă, motiv pentru care integrarea ecuațiilor diferențiale caracteristice este extrem de dificilă. Datorită acestui fapt, rezolvarea analitică nu se poate efectua decât prin crearea unui model simplificat, astfel încât rezolvarea ecuațiilor diferențiale să fie realizabilă.

După cum am arătat în cap.3, calculul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice efectuat pentru determinarea valorică a tensiunilor și deformațiilor (tensiuni și deplasări), constituie o analiză teoretică a răspunsului structurii la acțiunile exterioare și implică schematizarea fenomenului fizic real, în vederea exprimării sale în formă matematică. De aceea, ținând seama de faptul că, se calculează o schemă idealizată a structurii și nu structura ca atare, se poate afirma că dacă schema de calcul modelează cât mai fidel structura reală, atunci se va asigura o comportare corespunzătoare în exploatare a structurii de rezistență și implicit a utilajului, în ipoteza că și celelalte etape ale procesului de proiectare sunt rezolvate corect.

Evaluarea modului de comportare în exploatare și optimizarea structurii de rezistență a podului rulant s-a efectuat cunoscând starea de tensiune și deformație din elementele acestuia, determinată în cap.3 prin calcul spațial, condus pe baza a două variante de modelări numerice care au relevat adoptarea unor modele de calcul ale structurii de rezistență.

Modelul de calcul obținut prin modelarea numerică a structurii de rezistență cu elemente finite de tip BEAM 3 permite efectuarea unui studiu de ansamblu asupra modului de comportare al structurii de rezistență, fără să evidențieze aspecte legate de fenomenul de concentrare al tensiunilor sau o analiză în detaliu a distribuției stării de tensiune și deformație; aceste inconveniente însă sunt rezolvate de modelul de calcul obținut prin modelarea cu elemente finite de tip SHELL 3, deci rezultatele obținute în urma modelării cu elemente finite BEAM 3 sunt îmbunătățite prin alegerea elementelor finite SHELL 3, mult mai adecvate scopului propus din punct de vedere al formei și al mărimii și care modelează mai fidel structura de rezistență a podului rulant analizat. Concluziile formulate în urma celor două variante de modelare numerică au evidențiat faptul că, **adoptarea unui model de calcul are influențe calitative și cantitative asupra stării de solicitare a elementelor componente ale structurii de rezistență a podului rulant, acestea având implicații directe asupra procesului de optimizare.**

În scopul validării acestui studiu teoretic se impune efectuarea unor experimentări industriale care să pună în evidență comportarea în exploatare a structurii de rezistență a utilajului. Analiza experimentală industrială se efectuează în scopul determinării tensiunilor din structura de rezistență a podului rulant aflat în exploatare, respectiv a distribuției acestora în zonele cu concentratori de tensiune, care sunt considerate zone periculoase cărora li se va acorda o atenție deosebită în proiectare și exploatare. Deoarece orice rezultate ale unor măsurători experimentale sunt afectate inerent de diferite categorii de erori, iar rezultatele analitice, constituind o analiză

teoretică, implică schematizarea fenomenului fizic real în vederea exprimării sale sub formă matematică, se poate aprecia că fiecare dintre aceste două moduri de evaluare a comportării structurii de rezistență, conferă rezultatelor obținute un anumit grad de aproximare. În aceste condiții, concluziile formulate în urma cercetărilor întreprinse, respectiv deciziile privind modalitățile de optimizare a structurii studiate, vor fi afectate la rândul lor, de un anumit grad de incertitudine, pentru reducerea căruia se impune verificarea justetei ipotezelor admise.

Aceste studii experimentale privind comportarea sub încărcări a structurii de rezistență a podului rulant au avut ca obiectiv determinarea valorică a deplasărilor, corespunzătoare stadiului de solicitare din exploatarea utilajului și determinarea valorilor maxime absolute ale tensiunilor pentru toate ipoteze de încărcare considerate. **Acest studiu relevă faptul că, modul de comportare al structurii de rezistență în exploatare diferă de modelul de calcul adoptat, sub aspect cantitativ, iar din punct de vedere calitativ acestea se comportă aproximativ identic. Comportarea diferită din punct de vedere cantitativ evidențiază faptul că structura de rezistență a podului rulant aflat în exploatare prezintă însemnate rezerve de rezistență, deci aceasta poate fi supusă operației de optimizare, iar comportarea identică din punct de vedere calitativ confirmă validitatea modelului de calcul folosit în studiul teoretic.**

Aprecierea comportării în exploatare a structurii de rezistență a podului rulant analizat s-a efectuat în urma verificării acesteia la starea limită ultimă, în conformitate cu normativele în vigoare pe baza rezultatelor obținute analitic în cap.3 și experimental în cap.4. Astfel, starea limită a structurii de rezistență a podului rulant analizat a fost verificată din punct de vedere al tensiunilor și deplasărilor, prin compararea valorilor determinate analitic și experimental, cu cele admisibile, prevăzute în normativele menționate anterior. Rezultatele acestor verificări au evidențiat că, **pentru podul rulant considerat, aflat în exploatare în hala unei oțelării dintr-un combinat siderurgic, există însemnate rezerve de rezistență din punct de vedere al rezistențelor admisibile.**

Studiul stării de tensiune și deformație efectuat în lucrare asupra structurii de rezistență a utilajului metalurgic considerat a scos în evidență posibilitatea efectuării unor optimizări dimensionale în vederea reducerii consumului de material. În aceste condiții, structura de rezistență a utilajului studiat a fost supusă unei optimizări dimensionale.

Optimizarea oricărui tip de structură de rezistență poate fi efectuată prin optimizarea separată a elementelor ei componente, a subansamblelor acesteia sau a părților constitutive distincte. În cazul utilajelor metalurgice, procesul optimizării vizează motoarele, mecanismele de acționare, elementele anexe (podeste, scări, platforme), căile de rulare și nu în ultimul rând structura de rezistență a utilajului respectiv.

În ceea ce privește optimizarea structurii de rezistență a podului rulant, aceasta s-a realizat la nivelul lonjeroanelor utilajului, obținându-se o economie de material de aproximativ 17 % prin reducerea grosimii tălpilor și a inimilor acestora, în condițiile respectării condițiilor specifice stărilor limită definite în normativele în vigoare.

În consecință, drept concluzii ale observațiilor formulate asupra modului de comportare în exploatare a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, se apreciază că:

- acestea au pus în evidență **caracterul complex al regimului de solicitare** la care sunt

supuse aceste categorii de construcții metalice, relevând totodată și **consecințele acțiunii unor factori specifici**, care derivă din caracterul proceselor tehnologice desfășurate;

- deși un rol hotărâtor în asigurarea corespunzătoare sub încărcări a oricărei categorii de structuri de rezistență, revine proiectării, prin concepția de ansamblu și a detaliilor de alcătuire constructivă aferente acesteia, în cazul structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice un rol deosebit de important îl are **fundamentarea și evoluția conceptului de optimizare**;
- metodele de calcul moderne permit studiul solicitărilor cu mai mare rigurozitate datorită operativității acestora în rezolvarea ecuațiilor de echilibru și continuitate;
- prezența calculatoarelor electronice și a programelor de calcul structurate pe elemente finite, facilitează analiza stării de tensiune și deformație din structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice cu un înalt grad de precizie;
- adoptarea unui model de calcul are influențe calitative și cantitative asupra stării de solicitare a elementelor componente ale structurii de rezistență a utilajelor metalurgice, acestea având implicații directe asupra procesului de optimizare;
- veridicitatea rezultatelor este cu atât mai mare cu cât modelul de calcul descrie mai fidel structura de rezistență și legăturile dintre elementele acesteia;
- analiza statică a evidențiat posibilitatea optimizării dimensionale a structurii de rezistență în vederea reducerii consumului de material, prin reducerea grosimii chesoanelor, fără a depăși rezistența admisibilă a materialului.

Pe baza studiilor prezentate detaliat în lucrare, se desprind o parte din **contribuțiile personale** ale autoarei:

- conceptul de optimizare pentru structurile de rezistență ale utilajelor metalurgice este analizat pe baza metodelor semiprobabiliste, evidențiind principalele faze și factori care influențează optimizarea acestor structuri;
- analiza condițiilor reale de lucru a structurilor de rezistență ale podurilor rulante sub acțiunea unor încărcări datorate procesului de exploatare și evidențierea efectelor produse de aceste încărcări asupra structurilor metalice ale acestor utilaje.
- realizarea unor verificări a geometriei unui pod rulant care funcționează în hala unei oțelării, dintr-un combinat siderurgic, cu scopul evidențierii unor imperfecțiuni de execuție care pot genera încărcări care au efect defavorabil asupra structurii de rezistență a utilajului aflat în exploatare.
- întocmirea și sistematizarea sintezei documentare privind: prezentarea modalităților de modelare fizică și matematică în vederea calculului structurilor de rezistență a utilajelor metalurgice, prezentarea unor modalități de alegere a modelelor de calcul și a etapelor de rezolvare a acestora în analiza cu elemente finite, prezentarea celor mai evaluate tipuri de elemente finite existente la ora actuală în biblioteca cu elemente finite a programelor automate de calcul și a principalelor ecuații care descriu starea de tensiune și deformație specifică mecanicii structurilor, definirea conceptului de

optimizare al structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice, prezentarea etapelor, a criteriilor și a metodelor de optimizare, oportunitatea optimizării în faza de proiectare.

- evaluarea fazelor și analiza factorilor care influențează optimizarea unei structuri de rezistență;
- finalizarea analizei privind posibilitățile de calcul și optimizare, prin stabilirea programului de calcul adoptat în studiul unui utilaj metalurgic.
- obținerea datelor necesare modelării prin analiza structurală și a legăturilor dintre elementele structurii metalice ;
- stabilirea caracteristicilor dimensionale necesare estimării geometriei podului rulant;
- specificarea încărcărilor și a combinațiilor acestora provenite din exploatare ;
- modelarea numerică în două variante. cu elemente finite BEAM 3 și SHELL 3;
- întocmirea modelului matematic de calcul al problemei propuse și rezolvarea acestuia prin metode moderne de calcul, pe baza metodei elementelor finite;
- determinarea stării de tensiune și deformație din structura de rezistență a podului rulant prin specificarea calitativă și cantitativă a tensiunilor și deformațiilor, prin metode teoretice, atât pentru întreaga structură, cât și pentru anumite elemente componente ale acesteia.
- trasarea diagramelor de variație a tensiunilor în cele șase secțiuni analizate (SIII, SII, SI, S1, S2, S3), în urma efectuării măsurărilor experimentale;
- trasarea diagramelor de variație a deformațiilor pe lungimea lonjeronului I;
- studiul cantitativ și calitativ al corelațiilor între rezultatelor obținute;
- analiza critică comparativă a rezultatelor experimentale cu cele obținute prin calcul cu ajutorul programului cu elemente finite COSMOS/M;
- formularea concretă a problemei optimizării pentru o grindă principală din structura de rezistență a podului rulant metalurgic analizat.

Totodată se pot aduce **următoarele precizări în tratarea temei:**

- valorificarea rezultatelor studiilor și cercetărilor experimentale întreprinse, poate fi realizată prin utilizarea acestora atât ca bază în elaborarea programelor de urmărire a comportării în timp a structurii de rezistență a podului rulant, cât și în scopul realizării unor modele fizice mai fidele a structurilor de rezistență reale, în vederea optimizării lor dimensionale având ca scop reproiectarea acestora;

- recomandarea realizării unui studiul complet al problemei prezentate printr-o analiză a comportării structurii în regim dinamic;

- recomandări privind ameliorarea soluției constructive a structurii de rezistență în scopul reducerii vârfurilor de tensiune;

- pe baza studiului efectuat se recomandă efectuarea unei optimizări a grinzilor de capăt.

- optimizarea de ansamblu a unui utilaj metalurgic nu se face numai prin optimizarea structurii de rezistență a acestuia, și prin optimizarea altor componente, se recomandă realizarea optimizării altor subansamble ale utilajului.

- realizarea optimizării lonjeronului prin variația înălțimii acestuia, variația lățimii tălpilor.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Alămoreanu, M., Coman, L., Nicolescu, S. - *Mașini de ridicat. Organe specifice mecanismelor și acționarea mașinilor de ridicat*, vol I, II, Ed. Tehnică, București, 1996
- [2]. Alic, C., Alic, D., Zdrenghia, N. - *Starea de conservare a elementelor de construcții metalice la un combinat siderurgic*, a-II-a Conferință de Construcții Metalice, Timișoara, 1982, vol. I, pag 227
- [3]. Alic, C. - *Contribuții la evaluarea gradului de siguranță al halelor metalice din siderurgie. ținând seama de condițiile reale de exploatare*, Teză de doctorat, Timișoara, 1998
- [4]. Ancău, M., Nistor, L. - *Tehnici numerice de optimizare în proiectarea asistată de calculator*, Ed. Tehnică, București, 1996
- [5]. Antonescu, D., Buga, M., Constantinescu, N.I., Iliescu, N. - *Metode de calcul și tehnici experimentale de analiză a tensiunilor în biomecanică*, Ed. Tehnică, București, 1986
- [6]. Avram, C. - *Proiectarea economică a elementelor de construcții din beton armat*, Ed. Facla, Timișoara, 1979
- [7]. Avram, C., Anastasescu, D. - *Structuri spațiale*, Ed. Academiei, București, 1978
- [8]. Babeu, T. - *Teoria elementară a Rezistenței materialelor*, Ed. Mirton, Timișoara, 1998
- [9]. Babeu, T., **Bretotean, C.** - *Analiza comparativă a stării de tensiuni și deformații din grinda principală a unui pod rulant pe baza rezultatelor analitice și experimentale*, Buletin Științific al UPT, 1999, Tom 44 (58), Fascicola 1, pag.5 ÷ 12
- [10]. Babeu, T., **Bretotean, C.** - *Studiul analitic și experimental al stării de tensiune din grinda principală a unui pod rulant*, Buletin Științific al UPT, 1999, Tom 44 (58), Fascicola 2, pag.1 ÷ 8
- [11]. Bălan, Șt., Petcu, V. - *Calculul structurilor în domeniul plastic. Densități mecanice*, Ed. Academiei, București, 1978
- [12]. Bălan, Șt., Petcu, V. - *Calculul structurilor în domeniul plastic. Optimizări.*, Ed. Academiei, București, 1979.
- [13]. Bănuț, V. - *Calculul neliniar al structurilor*, Ed. Tehnică, București, 1981.
- [14]. Bellet, D., Barrau, I., J. - *Cours d'elasticité*, Cepadues-Editions, Paris, 1991.
- [15]. Beer, G., Watson, J. - *Intoduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers*, John Willy & Sons, New York, 1992
- [16]. Bejan, M. - *În lumea unităților de măsură*, Ed. AGIR, București, 2000
- [17]. Bejan, M., Matieș, V. - *Inginerul în societatea avansat automatizată*, al-II-lea Simpozion Științific al Inginerilor de pretutindeni, București, septembrie, 1998
- [18]. Bejan, M., Abrudan, I. - *Managementul și ingineria prezentului*, Buletinul AGIR, oct.-dec., 1996
- [19]. Berbente, C., Mitran, S. - *Metode numerice*, Ed. Tehnică, București, 1997.
- [20]. Belous, V. - *Creația tehnică în construcția de mașini*, Ed. Junimea
- [21]. Blumenfeld, M. - *Introducere în metoda elementelor finite*, Ed. Tehnică, București, 1995
- [22]. Bob, C. - *Câteva aspecte privind proiectarea probabilistică a structurilor*, a-IV-a Conferință de Construcții Metalice, Timișoara, 1985, vol I, pag.280.
- [23]. Boleanțu, L., Dobre, I. - *Aplicații ale mecanicii solidului deformabil în construcția de mașini*, Ed. Facla, 1978.
- [24]. **Bretotean, C.** - *Optimizarea configurației unui sistem de bare*, Sesiune aniversară de comunicări științifice 12-13 octombrie 1995, Hunedoara, vol.IV, pag.85 ÷ 91.
- [25]. **Bretotean, C.** - *Aplicarea metodei diferențelor finite în vederea determinării stării de tensiune într-o placă dreptunghiulară solicitată la forțe concentrate*, Analele Universității "Eftimie Murgu", Reșița, Fascicola II, 1996, pag. 427 ÷ 432.
- [26]. **Bretotean, C.** - *Considerații privind criteriile generale de optimizare a structurilor de rezistență ale utilajelor metalurgice*, Analele FIH, Tom I, Fascicola 7, 1999, pag.55 ÷ 60.

- [27]. **Bretotean, C.** - *Analiză critică privind modelarea unui cârlig de tracțiune aparținând unui pod rulant, în analiza cu metoda elementelor finite*, Analele FIH, Tom I, Fascicola 6, 1999, pag.49 ÷ 53.
- [28]. **Bretotean, C., Lăpușan, A.** - *Considerații generale privind modelele fizice utilizate în optimizarea structurilor de rezistență*, Analele FIH, Tom I, Fascicola 3, 1999, pag.119...126.
- [29]. **Bretotean, C., Lăpușan, A.** - *Considerații generale privind clasificarea metodelor de calcul, utilizate în optimizarea structurilor de rezistență*, Analele FIH, Tom I, Fascicola 3,1999, pag.127 ÷ 134.
- [30]. **Bretotean, C.** - *Analiza comparativă a stării de tensiune dintr-un cârlig de tracțiune al unui pod rulant pe baza rezultatelor analitice și experimentale*, Acta Universitatis Cibiensis, Vol XXXV, Seria Tehnică, B. Mecanică Aplicată, Sibiu 1999, pag. 27 ÷30.
- [31]. **Bretotean, C.** - *Studiu asupra stării de tensiuni din grinda principală a unui pod rulant*, Acta Universitatis Cibiensis, Vol XXXV, Seria Tehnică, B. Mecanică Aplicată, Sibiu 1999, pag. 31 ÷38.
- [32]. **Bretotean, C.** - *Analiză critică privind modelarea fizică a grinzii principale a unui pod rulant de 50 KN*, Analele FIH, Tom II , Fascicola 1, 2000, pag.110 ÷ 113.
- [33]. **Bretotean, C.** - *Analiza experimentală asupra materialului metalic din care este confecționat un pod rulant aflat în exploatare*, Analele FIH, TomII, Fascicola 1, 2000, pag.114 ÷ 117.
- [34]. **Bretotean, C.** - *Considerații generale privind programul de încercări experimentale efectuat în vederea estimării caracteristicilor fizico-mecanice și tehnologice ale oțelurilor din care sunt confecționate structurile de rezistență ale podurilor rulante*, Analele FIH, TomII, Fascicola 1, 2000, pag.118 ÷ 121.
- [35]. **Bretotean, C., Babeu, T.**- *Analiza stării de tensiune din grinda principală a unui pod rulant de 5KN-13.92 m*, Buletin Științific al UPT, 2000, Tom 45 (59), Fascicola 1, pag.31 ÷ 38.
- [36]. **Bretotean, C.** - *Cercetări privind estimarea prelungirii duratei de viață a podului rulant de 125 KN cu durata de viață expirată*, Buletin Științific al UPT, 2000, Tom 45 (59), Fascicola 2, pag.1 ÷ 6.
- [37]. **Bretotean, C.** - *Investigații experimentale efectuate asupra structurii de rezistență a unui pod rulant aflat în exploatare*, Ed. Universității “Petru-Maior” Târgu –Mureș, Știința și Tehnologia Materialelor - Rezistența materialelor, vol I, 2000, pag. 169 ÷ 174.
- [38]. **Bretotean, C.** - *Analiza defectelor și degradărilor ce apar în grinzile căilor de rulare ale unui pod rulant siderurgic*, Ed. Universității “Petru-Maior” Târgu –Mureș, Știința și Tehnologia Materialelor - Rezistența materialelor, vol I, 2000, pag. 175 ÷ 180
- [39]. **Bretotean, C.** - *Tensiuni în structura metalică a unui pod rulant siderurgic*, Simpozion Internațional ROPET 2000, Inginerie mecanică, pag. 473÷ 478
- [40]. **Bretotean, C.** - *Analiza comportării sub încărcări a structurilor de rezistență a podurilor rulante aflate în exploatare*, Simpozion Internațional ROPET 2000, Inginerie mecanică, pag. 479÷ 484.
- [41]. **Bretotean, C.** - *Analiza critică privind modelul de calcul al structuri de rezistență a unui pod rulant cu capacitatea de 100KN*, Simpozion Internațional ROPET 2001, Ed. Focus, Inginerie mecanică, Partea I,pag. 211÷ 216.
- [42]. **Bretotean, C.** - *Considerații privind modelul de calcul al structurii de rezistență al unui pod rulant de 100 KN în analiza cu elemente finite de tip placă subțire*, Analele FIH, Tom III, Fascicola 4, 2001, pag. 5 ÷ 8.
- [43]. **Cheșa, I.** - *Alegerea și utilizarea oțelurilor*, Ed. Tehnică, București, 1985
- [44]. **Cicală, E.,F.** - *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*, Ed. “Politehnică”, Timișoara, 1999
- [45]. **Cioclov, D.** - *Mecanica ruperii materialelor* , Ed. Academiei, București, 1977
- [46]. **Constantinescu, N.I., Munteanu, Gh. M., Golumbovici, C.** - *Calcul de rezistența structurilor de mașini și utilaje*, Ed. Tehnică, București, 1984
- [47]. **Constantinescu, N.I., Ștefănescu, D.M., Sandu, M.A.** - *Măsurarea mărimilor mecanice cu ajutorul tensometriei*, Ed. Tehnică, București, 1989

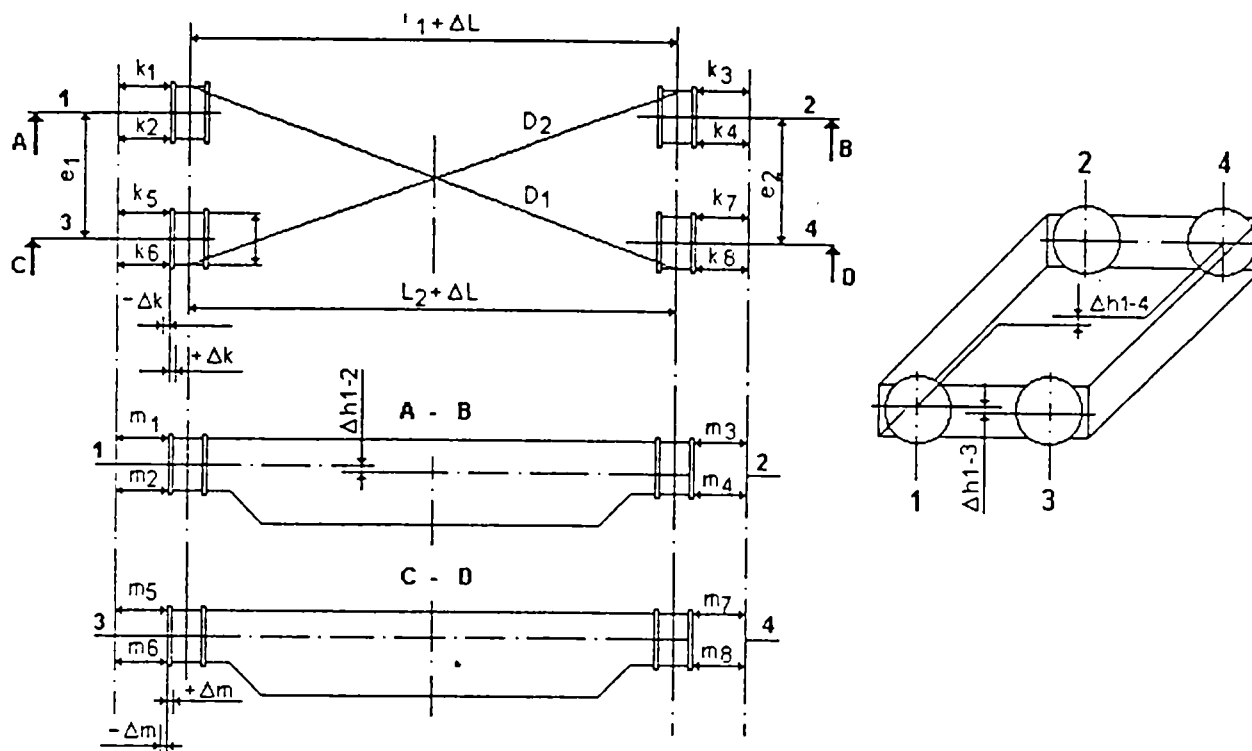
- [48]. Cuteanu, E. Marinov, R. - *Metoda elementelor finite în proiectarea structurilor*, Ed. Facla, Timișoara, 1980
- [49]. Dalban, C., Juncan, N., Șerbescu, C. - *Construcții metalice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983
- [50]. Dieter, G.E. - *Metalurgie mecanică*, Ed. Tehnică, București, 1983.
- [51]. Dumbravă, D., Stancu, V., Apostol, O. - *Proiectarea structurilor sudate asistată de calculator*, Centrul de multiplicare al UPT, 1995
- [52]. Ferry, J., Castanneta, M. - *Siguranța structurilor*, Ed. Tehnică, București, 1971
- [53]. Faur, N., Neaguț, N., **Bretotean, C.** - *Considerații privind analiza cu elemente finite de tip placă a stării de tensiune și deformare din structura de rezistență a unui pod rulant*, Buletin Științific al UPT, 2000, Tom 45 (59), Fascicola 2, pag.15 ÷ 24.
- [54]. Gâdeanu, L., Regep, Z., Mercea, Ghe. - *Construcții metalice*, Centrul de multiplicare al UPT, 1983
- [55]. Gallagher, R.H., Zienkiewicz, O.C. - *Optimum structural design. Theory and applications*, New York, John Willey, 1977.
- [56]. Georgescu, D., Frangopol, D. - *Analiza siguranței structurilor metalice*, vol I, Institutul de construcții, București, 1978
- [57]. Gheorghiu, A. - *Concepții moderne în calculul structurilor*, Ed. Tehnică, București, 1975
- [58]. Ilincioiu, D.D. - *Contribuții la studiul unei structuri de rezistență cu geometrie variabilă folosite la susținerea miniere*, Teză de doctorat, Petroșani, 1994
- [59]. Ivan, I. - *Bazele teoretice ale stabilității*, Ed. Facla, Timișoara
- [60]. Ivan, G.E. - *Contribuții la optimizarea structurilor spațiale de bare cu aplicații la structura de rezistență a cabinei tractorului luând în considerare rigiditatea structurii și a legăturilor dintre tractor și structură*, Teză de doctorat, Brașov, 1996
- [61]. Kasar, S.A. - *Dinamica mostovâh Kranov. Moscva*, Izd. Mașinostroemie, 1968
- [62]. Kilyeni, S. - *Metode numerice*, Ed. "Orizonturi Universitare", Timișoara, 1997
- [63]. Korosi, S.F. - *Asupra unor aspecte legate de proiectarea economică a structurilor metalice ale instalațiilor de ridicat*, a-II-a Conferință de Construcții metalice, vol. III, pag.196 ÷ 212, 1979.
- [64]. Lungu, D., Ghiocel, D. - *Metode probabiliste în calculul construcțiilor*, Ed. Tehnică, București, 1982
- [65]. Mangeron, D., Poterașu, V.F. - *Teoria optimizării structurilor cu aplicații*, Ed. Junimea, Iași, 1980
- [66]. Marciuk, G.I. - *Metode de analiză numerică*, Ed. Academiei, București, 1983.
- [67]. Massonet, Ch., Deprez, G., Maquoi, R. - *Calculul structurilor la calculatoare electronice*, Ed. Tehnică, București, 1974
- [68]. Mateescu, D., Appeltauer, I., Cuteanu, E. - *Stabilitatea la compresiune a structurilor din bare de oțel*, Ed. Academiei, București, 1980
- [69]. Mateescu, D., Băluț, N., Caraba, I. - *Calculul plan și spațial al grinzilor căilor de rulare executate din oțel*, Ed. Academiei, București, 1988.
- [70]. Mateescu, D., Gâdeanu, L., Mercea, Ghe. - *Construcții metalice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975
- [71]. Melosh, R.J.- *Structural Engineering Analysis by Finite Elements*, Pretince-Hall, London, 1992
- [72]. Mitelea, I., Budău, V. - *Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate*, Ed. De Vest, Timișoara, 1982
- [73]. Mocanu, D.R. - *Analiza experimentală a tensiunilor*, Ed. Tehnică, București, 1976
- [74]. Mogan, L., Ghe. - *Metoda elementelor finite în inginerie*, Universitatea "Transilvania" Brașov, 1996
- [75]. Moșica, A.M. - *Cercetări numerice de rezistență, rigiditate și vibrații la batiuri*, Ed. Mirton, Timișoara, 1998
- [76]. Muntean, I.I. - *Structuri pentru construcții. Teorie și calcul*, vol I, Ed. Academiei, București, 1983
- [77]. Neaguț, N. - *Mașini de ridicat*, Centrul de multiplicare al UPT, 1995

- [78]. Neguț, N., Hlușcu, M., **Bretotean, C.** - *Analiza stării de tensiune și deformare din structura de rezistență a unui pod rulant în vederea optimizării dimensionale*, Simpozionul Național de Roboți Industriali, Timișoara, 1994, pag. 187 ÷ 198.
- [79]. Neguț, N., Marșavina, L., **Bretotean, C.** - *Studiul teoretic și experimental al stării de tensiune din cârligele de tracțiune ale mașinilor de ridicat*, Simpozionul Național de Roboți Industriali, Timișoara, 1994, vol I, pag. 199 ÷ 206.
- [80]. Neguț, N., Nicolescu, M., **Bretotean, C.** - *Analiza comportării dinamice a structurii de rezistență a unui pod rulant*, Monografie REZMAT, Ed. Mirton, Timișoara, 1998, pag. 73 ÷ 79.
- [81]. Nichici, A., Cicală, E. - *Prelucrarea datelor experimentale*, Centrul de multiplicare al UPT, 1996.
- [82]. Oltasen, N.S., Petersson, H. - *Introduction to the Finite Element Method*, Pretince-Hall, London, 1992.
- [83]. Oprescu, I., Vârcolacu., I. - *Utilaje metalurgice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1977.
- [84]. Opreșă, G. - *Contribuții la alcătuirea, calculul și cercetarea elementelor metalice din siderurgie*, Teză de doctorat, 1996
- [85]. Pacoste, C., Stoian, V., Dubină, D. - *Metode moderne în mecanica structurilor*, Ed. Științifică și enciclopedică, București, 1988.
- [86]. Pascariu, I. - *Elemente finite. Concepții. Aplicații*, Ed. Militară, București, 1985.
- [87]. Pătrâniche, N., Siminea, P. - *Construcții metalice*, Ed. Didactică și pedagogică, București, 1982.
- [88]. Petre, A., Atanasiu, M. - *Bare cu pereți subțiri*, Ed. Tehnică, București, 1960.
- [89]. Petrila, T., Gheorghiu, I., C. - *Metoda Elementelor Finite și aplicații*, Ed. Academiei, București, 1987
- [90]. Popescu, H., Chiroiu, V. - *Calculul structurilor optimale*, Ed. Academiei, București, 1981.
- [91]. Postolache, M. - *Metode numerice*, Ed. Sirius, 1994
- [92]. Postolache, M. - *Noi cercetări în calculul operațional cu aplicații în mecanică și fizică*, Teză de doctorat, 1992
- [93]. Poterașu, V.F., Mihalache, M. - *Elemente de contur. Aplicații*, Ed. Militară, București, 1992
- [94]. Poterașu, V.F., Florea, N. - *Practica optimizării structurilor*, Ed. Junimea, Iași, 1984
- [95]. Raicov, P.C. - *Calculul structurilor cu Metoda Elementului Finit*, Ed. Tehnică, 1997
- [96]. Regep, Z. - *Metode moderne de calcul a construcțiilor metalice – exemple de aplicare a normelor europene EC 3*, Ed. "Politehnica", Timișoara, 1996
- [97]. Regep, Z., Georgescu, M. - *Metode moderne de calcul a construcțiilor- prezentarea sintetică a normelor europene EC 3*, Centrul de multiplicare al UPT, 1993
- [98]. Rumsiski, L.Z. - *Prelucrarea matematică a datelor experimentale*, Ed. Tehnică, București, 1974
- [99]. Sedelmayer, F. - *Dynamische Wirkung der Pufferkräfte an die Tragkonstruktion der Krane Der Stahlban 1*(1964), pag. 15 ÷ 26.
- [100]. Sima, V., Varga, A. - *Practica optimizării asistată de calculator*, Ed. Tehnică, București, 1986.
- [101]. Siminea, P., Negrei, L. - *Construcții metalice. Calculul prin metoda stărilor limită*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [102]. Spivakovski, A.O., Rudenco, N.F. - *Mașini de ridicat și transportat*, Ed. Tehnică, București, 1953
- [103]. Spunt, L. - *Optimum Structural Design*, Pretince- Hall, New Jersey, 1971.
- [104]. Stematiu, D. - *Calculul structurilor hidrotehnice prin metoda elementelor finite*, Ed. Tehnică, București, 1988.
- [105]. Stoian, V., Clipi, T. - *Proiectarea asistată de calculator în construcții*, Centrul de multiplicare al UPT, 1995.
- [106]. Șerbescu, C., Mulbacher, R. - *Probleme speciale în construcții metalice*, Ed. Tehnică, București, 1984.
- [107]. Taloi, D., Bratu, C., Florian, E., Berceanu, E. - *Optimizarea proceselor metalurgice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- [108]. Tebedge, N., Tall, L. - *Contraintes residuelles dans les profiles en acier. Synthese des valeurs mesurees*. Construction metallique, 1974/2, pag.37.

- [109]. Tripa, P., Faur, N. - *Metode teoretice și experimentale pentru determinarea stării de tensiune și deformație*, Centrul de multiplicare al UPT, 1994.
- [110]. Țierean, M.H. - *Contribuții la optimizarea bazată pe fiabilitate a structurilor de rezistență*, Teză de doctorat, Brașov, 1995
- [111]. Udriște, C., Iftode, V. - *Metode numerice de calcul*, Ed. Tehnică, București, 1996.
- [112]. Wasintynski, Z., Brandt, A. - *The present state of knowledge in the field of optimum design of structures*. Appl. Mech. Rev., 1963.
- [113]. SR ISO 8686-1 - *Instalații de ridicat. Principii de calcul al încărcărilor și al grupărilor de încărcare*
- [114]. ***AISE Standard NO.6 - *Specification for Electric Overhead Travelling Cranes for Still Mile Service*
- [115]. *** - *Prescripții tehnice pentru construirea, montarea, exploatarea și verificarea macaralelor, mecanismelor de ridicat și dispozitivelor auxiliare R 1-87*, Colecția ISCIR, Ediție oficială, București, 1988
- [116]. SR EN 10025-A1/1994 - *Produse laminate la cald din oțeluri de construcții nealiat. Condiții tehnice de livrare*
- [117]. *** CTICM- EUROCOD NO.3 - *Calcul des structures en acier. Regles generales et regles pour les batiments.* (V.2-1991)
- [118]. STAS 500/1-80 - *Oțeluri de uz general pentru construcții. Condiții tehnice de calitate*
- [119]. STAS 500/2 - 80 - *Oțeluri de uz general pentru construcții. Mărci*
- [120]. STAS R 8542-79 - *Alegerea oțelurilor pentru construcții metalice*
- [121]. STAS 10101/0-75 - *Acțiuni în construcții. Clasificarea și gruparea acțiunilor*
- [122]. STAS 10102/2-75 - *Acțiuni în construcții. Încărcări datorate procesului de exploatare*
- [123]. STAS 8290-83 - *Instalații de ridicat. Principii de calcul și proiectare pentru construcția metalică*
- [124]. STAS 10103/76 - *Construcții de oțel. Principii fundamentale de calcul*
- [125]. STAS 10108/EC 3-93 - *Calculul elementelor din oțel*
- [126]. STAS 6911-80 - *Căi de rulare și opritoare pentru poduri rulante și macarale. Prescripții generale*
- [127]. DIN 18800 (Teil 1) - *Allgemeine Entwurfsgrundlagen (Entwurf)*
- [128]. SNIP II-23-81 - *Stalnîe Konstrukții (Steel structures). Design Specification*. Moscova, 1982
- [129]. *** - *Manual de utilizare COSMOS/M*, - SRAC- Santa Monica, 1999.

ANEXE

FIȘĂ DE MĂSURĂTORI PENTRU PODUL RULANT CU CAPACITATEA DE RIDICARE DE 100 KN DIN HALA UNEI OȚELĂRII



Denumirea	Toleranțe admisibile Δ în mm	Valori de măsurare			Precizia de măsurare
		Date	Măsurate	Diferența	
L1	$L \leq 10m \Delta L = \pm 2$	30000	30002	4	$\pm 0,5 \text{ mm}$
2	$L > 10m \Delta L = \pm 0,2 L$		29998		
e1	$e \leq 3 m \Delta e = \pm 3$	6700	6700	0	
2	$e > 3 m \Delta e = \pm 1 \text{‰} e$		6700		
D1	$L \leq 10m \Delta D = \pm 3$	30739	30741	+2	
2	$L > 10m ; L \text{ în m, iar } \Delta D = \pm [3+0,1(L-10)]$		30757	-2	
D1-D2	$L \leq 10m \Delta D = \pm 4$ $L > 10m \Delta D = \pm 5$		30744	D1-D2=4	
$\Delta h1-2$	$L \leq 10m \Delta h = \pm 2$		-8		
1-3	$L > 10m \Delta h = \pm 0,2 L$		+2		
1-4	$L \text{ în m}$		+5		
k 1	$D_R \leq 500 ; \Delta k = \pm 1$		338	k1-k2=2	
2			336		
3		$D_R > 500 ; \Delta k = \pm 2L$		289	k3-k4=2
4				287	
5	$D_R \text{ în mm}$			337	k5-k6=2
6				339	
7			288	.k7-k8=1	
8			287		
m1	$D_R \leq 500 ; \Delta m = 0$		338	.m1-m2=0	
2			338		
3		$D_R > 500 ; \Delta m = 0$		288	.m3-m4=1
4				289	
5	$D_R \text{ în mm}$			339	.m5-m6=0
6				339	
7			289	.m7-m8=0	
8			289		

**FIȘIERUL DE COMENZI CU DATE DE INTRARE ÎN
PROGRAMUL DE CALCUL COSMOS/M, VERSIUNEA 2.5**

```
C*
C* COSMOS/M      Geostar V2.50
C* Problem : finl      Date : 08-14-2000   Time : 18:30:46
C*
C* FILE,"D:\Program Files\DesignSTAR\Working\3.ses",1,1,1,1
VIEW,0,0,1,0
PT,1,185,0,0
SCALE,0
VIEW,1,1,1,0
VIEW,0,0,1,0
PTDEL,1,1,1
PLANE,Z,0,1
PT,1,185,0,0
SCALE,0
SCALE,0
PTDEL,1,1,1
PT,1,185,0,0
PT,2,185,210,0
SCALE,0
PT,3,45,210,0
PT,4,0,350,0
SCALE,0
PT,5,45,350,0
CREXTR,4,4,1,Y,250
CRLINE,2,4,5
CRLINE,3,1,2
CRARC,4,2,5,3,140
SCALE,0
PT,7,325,0,0
CRLINE,5,1,7
CREXTR,7,7,1,Y,600
CRLINE,7,6,8
CT,1,0,50,1,1,0
RG,1,1,1,0
SFEXTR,6,6,1,X,680
SCAL,0
SFEXTR,8,8,1,X,250
SCALE,0
SFEXTR,11,11,1,X,1120
SCALE,0
SFSYM,1,3,1,X,1,0
SFDEL,4,6,1
SFSYM,1,3,1,X,1,2050
SFDEL,4,6,1
SFSYM,1,3,1,X,0,2050
SFDEL,4,6,1
SFSYM,1,3,1,X,1,2050
SCALE,0
SFDEL,4,6,1
SFSYM,1,3,1,X,1,0
SCALE,0
SFDEL,4,6,1
SFSYM,1,3,1,X,1,2375
SFDEL,4,6,1
SFSYM,1,3,1,X,1,4750
SCALE,0
RGSYM,1,1,1,X,1,0
RGDEL,2,2,1
RGSYM,1,1,1,X,1,4750
VIEW,1,1,1,0
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
SFEXTR,1,33,1,Z,280
VIEW,1,1,1,0
```

```
SFEXTR,1,33,1,Z,-60
RGDENSITY,1,2,1,60,0.0001,1,0,1
RGSYM,1,2,1,Z,0,280
SCALE,0
SCALE,43
SCALE,0
SFSYM,40,72,1,Z,1,400
VIEW,1,0,0,0
VIEW,1,1,1,0
VIEW,0,1,0,0
SFDEL,73,150,1
SFSYM,40,72,1,Z,1,280
VIEW,1,1,1,0
SCALE,0
SFDEL,40,40,1
SFUNDEL,40,40,1
SFDEL,40,40,1
SCALE,0
SFDEL,45,47,2
SCALE,0
SFDEL,50,50,1
SFDEL,65,65,1
SFDEL,62,62,1
SFDEL,83,83,1
SFDEL,86,86,1
SFDEL,95,95,1
SFDEL,92,92,1
SFDEL,59,59,1
SCALE,0
SFDEL,101,101,1
SFDEL,103,103,1
SFDEL,104,104,1
SFDEL,99,99,1
SFDEL,70,70,1
SFDEL,71,71,1
SCALE,0
SFDEL,91,91,1
SCALE,0
SFDEL,48,48,1
SFUNDEL,48,48,1
SFDEL,80,80,1
SFDEL,98,98,1
SFDEL,53,53,1
SCALE,0
SFDEL,73,77,1
SCALE,0
SFDEL,41,43,1
SCALE,0
SFDEL,66,72,6
SCALE,0
EGROUP,1,SHELL3,0,0,0,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,6,10,0,0,0,0,0
RCONST,1,2,1,6,6,0,0,0,0,0
LIGHT,0,0,0,0
VIEW,1,1,1,0
ACTSET,RC,1
SCALE,0
SCALE,0
SFSYM,1,6,1,Z,1,280
MA_SF,1,6,1,0,60,0
MA_SF,106,111,1,0,60,0
MA_RG,1,4,1,3,1,0
VIEW,0,0,1,0
NMERGE,1,1948,1,1,0,0,0
NMERGE,1,10000,1,3,0,0,0
NCOMPRESS,1,1948
VIEW,1,1,1,0
SCALE,0
```

SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
SFEXTR,43,43,1,Z,60
SCALE,0
MA_SF,7,105,1,0,60,0
SCALE,0
EDEL,1,1,1
EDEL,1,100000,1
ACTSET,RC,1
MA_SF,1,6,1,0,60,0
MA_SF,106,111,1,0,60,0
MA_RG,1,4,1,3,1,0
ACTSET,RC,2
MA_SF,7,105,1,0,60,0
MA_SF,112,112,1,0,60,0
VIEW,0,0,1,0
VIEW,1,0,0,0
SCALE,0
NMERGE,1,100000,1,3,0,0,0
NCOMPRESS,1,4607
ELSYM,1,6714,1,Z,1,11070
SCALE,0
SCALE,0
CREXTR,81,83,2,Z,12000
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
PTND,101,4018
PTND,102,4136
SCALE,0
CRDEL,240,241,1
CRUNDEL,240,241,1
SCALE,0
CREXTR,34,36,2,Z,2500
SCALE,0
CREXTR,103,104,1,Y,-750
CRLINE,246,105,33
CRLINE,247,106,35
CRLINE,248,34,36
CREXTR,34,36,2,Z,670
CREXTR,107,108,1,Z,830
CREXTR,107,110,1,Y,-1000
PTINTCC,247,253,255,2,5E-005
PTINTCC,246,252,254,2,5E-005
CRPLINE,256,33,117,118,105,105
CRPLINE,259,35,115,116,106,106
CRPLINE,262,104,103,103
CRPLINE,263,106,105,105
SFEXTR,244,245,1,Z,1035
SFEXTR,262,263,1,Z,1035
SCALE,0
SFEXTR,264,267,3,Z,1000
SFEXTR,270,271,1,Z,1000
CRPLINE,280,109,103,103
CRPLINE,281,110,104,104
SF2CR,121,250,251,0
SF2CR,122,280,281,0
SCALE,0
SF2CR,123,248,249,0
SF2CR,124,256,259,0
SF2CR,125,257,260,0
SCALE,0
SF2CR,126,269,266,0
SF2CR,127,277,274,0
SCALE,0
SF2CR,128,280,258,0

SF2CR,129,251,260,0
SF2CR,130,249,259,0
SF2CR,131,281,261,0
SF2CR,132,258,261,0
SF2CR,133,257,260,0
SF2CR,133,256,259,0
SF2CR,133,250,257,0
SF2CR,134,248,256,0
SCALE,0
SFSYM,113,1,1,Z,1,0
VIEW,0,0,1,0
VIEW,0,0,1,0
VIEW,1,0,0,0
VIEW,1,1,1,0
SFDEL,120,120,1
SFDEL,116,116,1
SFEXTR,278,279,1,Z,100
SFDEL,218,218,1
SFDEL,217,217,1
SFEXTR,278,279,1,Z,1000
SFEXTR,272,275,3,Z,1000
SCALE,0
SFSYM,113,220,1,Z,1,5535
SFDEL,221,500,1
SCALE,0
SCALE,0
SFDEL,216,216,1
SCALE,0
SFSYM,113,220,1,Z,1,0
SFDEL,221,1000,1
SFSYM,113,220,1,Z,1,11070
SFDEL,221,1000,1
SFSYM,113,220,1,Z,1,11070
SFDEL,221,221,1
SFDEL,221,1000,1
SFDEL,113,1000,1
SFUNDEL,113,150,1
SFDEL,130,200,1
SCALE,0
SFUNDEL,130,135,1
SFDEL,135,135,1
SFSYM,113,134,1,Z,1,11070
SCALE,0
SFDEL,135,200,1
SFEXTR,272,275,3,Z,1000
SFEXTR,278,279,1,Z,1000
SFSYM,113,138,1,Z,1,11070
SFDEL,139,1000,1
SFSYM,113,138,1,Z,1,11070
SFDEL,113,139,300
SFDEL,139,300,1
SFSYM,113,138,1,Z,1,11630
VIEW,0,0,1,0
VIEW,1,0,0,0
EDEL,6715,200000,1
ELSYM,1,6714,1,Z,0,11630
VIEW,1,1,1,0
SF2CR,164,304,338,0
SF2CR,165,265,266,0
SCALE,0
CREXTR,81,81,1,X,-50
SFEXTR,361,361,1,Z,11070
CREXTR,83,83,1,X,50
SFEXTR,365,365,1,Z,11070
CRSYM,361,365,1,Y,1,-600
SCALE,0
CRDEL,369,373,1
CREXTR,82,82,1,X,-50

```

CREXTR,84,84,1,X,50
SCALE,0
SFDRAG,370,370,1,2,259,260
SFDRAG,369,369,1,2,256,257
SCALE,0
SFDRAGING,374,374,1,3,261,269,277
SFDRAGING,380,380,1,1,258
SFDRAGING,392,392,1,2,266,274
SCALE,0
SFDRAGING,389,389,1,1,297
SFDRAGIND,398,398,1,6,294,352,341,338,344,333
SFDRAGING,401,401,1,6,355,340,337,349,334,331
SFDRAGING,419,419,1,1,330
SCALE,0
SF2CR,192,350,346,0
SF2CR,193,343,345,0
SF2CR,194,342,348,0
SF2CR,195,360,303,0
SF2CR,196,313,316,0
SF2CR,197,354,295,0
SF2CR,198,272,275,0
SF2CR,199,264,267,0
SF2CR,200,244,245,0
SCALE,0
SF2CR,201,287,289,0
SF2CR,202,291,288,0
RCONST,1,3,1,6,8,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,2.1E5,NUXY,.3
MA_SF,166,167,1,0,60,0
MA_SF,161,191,1,0,60,0
EDEL,13429,100000,1
MA_SF,166,191,1,0,60,0
MA_SF,144,144,1,0,60,0
MA_SF,162,163,1,0,60,0
MA_SF,137,138,1,0,60,0
MA_SF,119,120,1,0,60,0
MA_SF,115,116,1,0,60,0
MA_SF,152,152,1,0,60,0
SCALE,0
MA_SF,148,149,1,0,60,0
MA_SF,146,150,4,0,60,0
MA_SF,147,157,10,0,60,0
MA_SF,140,141,1,0,60,0
SCALE,0
MA_SF,122,132,10,0,60,0
MA_SF,121,125,4,0,60,0
MA_SF,123,124,1,0,60,0
ACTSET,RC,2
MA_SF,134,134,1,0,60,0
MA_SF,133,133,1,0,60,0
MA_SF,129,130,1,0,60,0
SCALE,0
MA_SF,142,143,1,0,60,0
MA_SF,160,161,1,0,60,0
MA_SF,135,136,1,0,60,0
MA_SF,117,118,1,0,60,0
MA_SF,165,165,1,0,60,0
MA_SF,128,128,1,0,60,0
MA_SF,114,114,1,0,60,0
MA_SF,131,131,1,0,60,0
MA_SF,155,159,4,0,60,0
MA_SF,154,158,4,0,60,0
MA_SF,153,156,3,0,60,0
MA_SF,164,164,1,0,60,0
MA_SF,139,139,1,0,60,0
MA_SF,192,200,1,0,60,0
SCALE,0
MA_SF,201,202,1,0,60,0

```

```

ELSYM,13429,29662,1,X,0,4745
VIEW,0,0,1,0
NMERGE,1,30000,1,10,0,0,0
NCOMPRESS,1,22530
SCALE,0
VIEW,1,1,1,0
DCR,80,UY,0,80,1,UZ,
SCALE,0
DCR,35,UY,0,35,1,UX,UZ,
SCALE,0
DND,4833,UY,0,4833,1,UZ,
DND,5873,UY,0,5873,1,UZ,
DND,5891,UY,0,5891,1,UZ,
DND,5890,UY,0,5890,1,UZ,
DND,5888,UY,0,5888,1,UZ,
DND,4927,UY,0,4927,1,UZ,
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
DND,4856,UY,0,4856,1,UZ,
DND,4964,UY,0,4964,1,UZ,
DND,4966,UY,0,4966,1,UZ,
DND,4967,UY,0,4967,1,UZ,
DND,4949,UY,0,4949,1,UZ,
DND,4762,UY,0,4762,1,UZ,
VIEW,1,1,1,0
SCALE,0
PLANE,Z,0,1
PT,211,230,615,0
PT,212,180,600,0
CREXTR,212,212,1,Z,12000
FND,1616,FY,-730,1616,1
FND,1919,FY,-730,1919,1
C*      Value must be specified
FND,1920,FY,-730,1920,1
FND,1921,FY,-730,1921,1
FND,1922,FY,-730,1922,1
FND,1710,FY,-730,1710,1
SCALE,0
PTND,214,1672
CREXTR,214,214,1,Z,12000
C*      Undefined variable = <FND>
FND,1672,FY,-688,1672,1
FND,2755,FY,-688,2755,1
FND,2756,FY,-688,2756,1
FND,2757,FY,-688,2757,1
FND,2758,FY,-688,2758,1
FND,1766,FY,-688,1766,1
SCALE,0
FND,4919,FY,-730,4919,1
FND,5905,FY,-730,5905,1
FND,5914,FY,-730,5914,1
FND,5913,FY,-730,5913,1
C*      Value must be specified
FND,5900,FY,-730,5900,1
FND,4825,FY,-730,4825,1
FND,6129,FY,-730,6129,1
C*      Undefined variable = <FNDEL>
FNDEL,6129,FY,6129,1
SCALE,0
FND,4892,FY,-730,4892,1
FND,5069,FY,-730,5069,1
FND,5078,FY,-730,5078,1
FND,5077,FY,-730,5077,1
FND,5064,FY,-730,5064,1
FND,4798,FY,-730,4798,1
SCALE,0

```

```

PT,216,1005,600,990
CREXTR,216,216,1,X,300
PT,218,1005,600,9730
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
SCALE,0
FND,9267,FY,-1542,9267,1
FND,9276,FY,-1542,9276,1
FND,9275,FY,-1542,9275,1
FND,9274,FY,-1542,9274,1
FND,9273,FY,-1542,9273,1
FND,9272,FY,-1542,9272,1
FND,9267,FX,-4132,9267,1
FND,9276,FX,-4132,9276,1
FND,9275,FX,-4132,9275,1
FND,9274,FX,-4132,9274,1
FND,9273,FX,-4132,9273,1
FND,9273,FX,-4132,9273,1
FND,9272,FX,-4132,9272,1
SCALE,0
C*
C* COSMOS/M          Geostar V2.50
C* Problem : finl      Date : 08-15-2000   Time : 14:46:18
C*
FND,8591,FY,-1542,8591,1
FND,8614,FY,-1542,8614,1
FND,8613,FY,-1542,8613,1
FND,8612,FY,-1542,8612,1
FND,8611,FY,-1542,8611,1
FND,8610,FY,-1542,8610,1
FND,8591,FX,-4132,8591,1
FND,8614,FX,-4132,8614,1
FND,8613,FX,-4132,8613,1
FND,8612,FX,-4132,8612,1
FND,8611,FX,-4132,8611,1
C* Force label must be specified
FND,8610,FX,-1432,8610,1
SCALE,0
FND,217,FY,-934,217,1
FND,2135,FY,-934,2135,1
FND,2136,FY,-933,2136,1
FND,387,FY,-934,387,1
FND,2138,FY,-934,2138,1
FND,1030,FY,-934,1030,1
FNDEL,387,AL,387,1
FND,2137,FY,-934,2137,1
SCALE,0
PT,219,1545,600,0
PT,220,2995,595,0
SCALE,0
PTND,221,637
C* Undefined variable = <CREXTR>
PTND,222,1
CREXTR,221,221,1,Z,300
FND,637,FY,-467,637,1
FND,687,FY,-467,687,1
FND,2592,FY,-467,2592,1
FND,2593,FY,-467,2593,1
FND,2594,FY,-467,2594,1
FND,1413,FY,-467,1413,1
SCALE,0
CREXTR,219,219,1,Z,300
C* Undefined variable = <ZOOMIN>
FND,203,FY,-467,203,1
FND,2267,FY,-467,2267,1
FND,2268,FY,-467,2268,1

```

```

FND,2269,FY,-467,2269,1
FND,2270,FY,-467,2270,1
FND,1044,FY,-467,1044,1
SCALE,0
PT,224,0,0,0
PT,225,1005,600,1373
CREXTR,225,225,1,X,300
PTND,227,6655
CREXTR,227,227,1,X,300
CRDEL,453,453,1
PTND,227,6655
CREXTR,227,227,1,X,6000
FND,6655,FY,-1617,6655,1
FND,9305,FY,-1617,9305,1
FND,9306,FY,-1617,9306,1
FND,9307,FY,-1617,9307,1
FND,9308,FY,-1617,9308,1
FND,7019,FY,-1617,7019,1
SCALE,0
FND,14773,FY,-630,14773,1
FND,17834,FY,-630,17834,1
FND,17392,FY,-630,17392,1
FND,17383,FY,-630,17383,1
FND,17348,FY,-630,17348,1
FND,14406,FY,-630,14406,1
SCALE,0
SCALE,0
CREXTR,129,129,1,X,5000
FND,7884,FY,-10468,7884,1
C*      Node must be specified
FND,7883,FY,-10468,7883,1
FND,7882,FY,10468,7882,1
FNDEL,7882,AL,7882,1
C*      Undefined variable = <FND>
C*      Node must be specified
FND,7882,FY,-10468,7882,1
FND,7881,FY,-10468,7881,1
FND,7880,FY,-10468,7880,1
FND,7879,FY,-10468,7879,1
SCALE,0
C*      Undefined variable = <FND>
FND,15970,FY,-6274,15970,1
FND,15969,FY,-6273,15969,1
FND,15972,FY,-6273,15972,1
FND,15974,FY,-6273,15974,1
FND,15976,FY,-6273,15976,1
FND,15978,FY,-6273,15978,1
FND,15970,FX,9061,15970,1
C*      Node must be specified
FND,15969,FX,-9061,15969,1
FNDEL,15969,FX,22668,1
SCALE,0
C*      Undefined variable = <FND>
C*      Node must be specified
FND,15970,FX,9061,15970,1
FND,15969,FX,9061,15969,1
FND,15972,FX,9061,15972,1
FND,15974,FX,9061,15974,1
FND,15976,FX,9061,15976,1
FND,15978,FX,9061,15978,1
SCALE,0
PT,230,1005,600,9330
SCALE,0
SCALE,0
PTND,231,6508
CREXTR,231,231,1,X,5000
C*      Undefined variable = <ZOOMIN>
C*      Undefined variable = <FND>

```

```
FND,6508,FY,-1617,6508,1
FND,8729,FY,-1617,8729,1
FND,8730,FY,-1617,8730,1
FND,8731,FY,-1617,8731,1
FND,8732,FY,-1617,8732,1
FND,6872,FY,-1617,6872,1
SCALE,0
FND,15067,FY,-630,15067,1
FND,16798,FY,-630,16798,1
FND,16826,FY,-630,16826,1
FND,16813,FY,-630,16813,1
FND,16775,FY,-630,16775,1
FND,14700,FY,-630,14700,1
SCALE,0
FNDEL,1030,AL,1030,1
FNDEL,2138,AL,2138,1
FNDEL,2137,FY,2137,1
FNDEL,2136,FY,2136,1
FNDEL,2135,FY,2135,1
FNDEL,217,FY,217,1
CREXTR,85,85,1,Z,12000
SCALE,0
SCALE,0
FND,4219,FY,-933,4219,1
FND,5305,FY,-933,5305,1
FND,5303,FY,-933,5303,1
FND,5301,FY,-933,5301,1
FND,5299,FY,-933,5299,1
FND,3398,FY,-933,3398,1
SCALE,0
C* R_CHECK,STATIC
C*
C* COSMOS/M      Geostar V2.50
C* Problem : fin1      Date : 08-15-2000  Time : 16:12:24
C*
C* R_STATIC
C*
C* COSMOS/M      Geostar V2.50
C* Problem : fin1      Date : 08-15-2000  Time : 16:44:22
C*
SCALE,0
IMAGESAV,"D:\Program Files\DesignSTAR\Working\breto\finl_colt1"
IMAGESAV,"D:\Program Files\DesignSTAR\Working\breto\finl_cl"
IMAGESAV,"D:\Program Files\DesignSTAR\Working\breto\finl_c11"
C*
C* COSMOS/M      Geostar V2.50
C* Problem : fin1      Date : 08-24-2000  Time : 21:43:13
C*
SCALE,0
VIEW,1,0,0,0
```


**Modelul geometric și de calcul al structurii de rezistență a podului rulant
de 100 KN –17,3 m în urma analizei cu elemente finite SHELL 3**

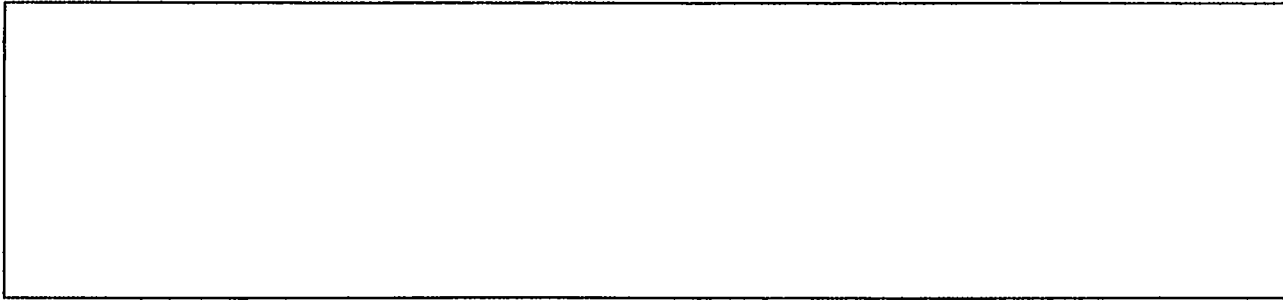
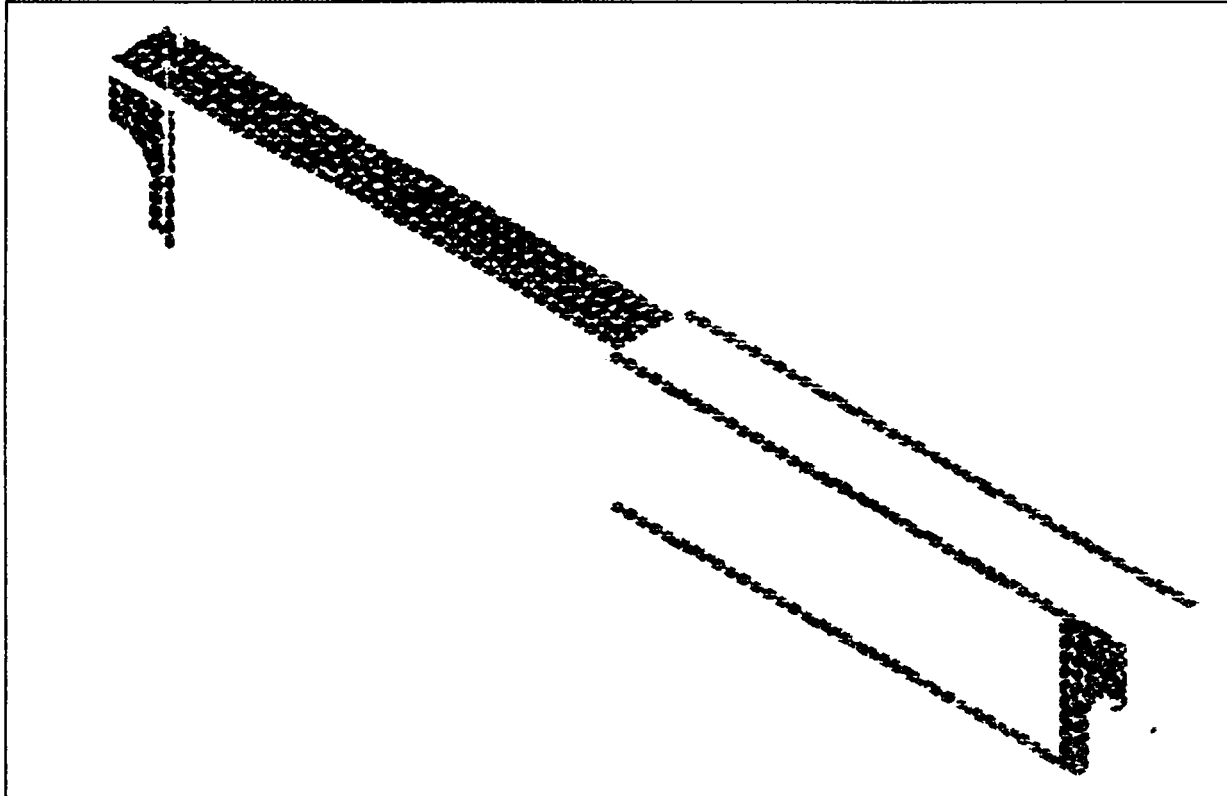
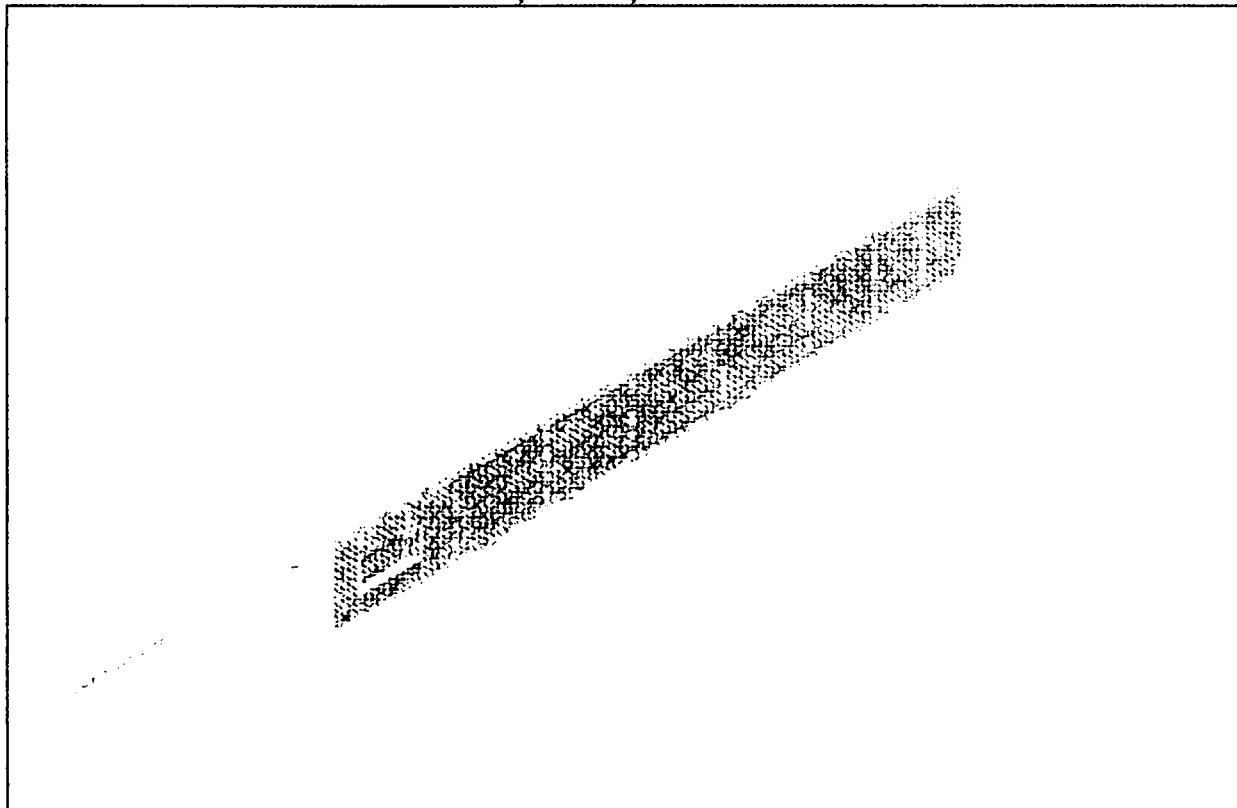


Fig.A.3.1 Secțiune mediană prin traversa I după discretizare



*Fig.A.3.2 Reprezentare izometrică a modelului geometric al traversei I
cu evidențierea rețelei de discretizare*



*Fig.A.3.3 Reprezentare izometrică a modelului geometric al lonjeronului II
cu evidențierea rețelei de discretizare*

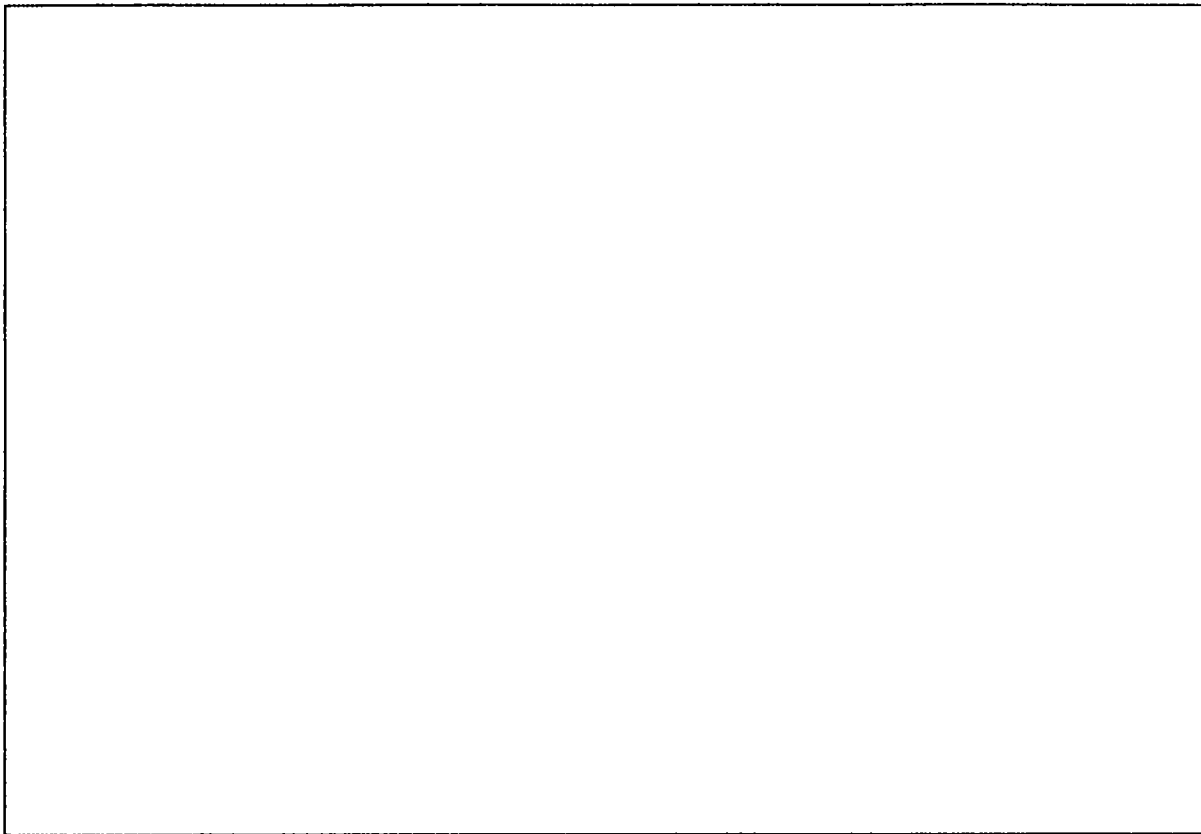


Fig.A.3.4a *Reprezentarea rețelei de discretizare corespunzătoare traversei I*

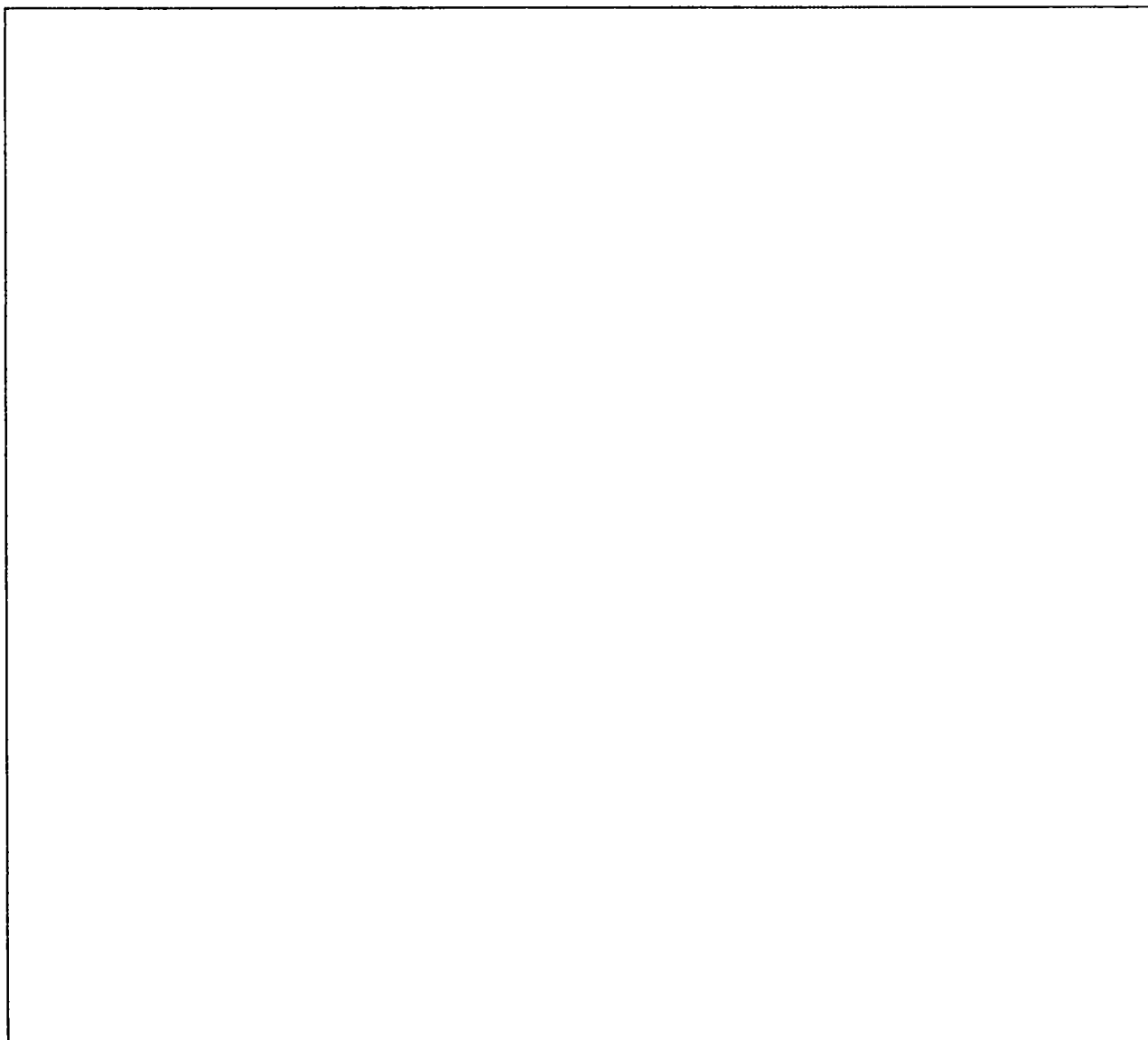


Fig.A.3.4b *Detaliu al rețelei de discretizare corespunzătoare traversei I, în apropierea sistemului de axe de coordonate*

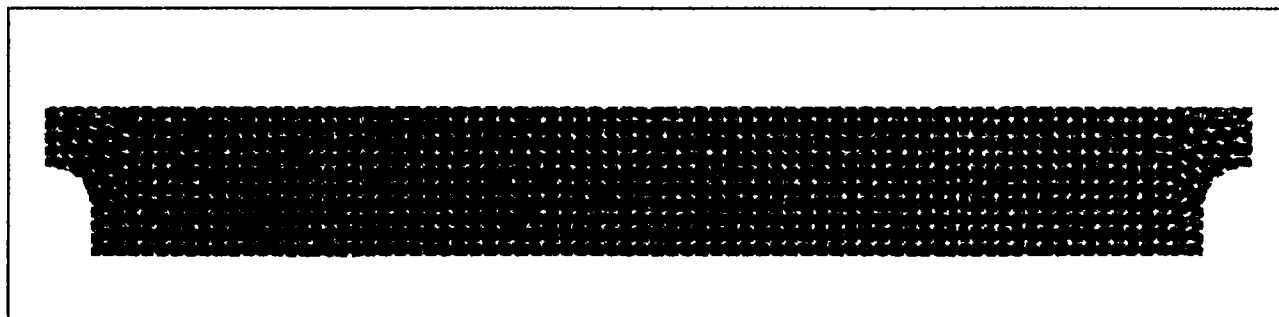


Fig.A.3.5a Vedere din „A” a traversei I după operația de discretizare

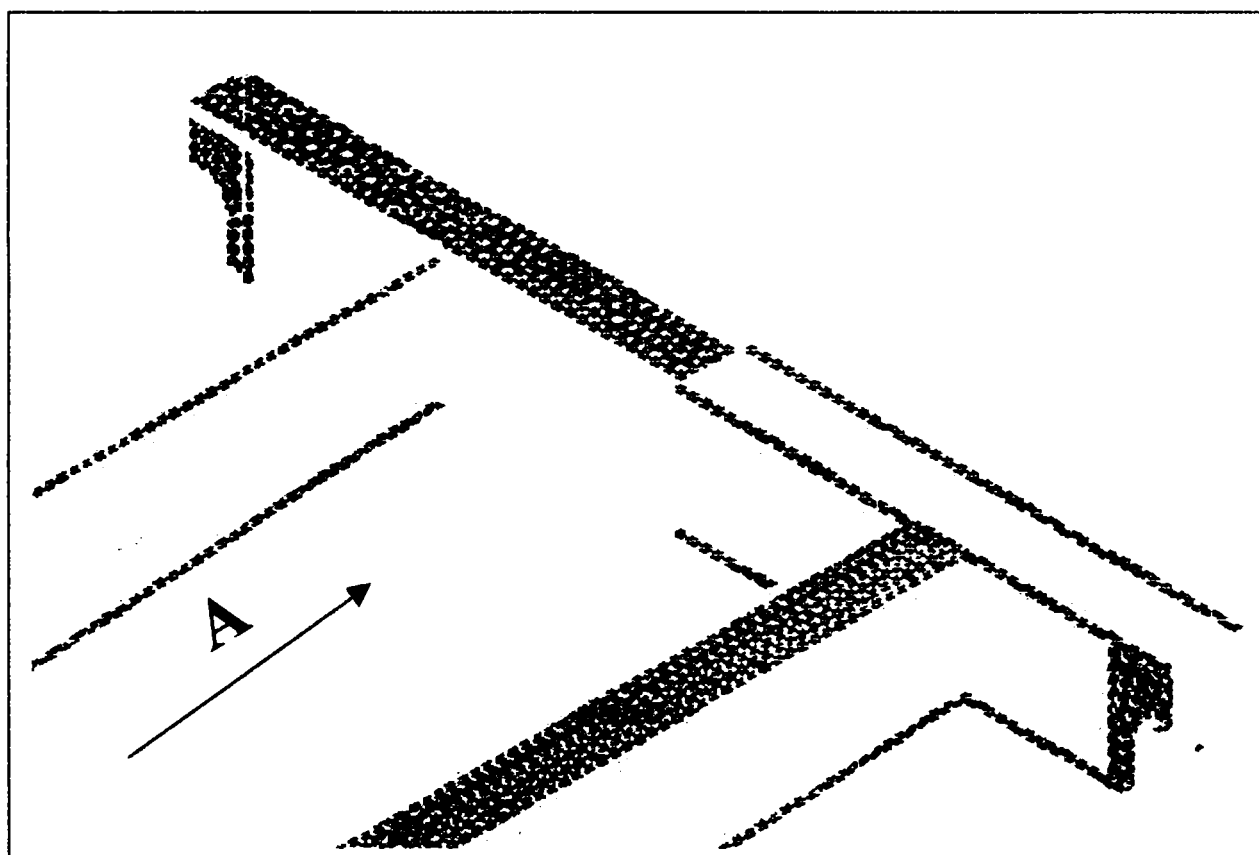


Fig.A.3.5b Reprezentare izometrică a unei porțiuni din modelul geometric al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m

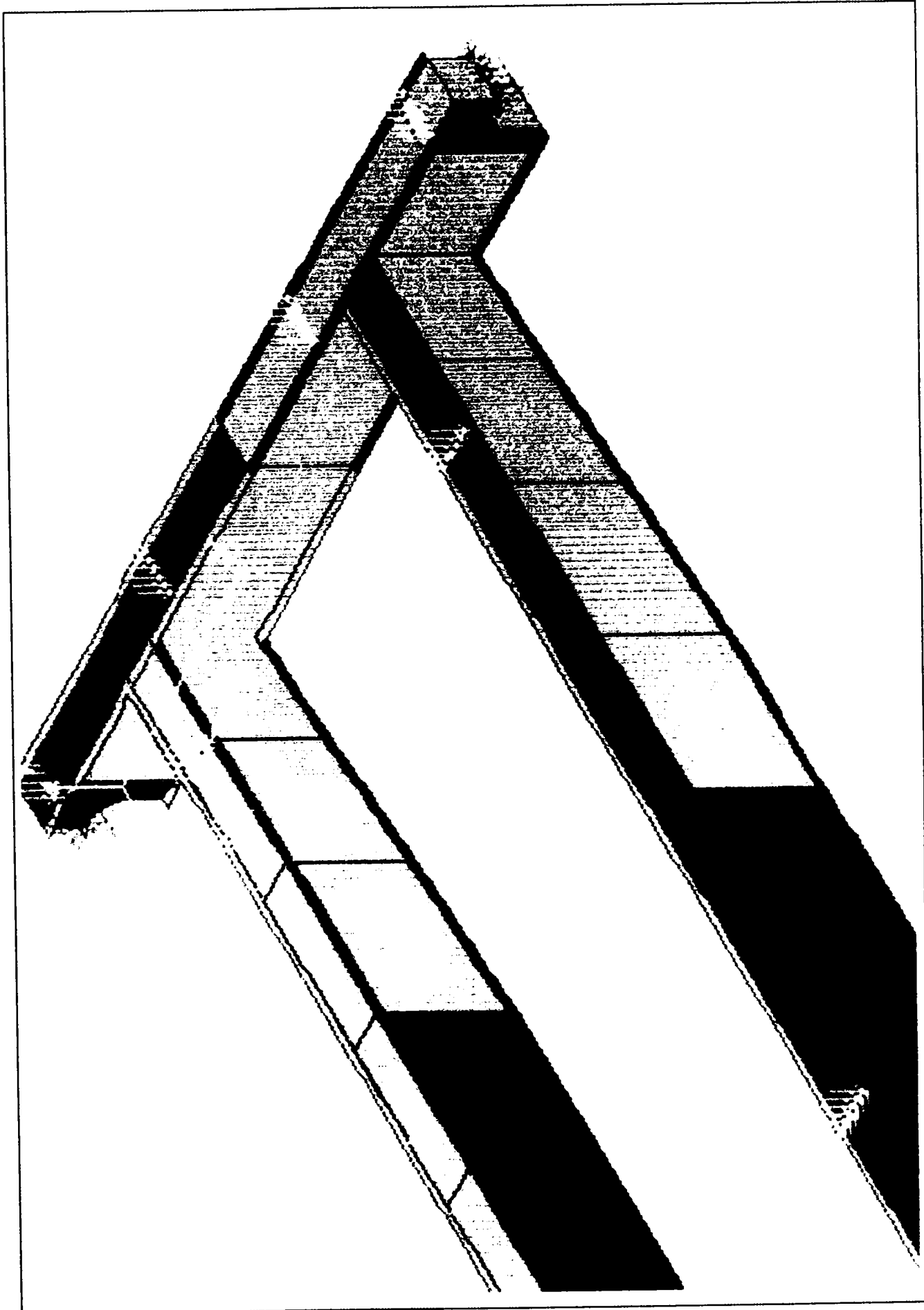


Fig.A.3.6a Model de calcul al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m

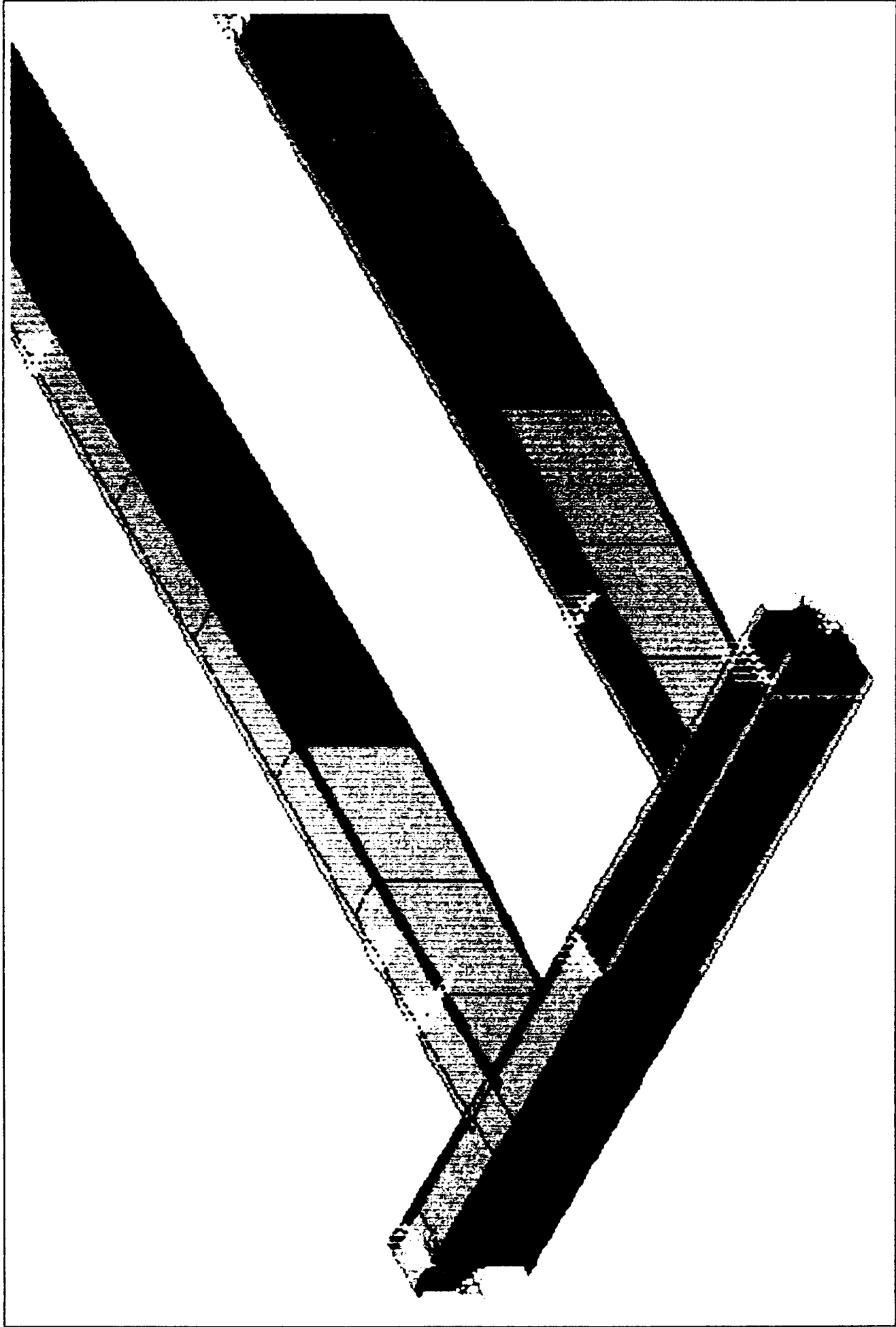


Fig.A.3.6b Model de calcul al structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN – 17,3 m

Rezultate teoretice obținute în urma analizei structurii de rezistență a podului rulant de 100 KN -17,3 m cu elemente finite de tip SHELL 3

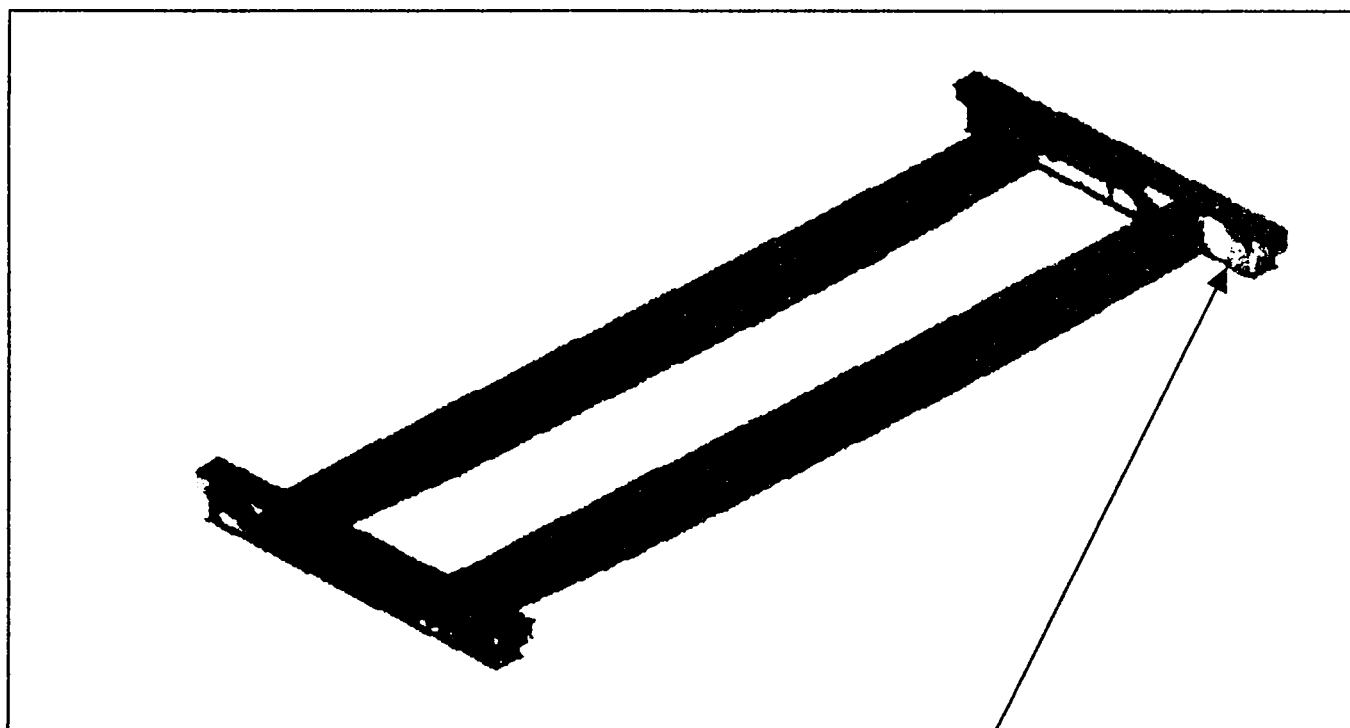


Fig. A.4a.1 Distribuția tensiunii τ_{xy} pentru zonele critice de la o extremitate a traversei I (traseu 1)

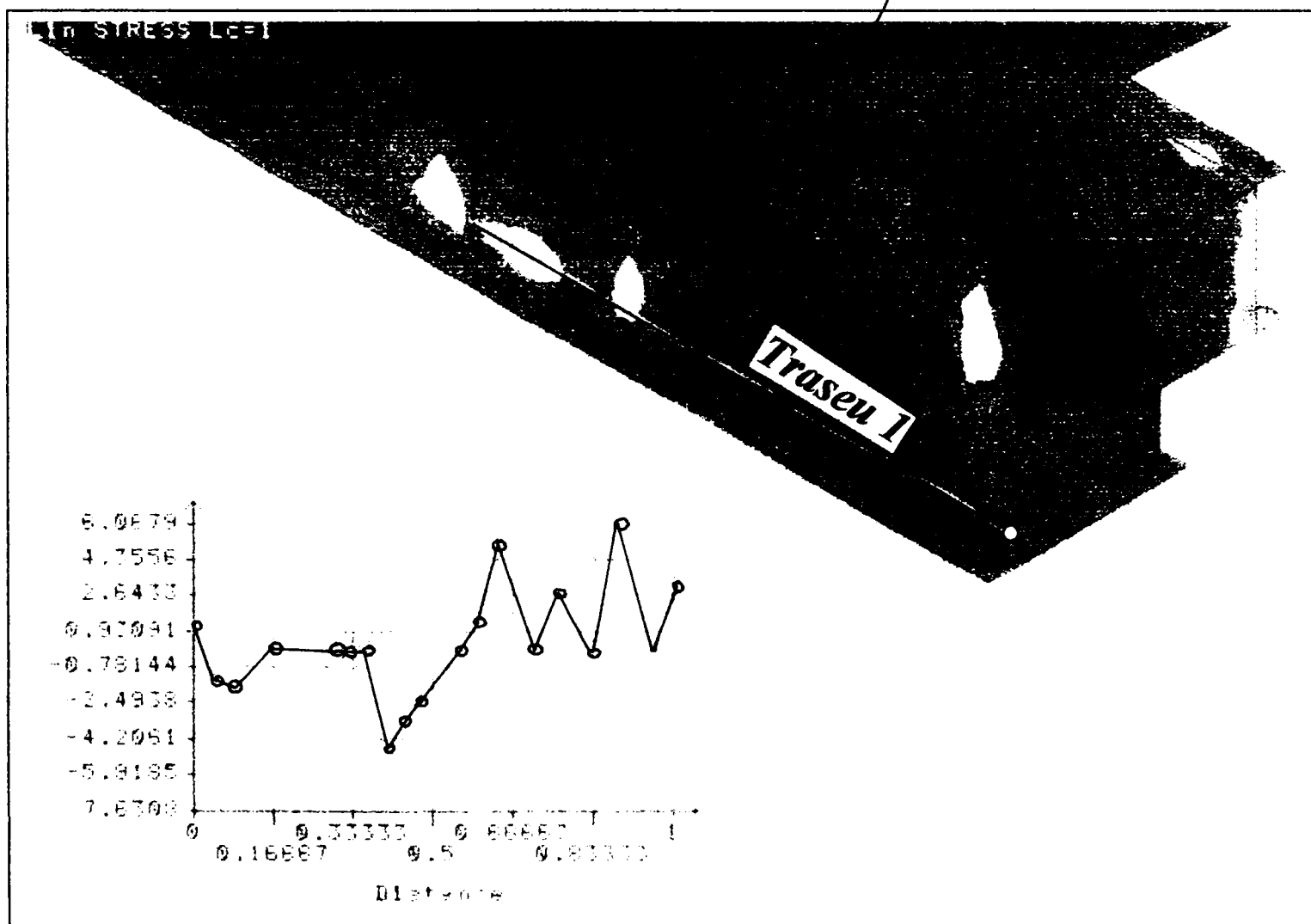


Fig. A.4a.2 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând traversei I (traseu 1)

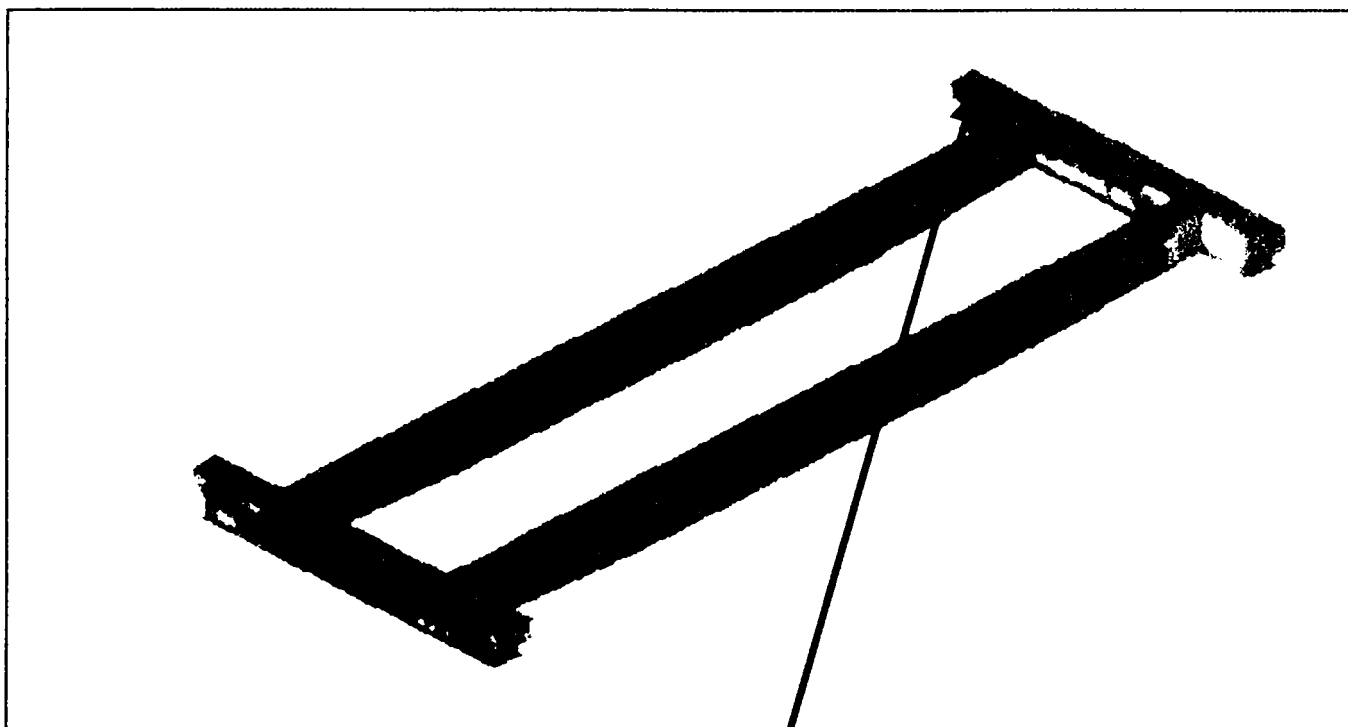


Fig.A.4a.3 Distribuția tensiunii τ_{xy} pentru zonele critice de la o extremitate a traversei I (traseu 2)

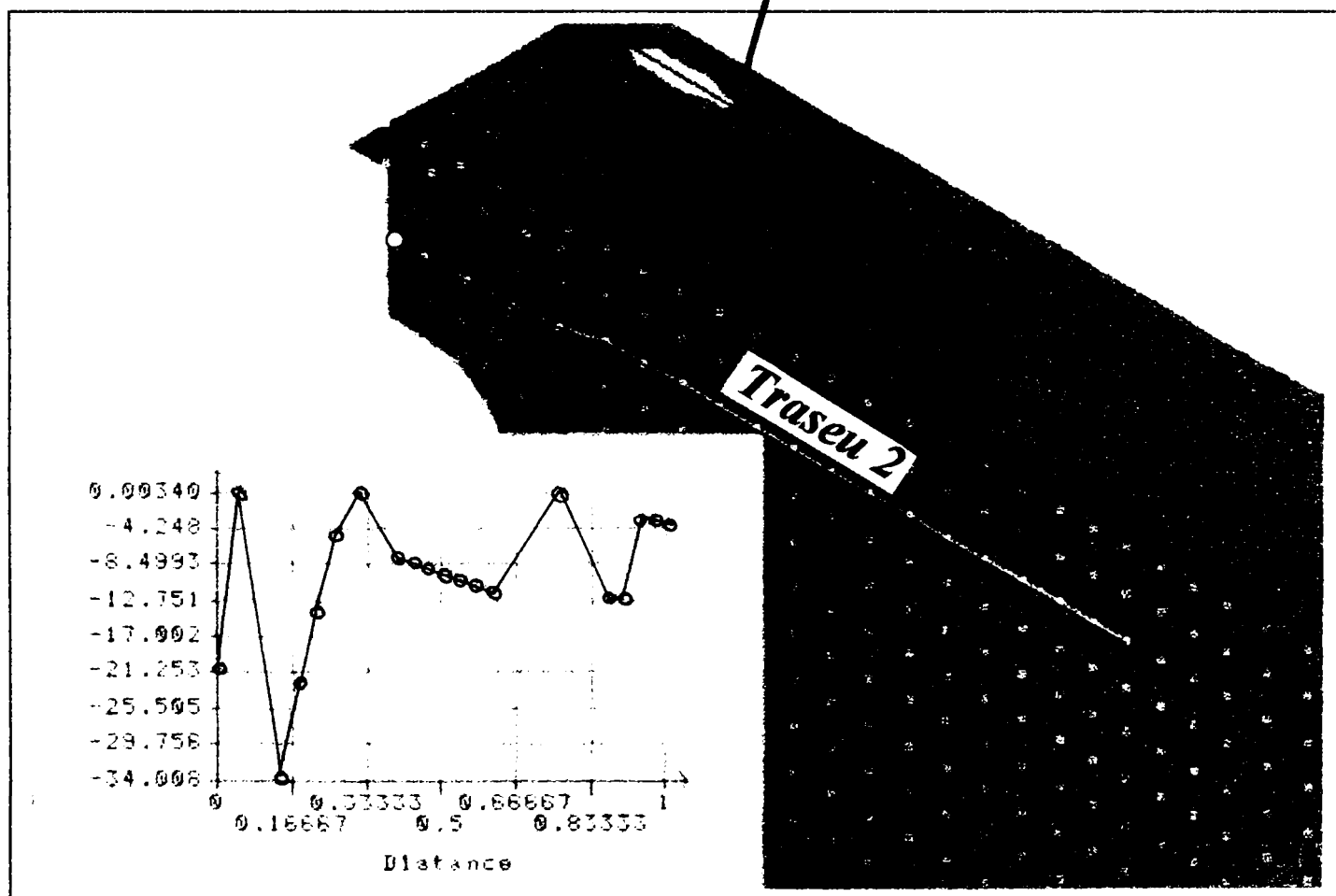


Fig. A.4a.4 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând traversei I (traseu 2)

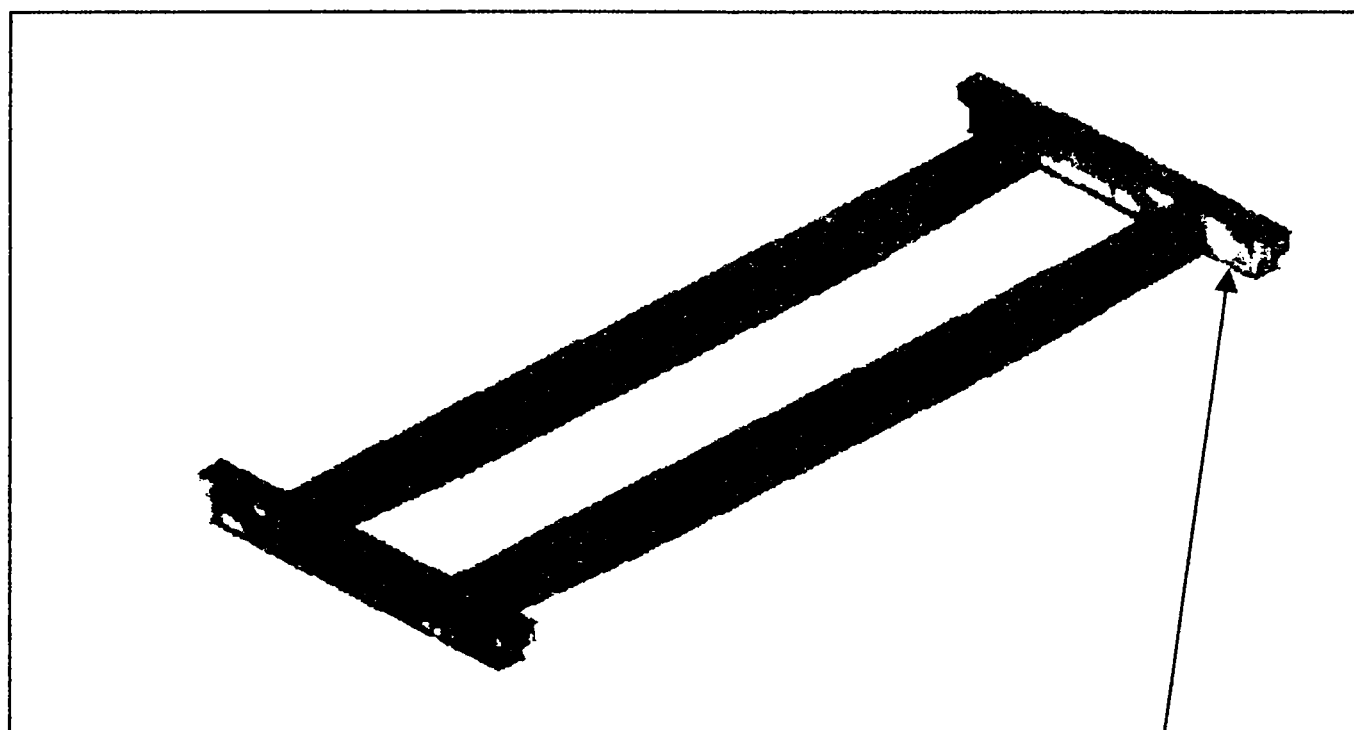


Fig. A.4a.5 Distribuția tensiunii τ_{xy} pentru zonele critice aparținând tălpii inferioare a traversei I

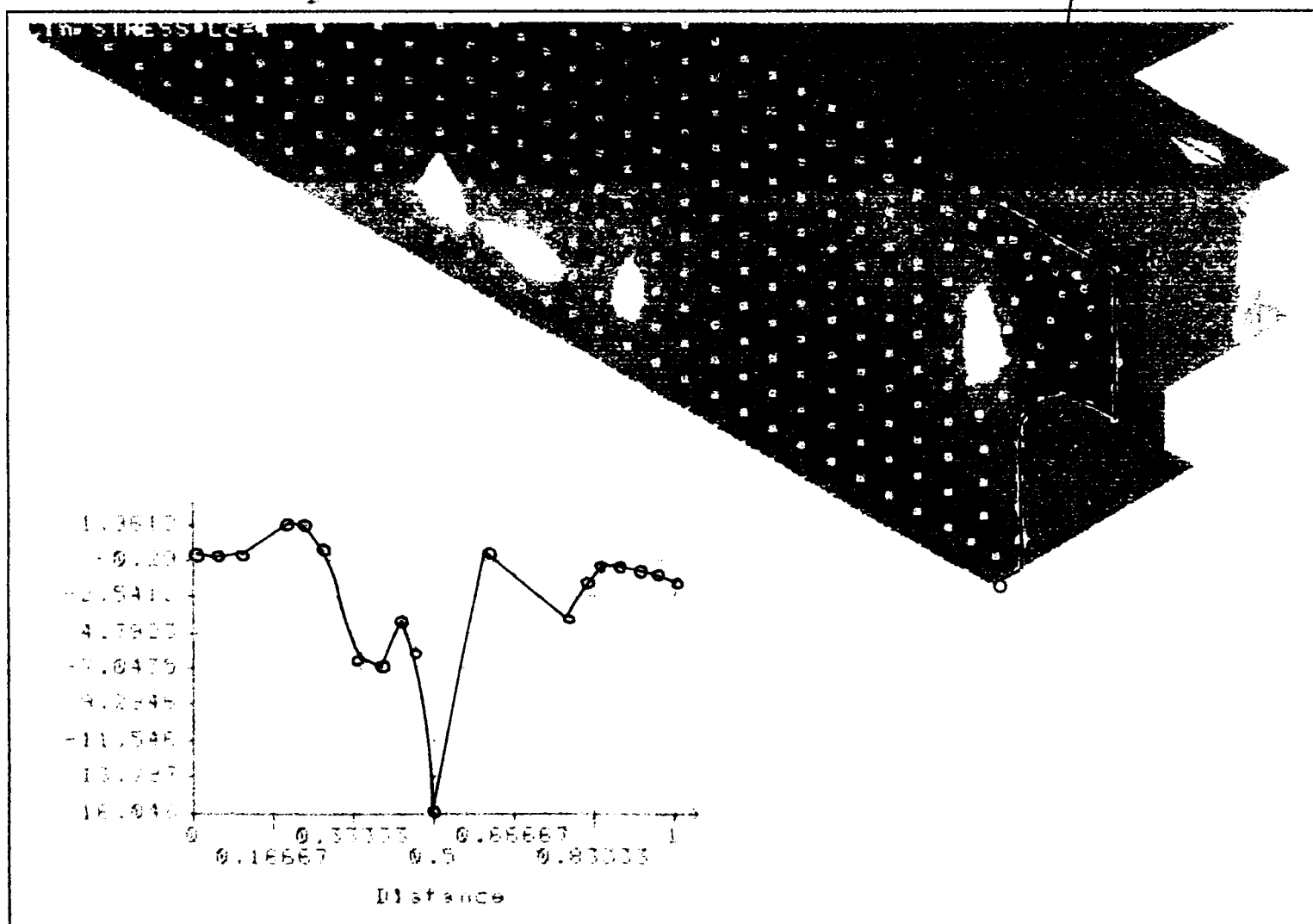


Fig. A.4a.6 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând tălpii inferioare a traversei I

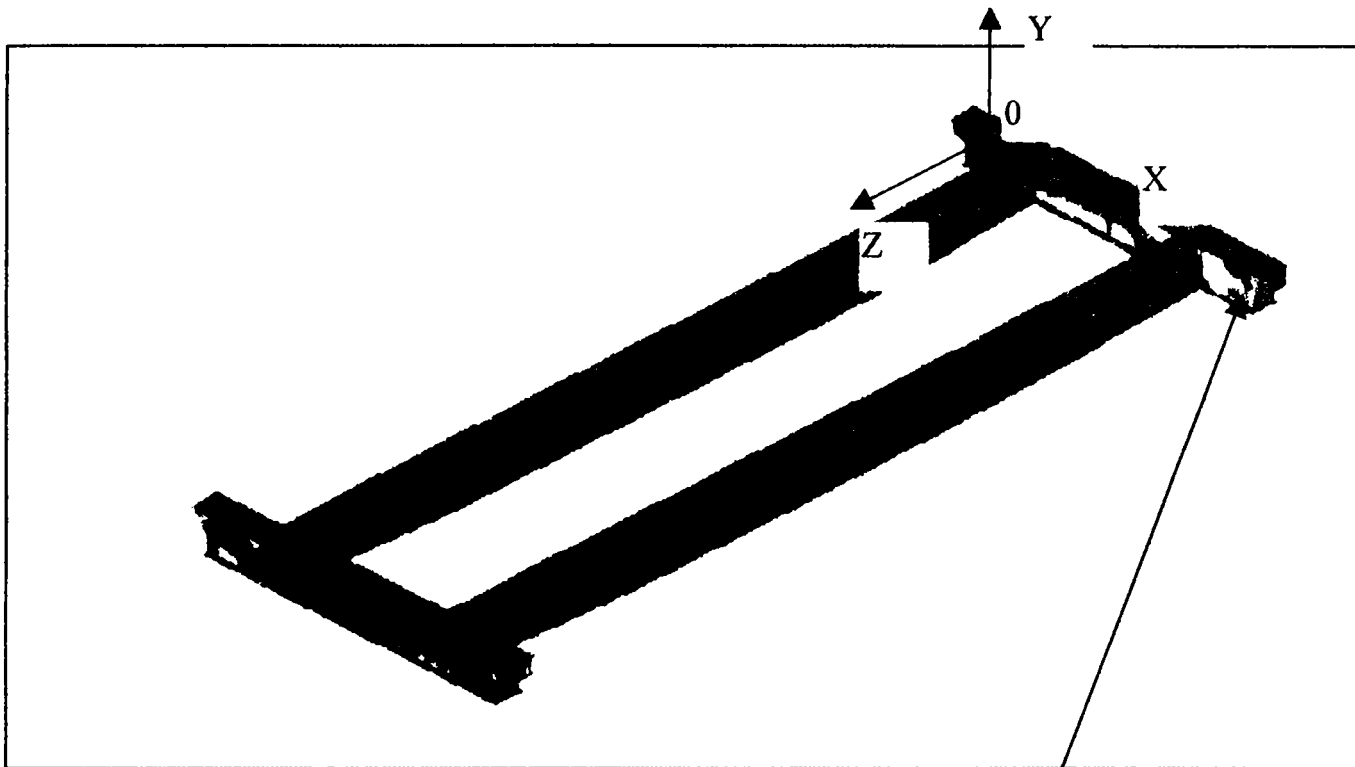


Fig.A.4a.7 Distribuția tensiunii τ_{xy} pentru zonele critice aparținând părții laterale interioare a traversei I

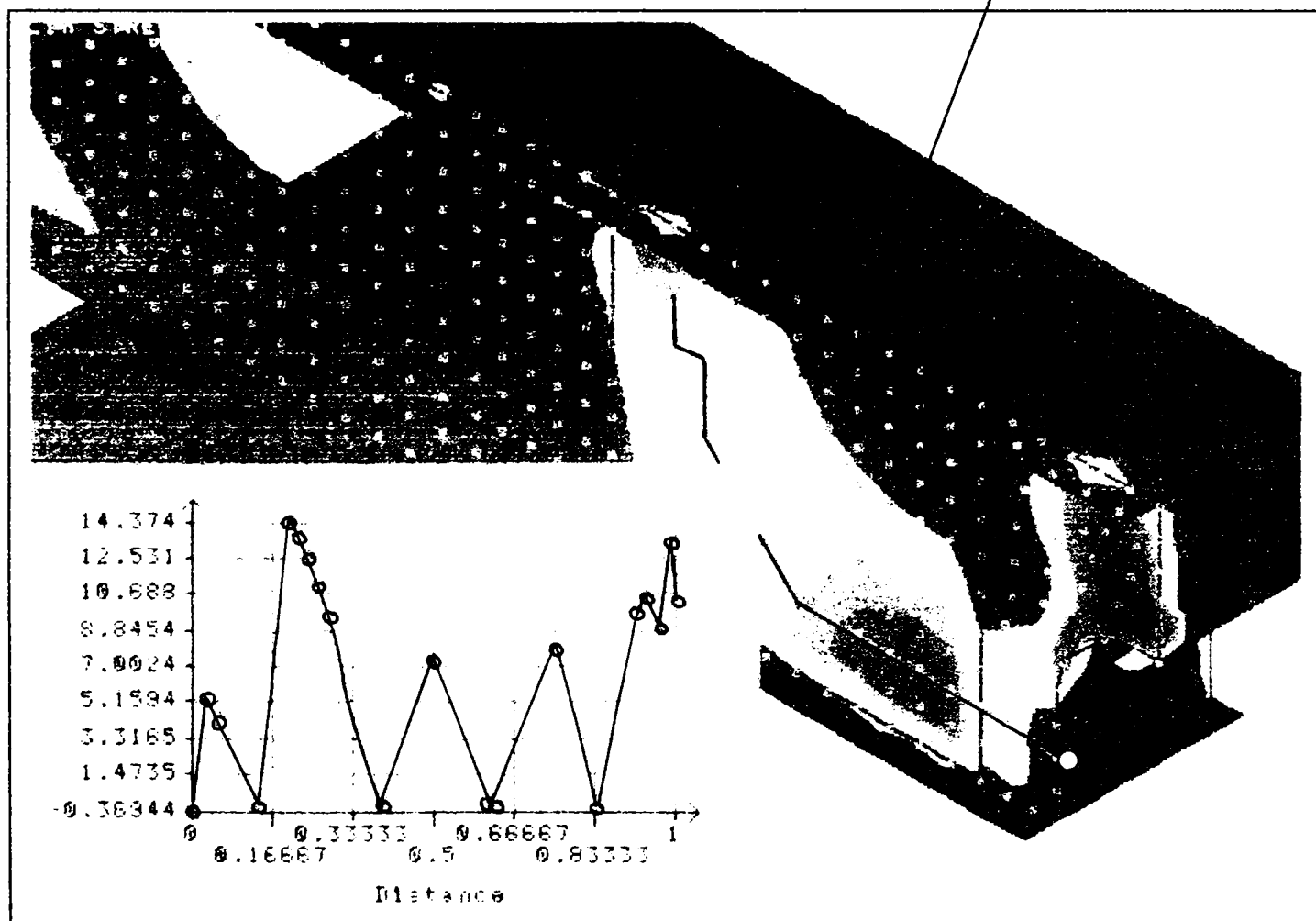


Fig. A.4a.8 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând părții laterale interioare a traversei I

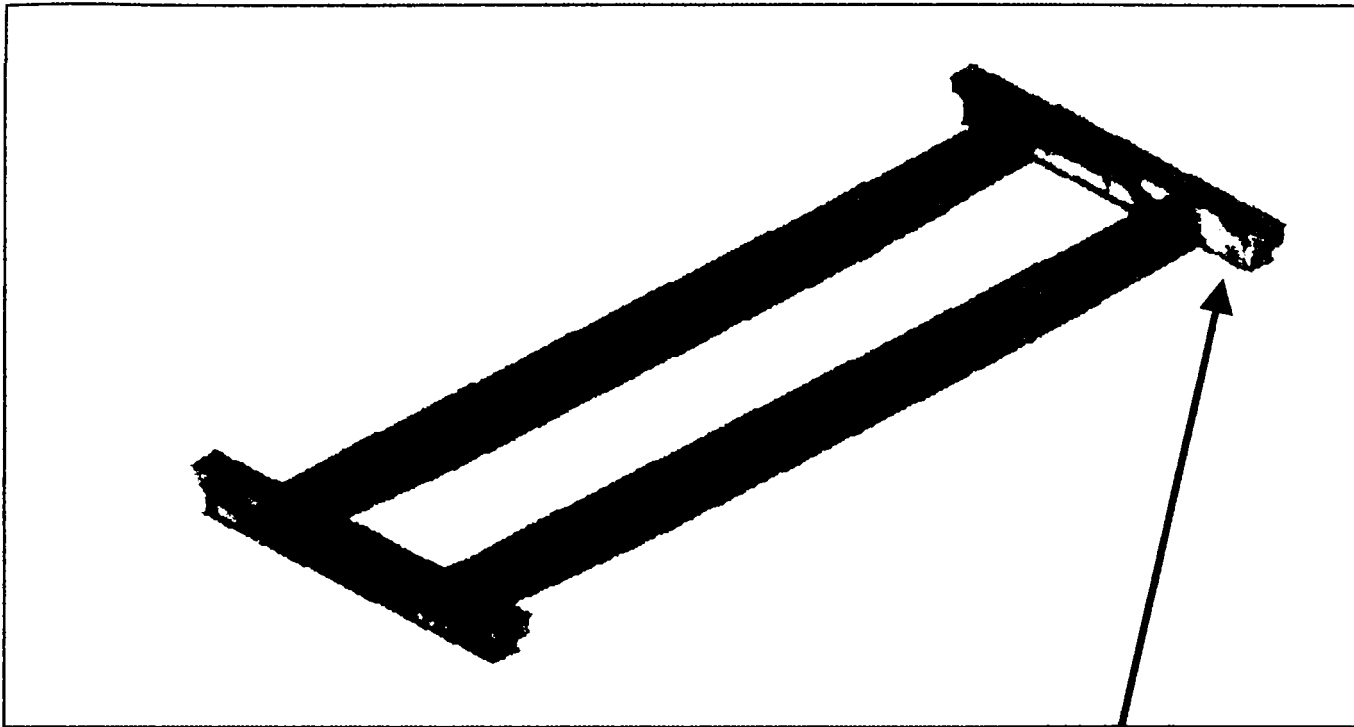


Fig. A.4a.9 Distribuția tensiunii τ_{xy} pentru zonele critice aparținând îmbinării dintre inima laterală și talpa inferioară a traversei I

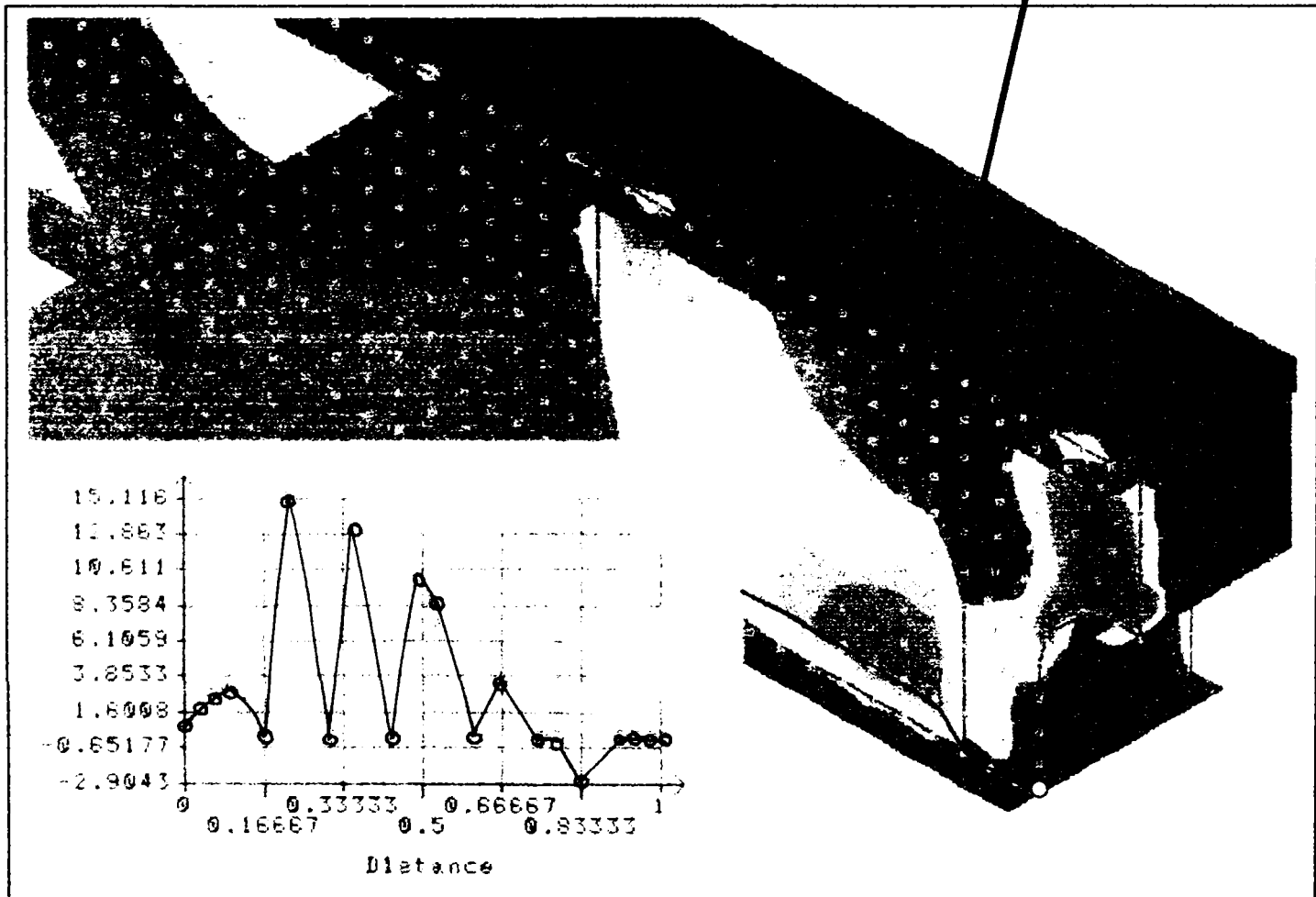


Fig. A.4a.10 Variația tensiunii τ_{xy} pentru 20 de noduri succesive aparținând îmbinării dintre inima laterală și talpa inferioară a traversei I

SPIN SOFTENING FLAG (ISPIN) = 0
 EQ. 0, NO SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED
 INERTIA RELIEF FLAG (IFORMK) = 0
 EQ. 0, NO INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED
 RIGID CONNECTIONS FLAG (IRIGID) = 0
 EQ. 0, HINGE CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS
 EQ. 1, RIGID CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS

T O T A L S Y S T E M D A T A

NUMBER OF EQUATIONS (NEQ) = 134586
 MAXIMUM HALF BANDWIDTH (MK) = 1
 MEAN HALF BANDWIDTH (MM) = 58
 NUMBER OF ELEMENTS. (NUME) = 45896
 NUMBER OF NODAL POINTS. (NUMNP)= 22440
 ORIGINAL NO. OF MATRIX ELEMENTS (NWK) = 1666657

 * R E S P O N S E P R I N T O U T (LOAD CASE 1) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- Thermal flag is off (no thermal effect)

MINIMUM/MAXIMUM DISPLACEMENTS

NODE	9682	7880	15343	8735	24411
8729					
MIN.	-0.38182	-7.6429	-1.1586	-3.57542E-03	-3.55907E-03
	4.23121E-03				
NODE	15991	5961	14804	9302	18025
9308					
MAX.	20.183	0.15098	1.0848	3.55451E-03	5.46459E-03
	3.94923E-03				

MAXIMUM RESULTANT DISPLACEMENT

NODE 15992
 MAX. 20.870

TOTAL STRAIN ENERGY. = 0.841192E+06

R E A C T I O N F O R C E F O R L O A D C A S E N O . 1

NODE	CSYS	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1607	0	-.4382E+05	-.6770E+05	-.1170E+05	-----	-----	-----
1659	0	-----	-.3386E+05	-149.2	-----	-----	-----
1701	0	0.4155E+05	0.9600E+05	-.1302E+05	-----	-----	-----
1753	0	-----	0.5530E+05	-3442.	-----	-----	-----
1799	0	376.9	0.3122E+05	9323.	-----	-----	-----
1800	0	-597.1	0.1220E+05	249.1	-----	-----	-----
1801	0	-908.3	-2585.	321.3	-----	-----	-----
1802	0	-4087.	-.1618E+05	7447.	-----	-----	-----
2723	0	-----	0.2029E+05	0.1467E+05	-----	-----	-----
2724	0	-----	7879.	8104.	-----	-----	-----
2725	0	-----	-1816.	7515.	-----	-----	-----
2726	0	-----	-.1104E+05	9292.	-----	-----	-----
4762	0	-----	-.5456E+05	5190.	-----	-----	-----
4833	0	-----	-.3602E+05	1725.	-----	-----	-----

4856	0	-----	0.8231E+05	7089.	-----	-----	-----
4927	0	-----	0.5749E+05	5144.	-----	-----	-----
4949	0	-----	-.1869E+05	-4723.	-----	-----	-----
4964	0	-----	0.3262E+05	-.1034E+05	-----	-----	-----
4966	0	-----	0.1235E+05	-2337.	-----	-----	-----
4967	0	-----	-3522.	-1796.	-----	-----	-----
5873	0	-----	-.1199E+05	-6544.	-----	-----	-----
5888	0	-----	0.2124E+05	-.1204E+05	-----	-----	-----
5890	0	-----	8190.	-5284.	-----	-----	-----
5891	0	-----	-2136.	-4691.	-----	-----	-----

FOR REQUESTED (Global Cartesian Coord. System)
 NODES FX FY FZ MX MY MZ
 Total React. -.7482E+04 0.1770E+06 -.5656E-06 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

S O L U T I O N T I M E L O G I N S E C
 FOR PROBLEM
 TIME FOR INPUT PHASE = 52
 TIME FOR CALCULATION OF STRUCTURE STIFFNESS MATRIX= 14
 TRIANGULARIZATION OF STIFFNESS MATRIX = 1495
 TIME FOR LOAD CASE SOLUTIONS = 52
 TIME FOR REACTION/GRID FORCE BALANCE = -1633
 T O T A L S O L U T I O N T I M E = 12

S T R E S S E V A L U A T I O N F O R S T A T I C A N A L Y S I S

 * S T R E S S P R I N T O U T (LOAD CASE 1) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- Thermal flag is off (no thermal effect)

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

F O R T O P F A C E:

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE 3080	1702	17553	1732	2517	2496	
MIN.	-133.1	-182.2	-111.0	-46.99	-76.85	-30.07
NODE 3123	1607	15104	4911	15104	1809	
MAX.	132.2	125.2	155.3	31.16	57.62	30.73

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 26996
 MAX. 169.0

F O R B O T T O M F A C E:

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE 3080	4857	15968	1732	2517	17592	
MIN.	-136.1	-184.0	-103.7	-52.12	-76.93	-44.45
NODE 6294	4762	6294	1783	5672	18020	
MAX.	119.2	108.3	138.2	32.08	49.42	35.19

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 26996
 MAX. 152.5

E R R O R E S T I M A T I O N

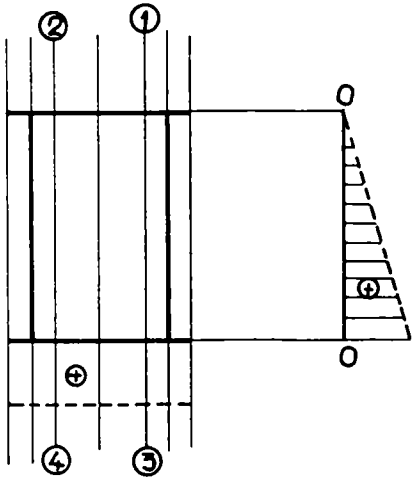
(for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .841192E+06
 Total Error Energy (TEE) = .679190E+05
 Ave. Percentage Error (APE) = .196988E+02
 (APE = sqrt (TEE/(TSE*2. + TEE)) * 100.)

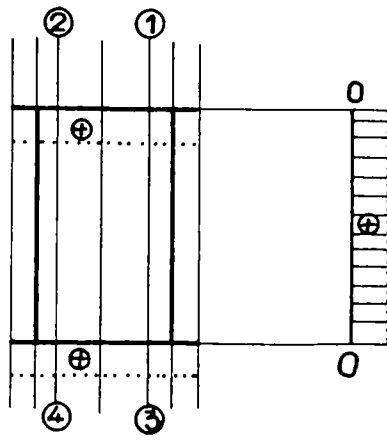
S O L U T I O N T I M E L O G I N S E C F O R S T R E S S C A L C U L A T I O N S

READING GENERAL INFORMATION AND ELEMENT DATA. . . = 27
 STRESS CALCULATION AND PRINTOUT = 59
 UPDATING DATABASE = 0
 T O T A L S O L U T I O N T I M E = 86

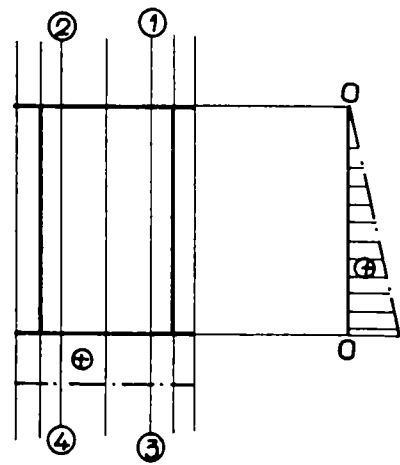
Rezultate experimentale obținute prin înregistrări electrotensoimetrice
 Variația tensiunilor în secțiunea SIII pe baza înregistrărilor experimentale



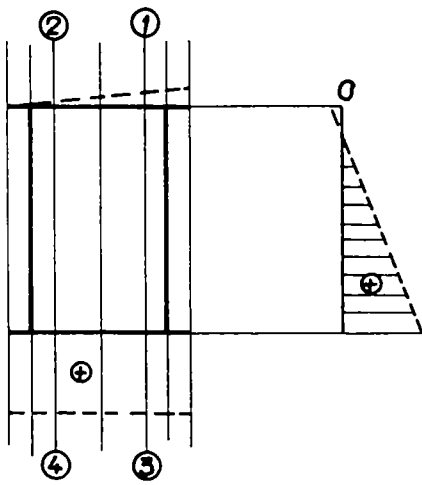
Q_1 în P2



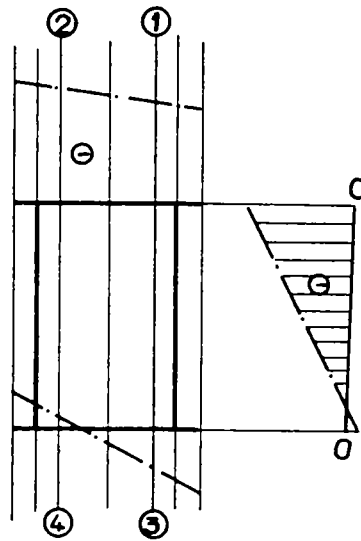
Q_1 în P3



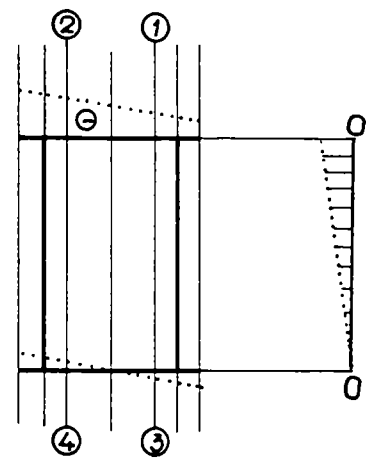
Q_1 în P4



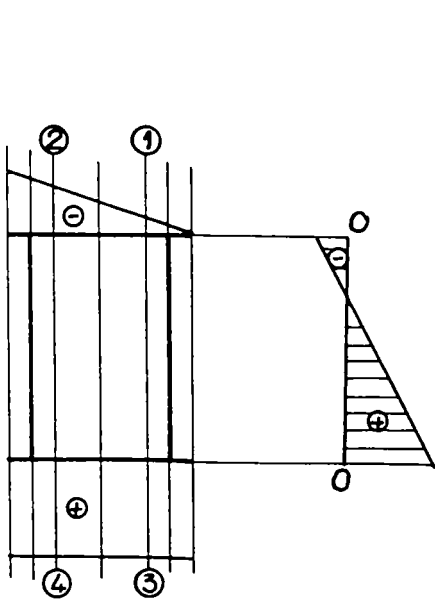
Q_2 în P2



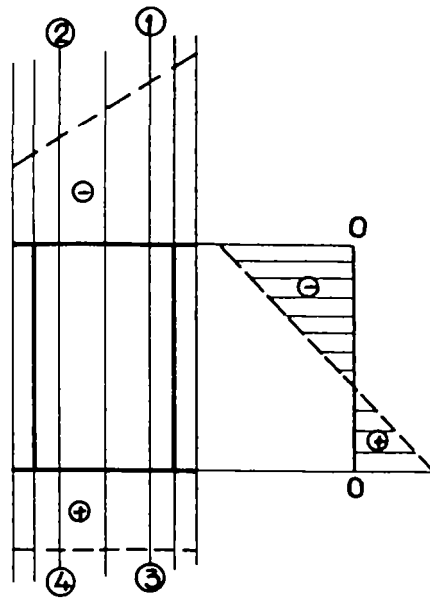
Q_2 în P3



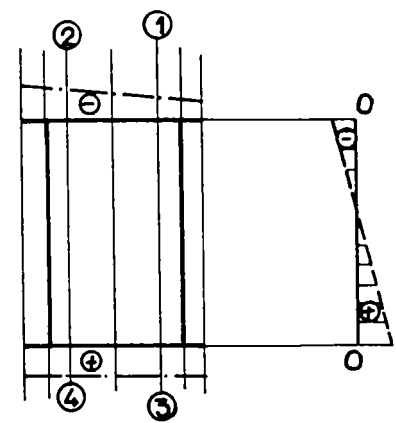
Q_2 în P4



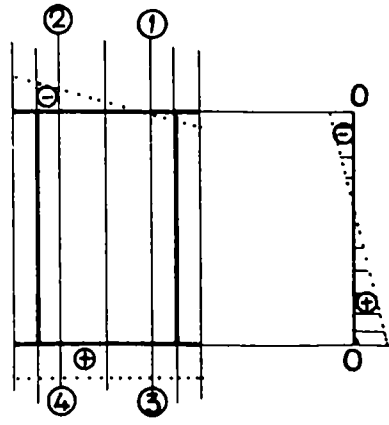
Q_3 în P1



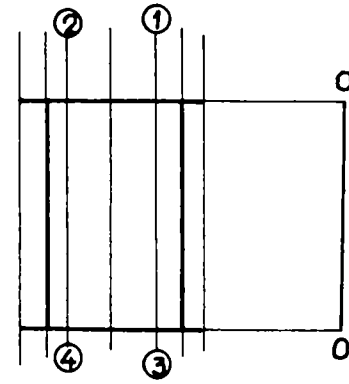
Q_3 în P2



Q_3 în P3

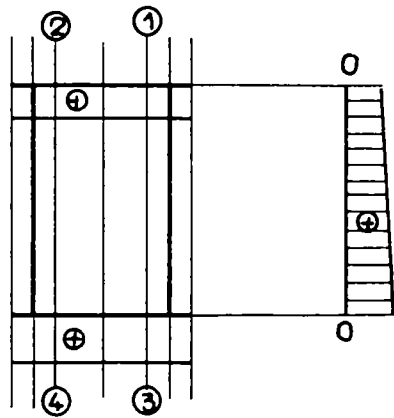


Q_3 în P4

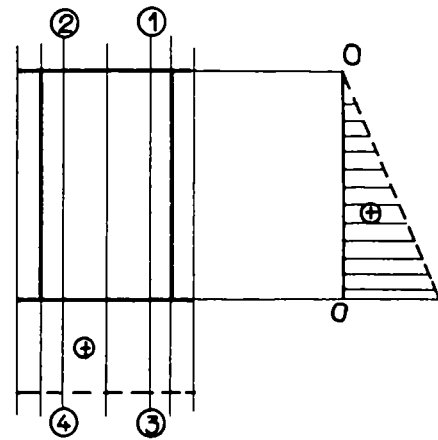


Q_3 în P5

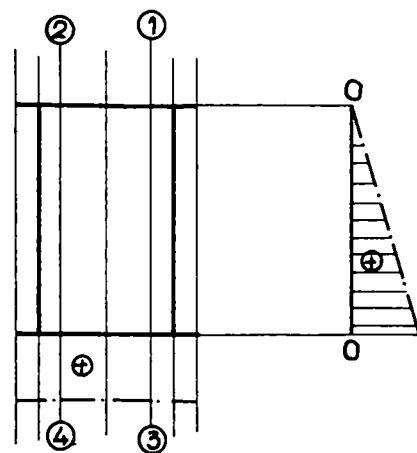
Variația tensiunilor în secțiunea SII pe baza înregistrărilor experimentale



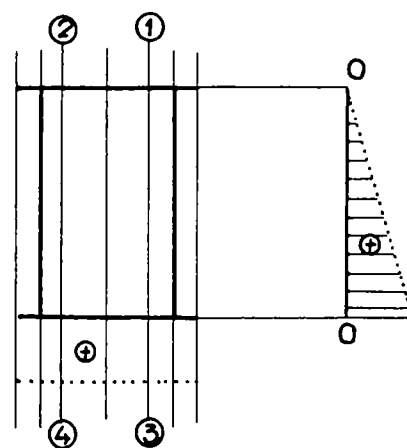
Q_0 în P1



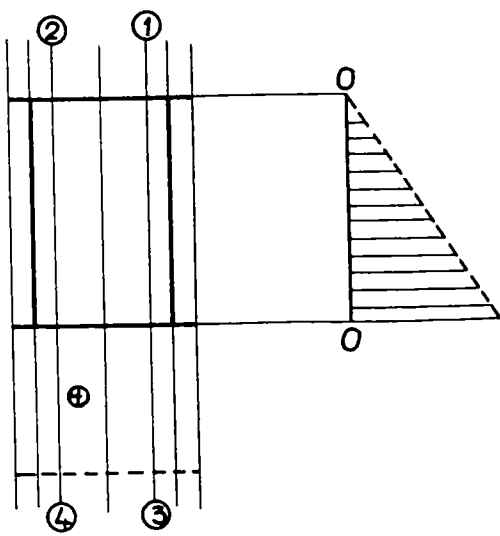
Q_0 în P2



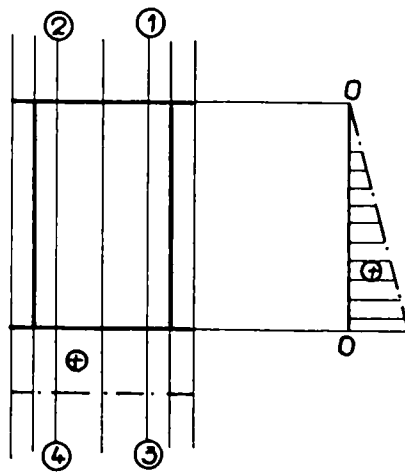
Q_0 în P3



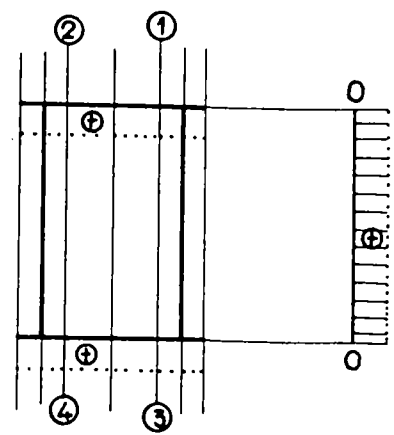
Q_0 în P4



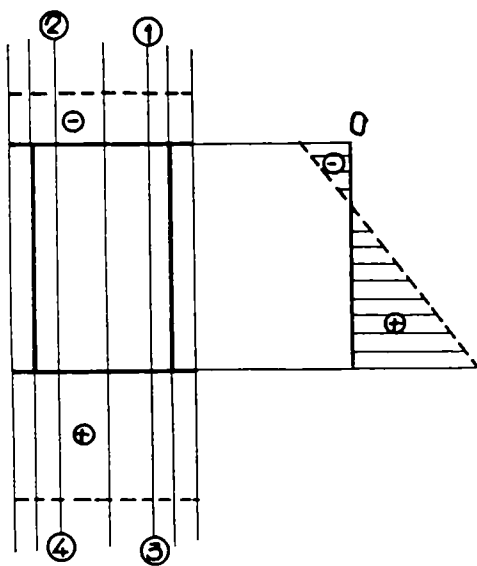
Q_1 în P2



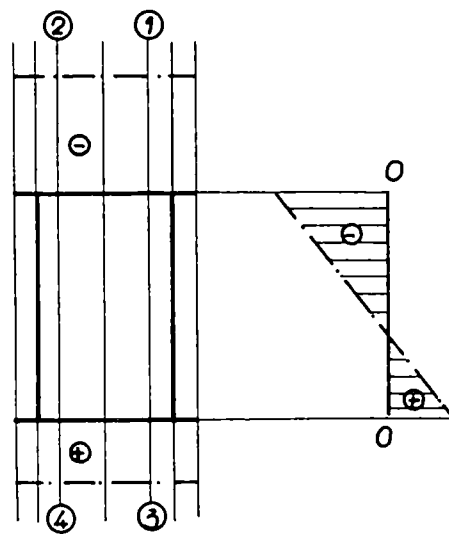
Q_1 în P3



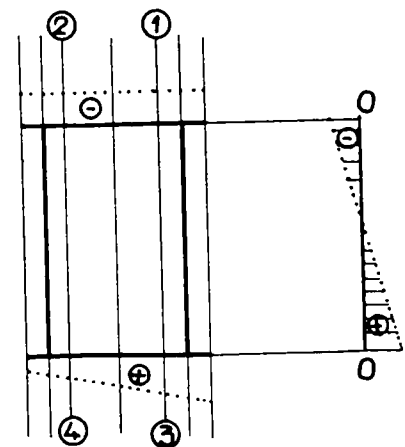
Q_1 în P4



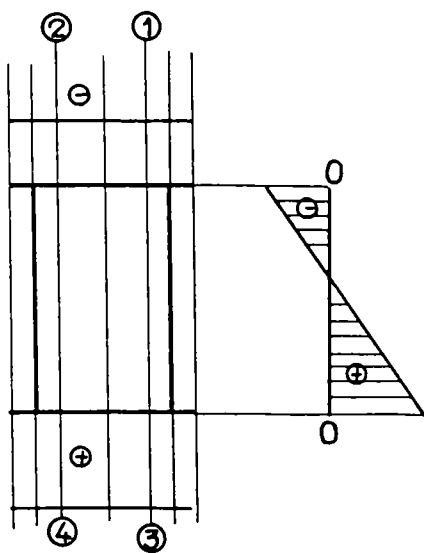
Q_2 în P2



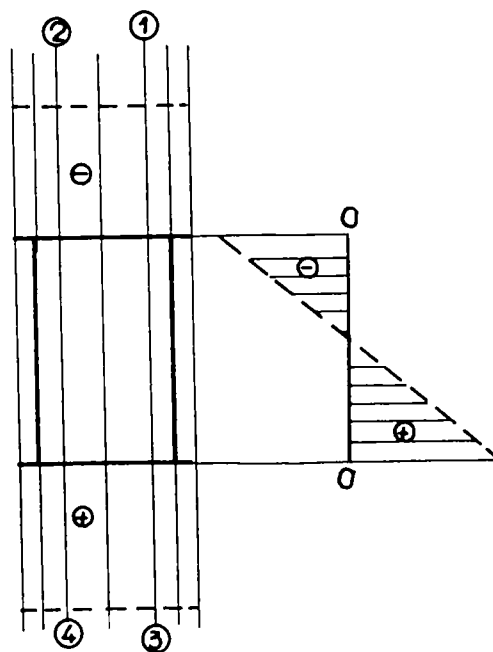
Q_2 în P3



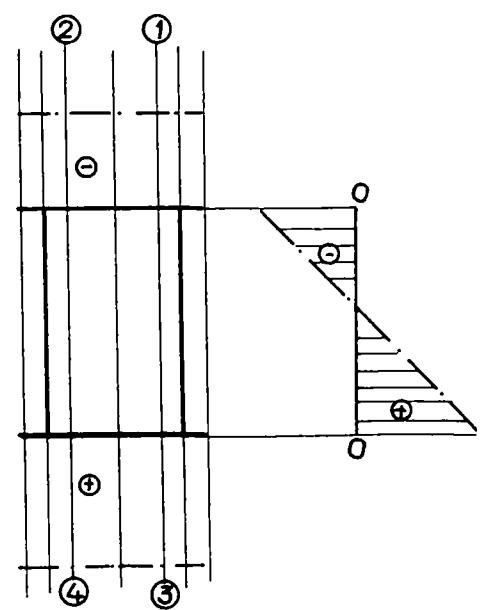
Q_2 în P4



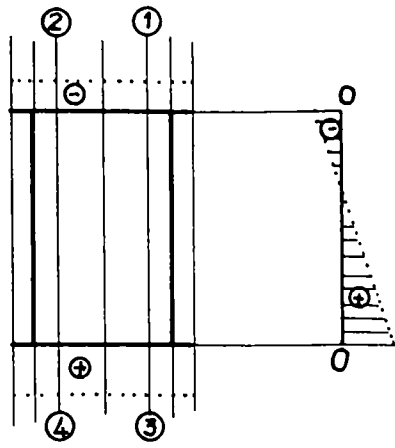
Q_3 în P1



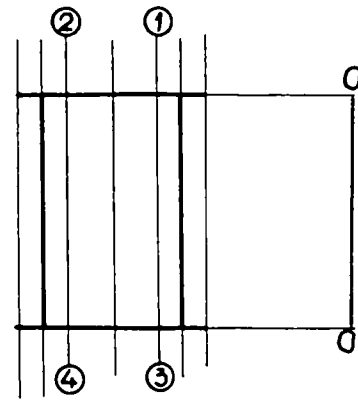
Q_3 în P2



Q_3 în P3

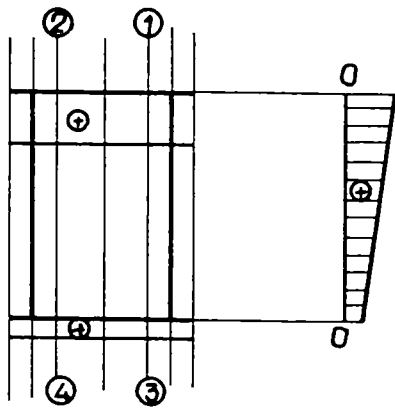


Q_3 în P4

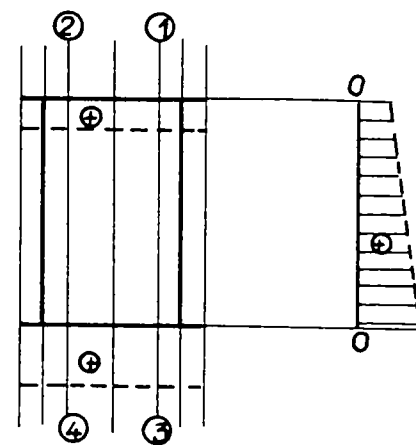


Q_3 în P5

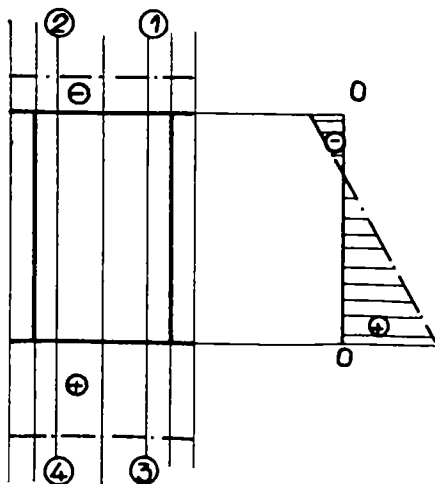
Variația tensiunilor în secțiunea SI pe baza înregistrărilor experimentale



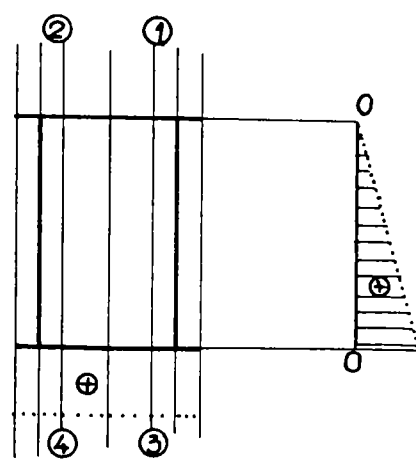
Q_0 în P1



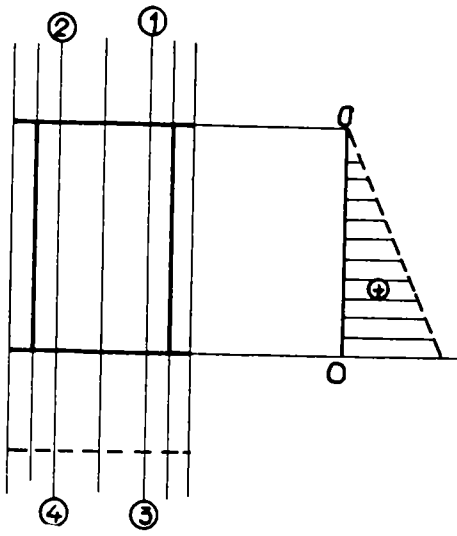
Q_0 în P2



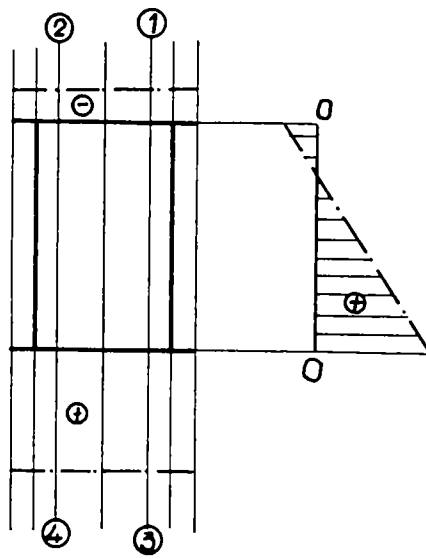
Q_0 în P3



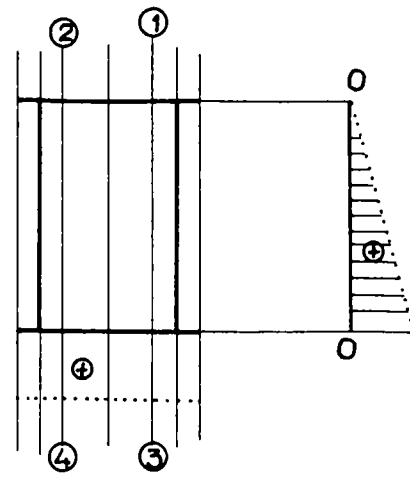
Q_2 în P1



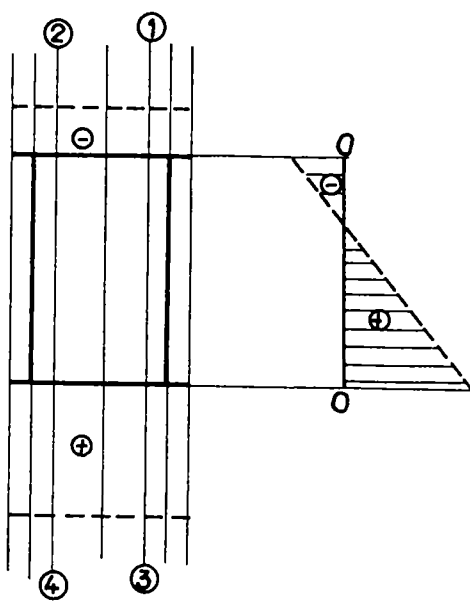
Q_1 în P2



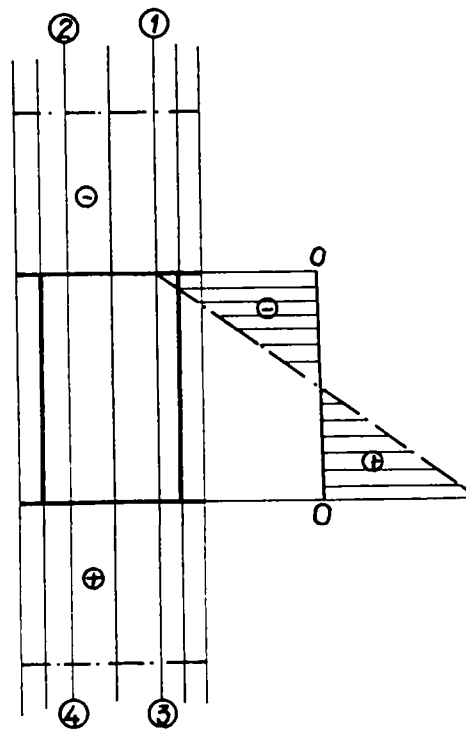
Q_1 în P3



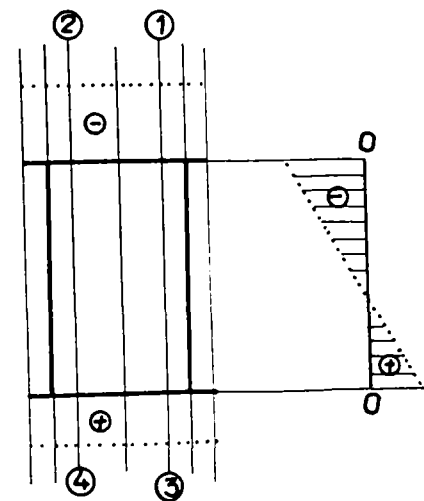
Q_1 în P4



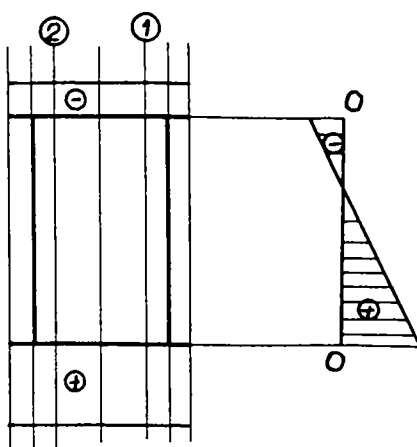
Q_2 în P2



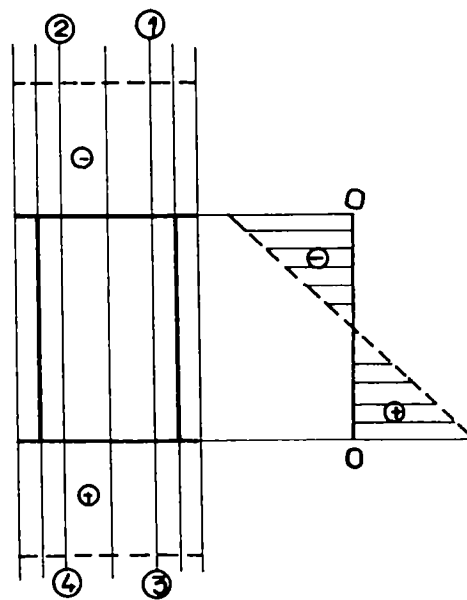
Q_2 în P3



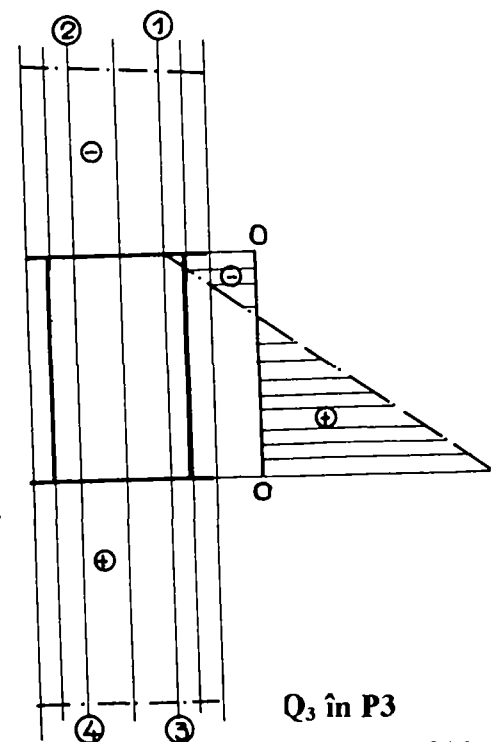
Q_2 în P4



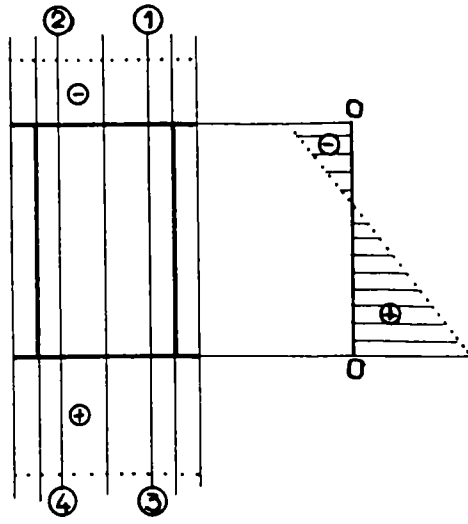
Q_3 în P1



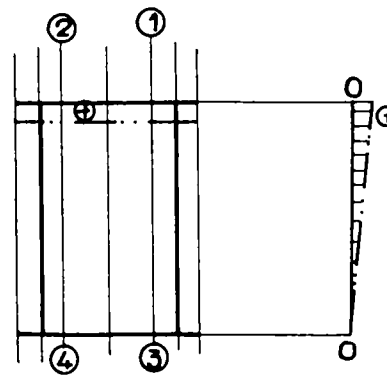
Q_3 în P2



Q_3 în P3

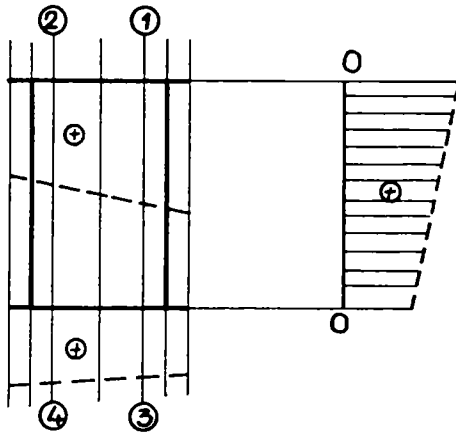


Q_3 în P4

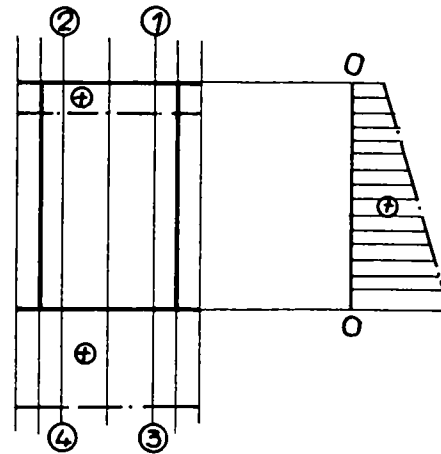


Q_3 în P5

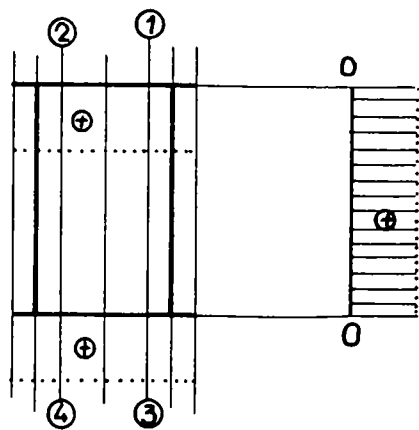
Variația tensiunilor în secțiunea S1 pe baza înregistrărilor experimentale



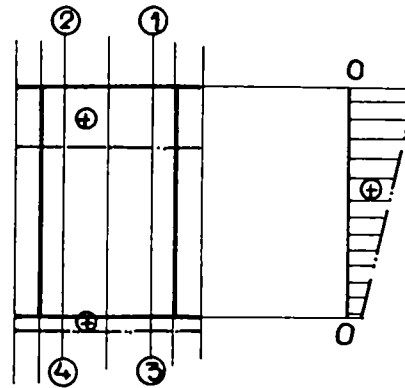
Q_0 în P2



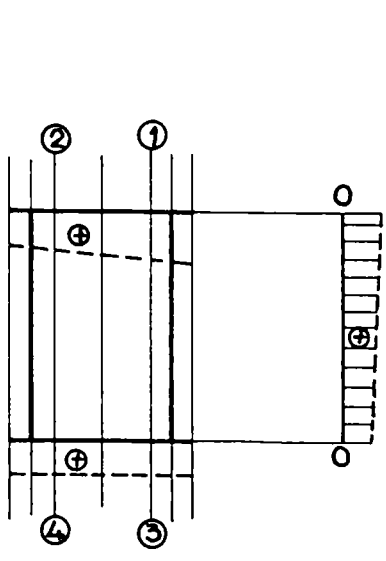
Q_0 în P3



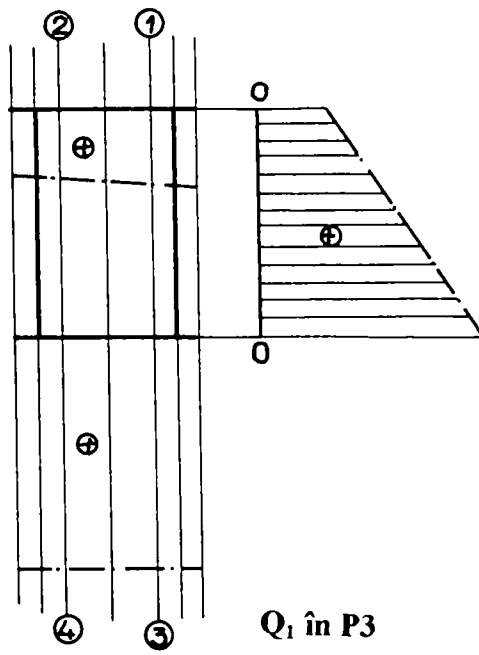
Q_0 în P4



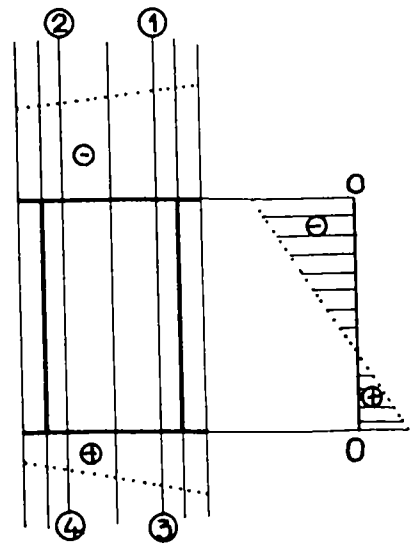
Q_0 în P5



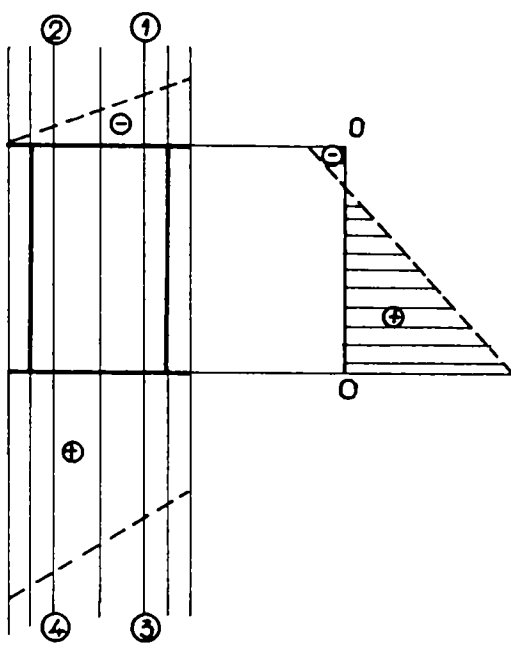
Q_1 în P2



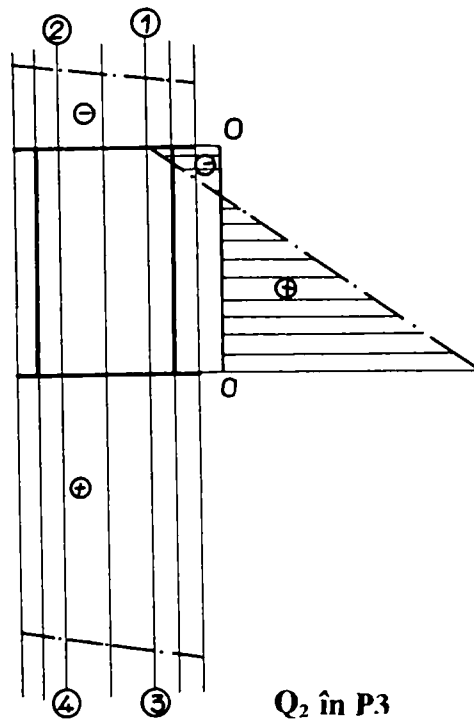
Q_1 în P3



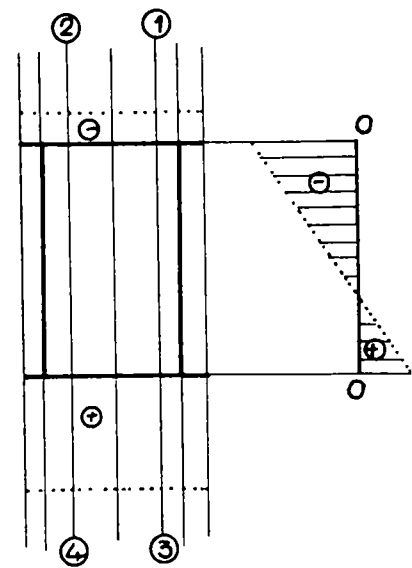
Q_1 în P4



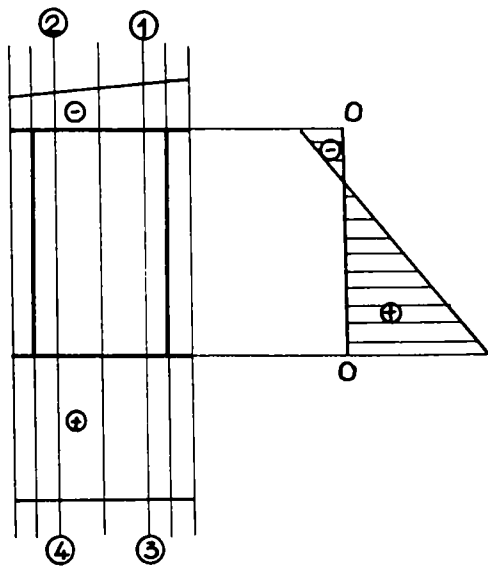
Q_2 în P2



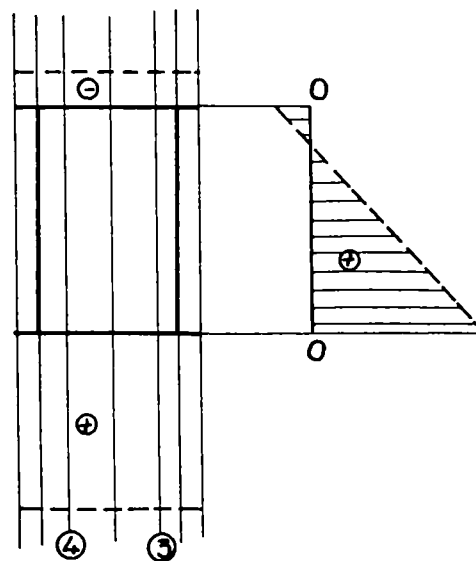
Q_2 în P3



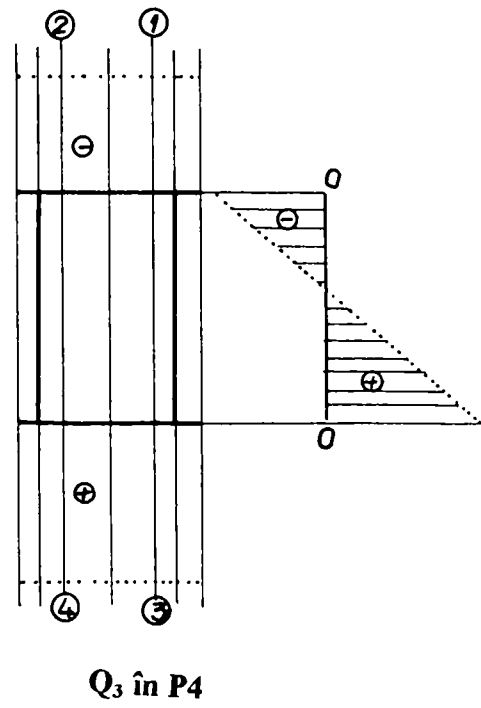
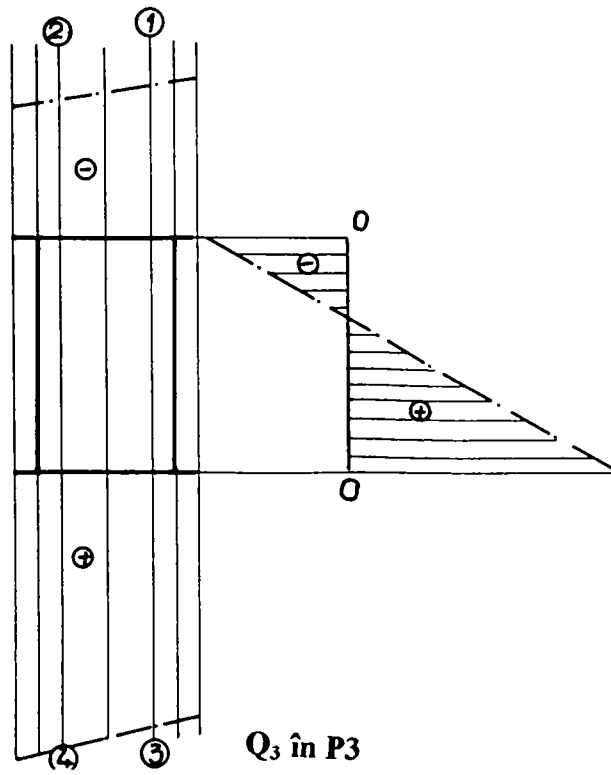
Q_2 în P4



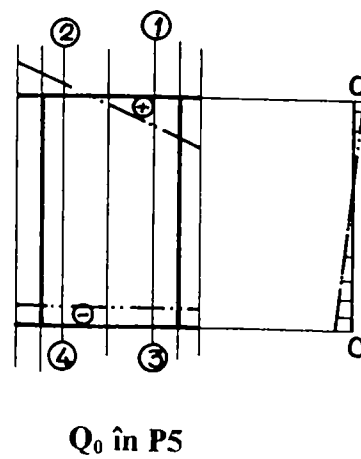
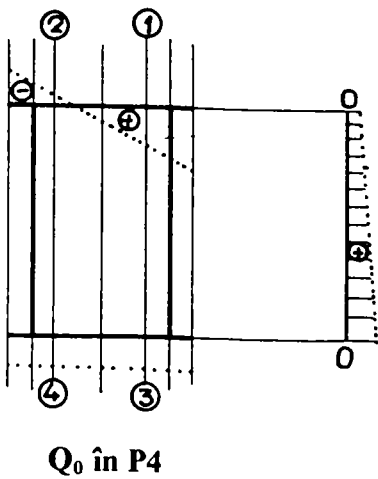
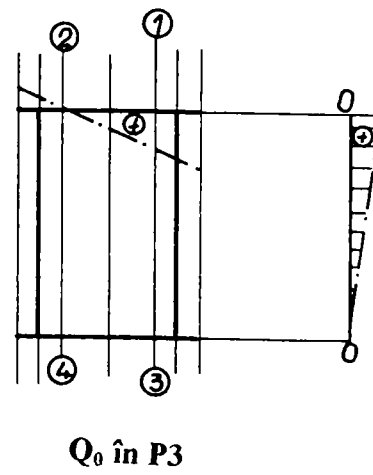
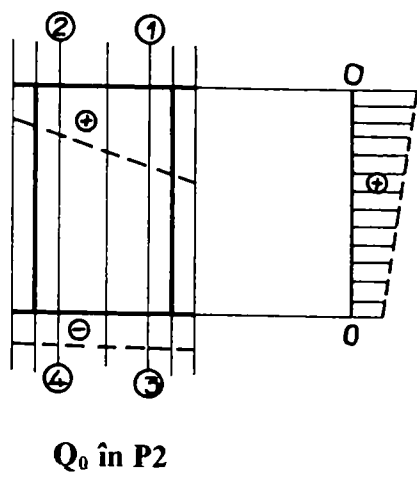
Q_3 în P1

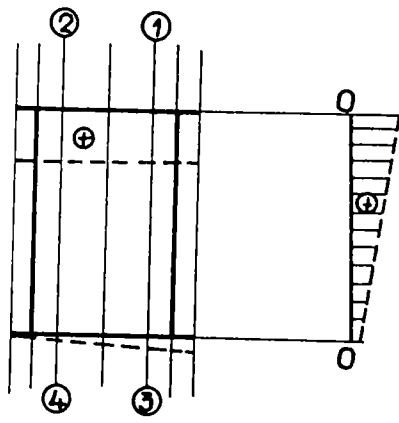


Q_3 în P2

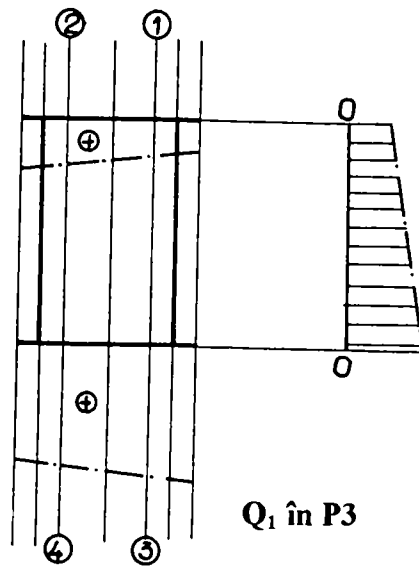


Variația tensiunilor în secțiunea S2 pe baza înregistrărilor experimentale

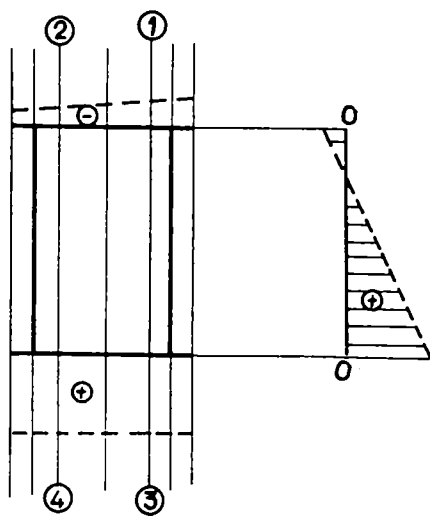
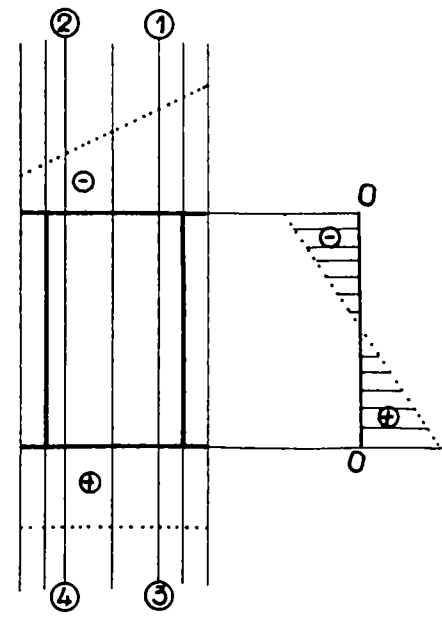




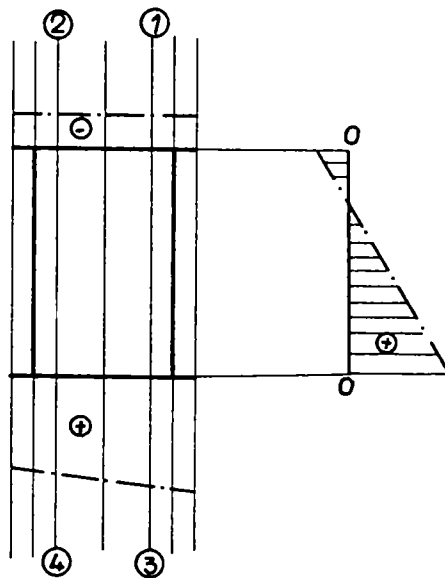
Q_1 în P2



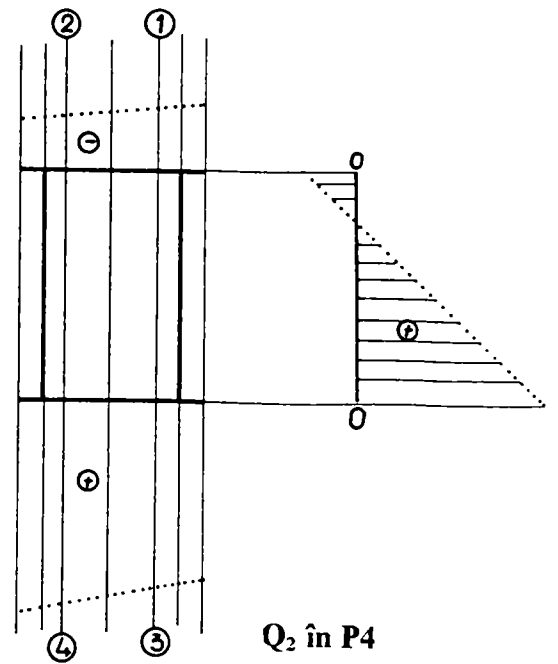
Q_1 în P3



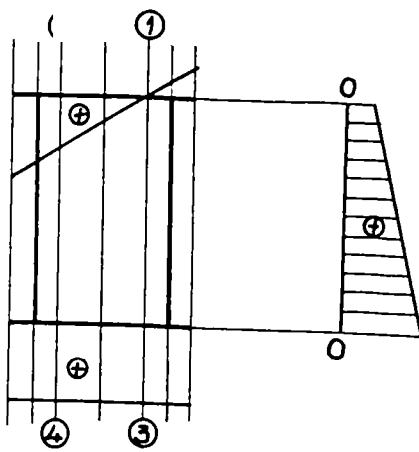
Q_2 în P2



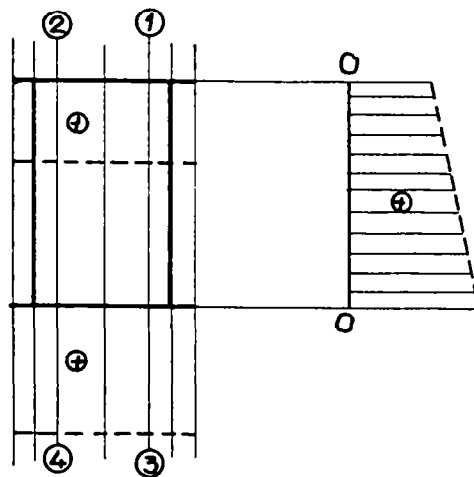
Q_2 în P3



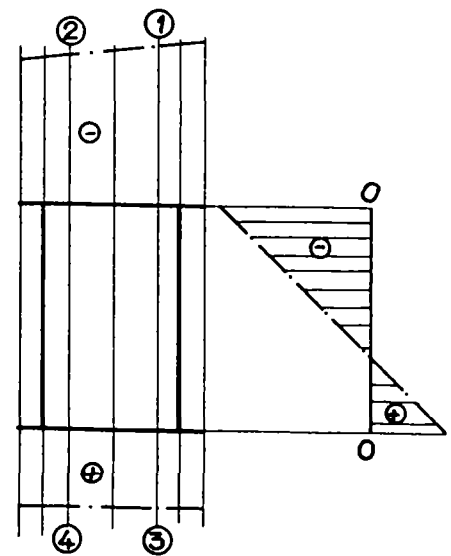
Q_2 în P4



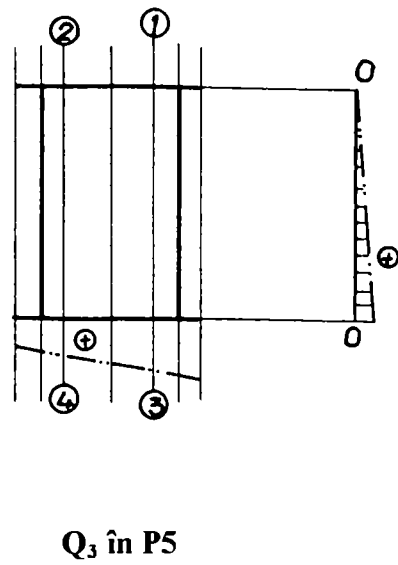
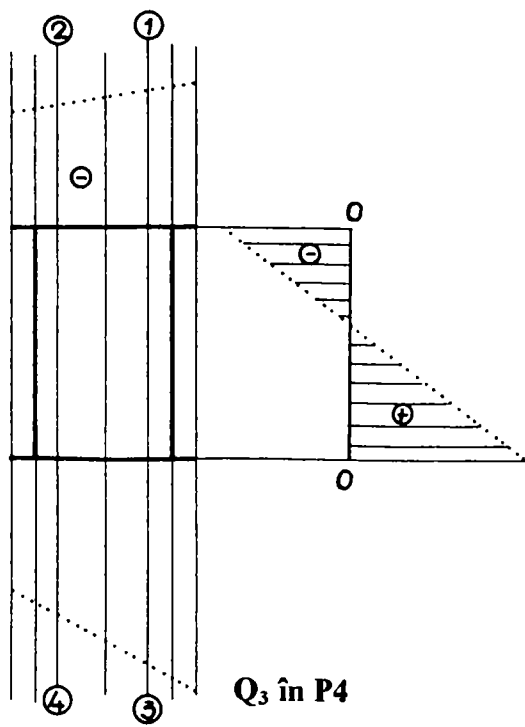
Q_3 în P1



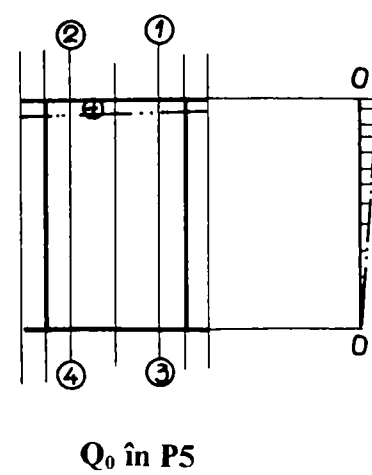
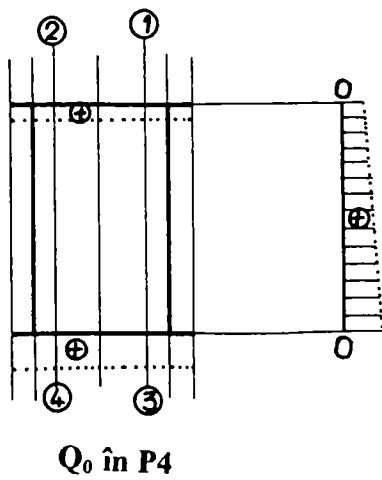
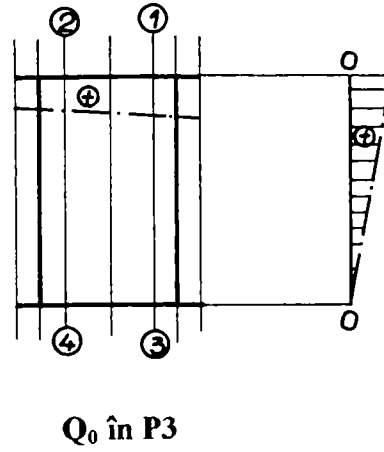
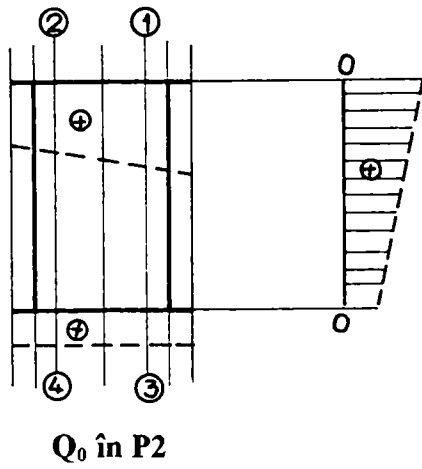
Q_3 în P2

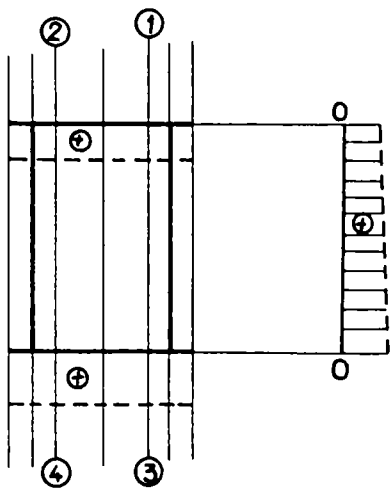


Q_3 în P3

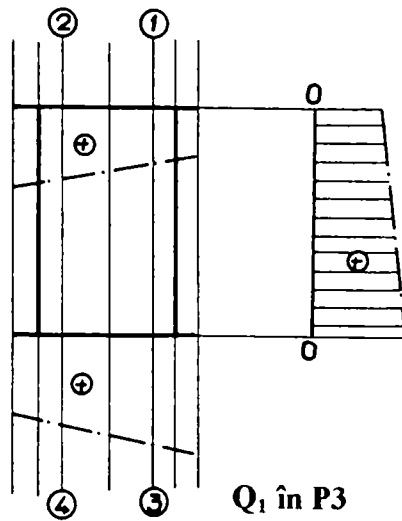


Variația tensiunilor în secțiunea S3 pe baza înregistrărilor experimentale

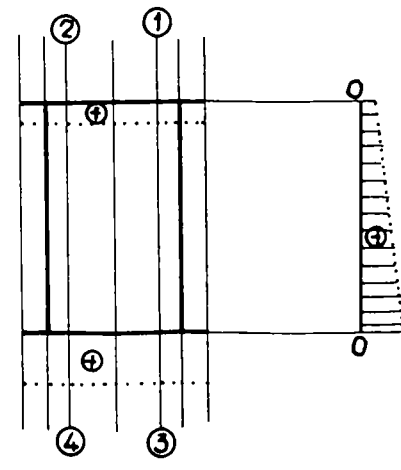




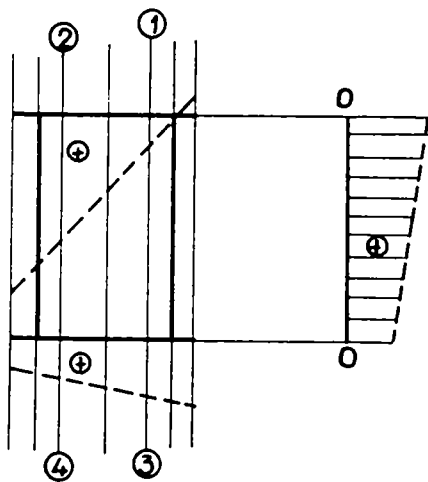
Q_1 în P2



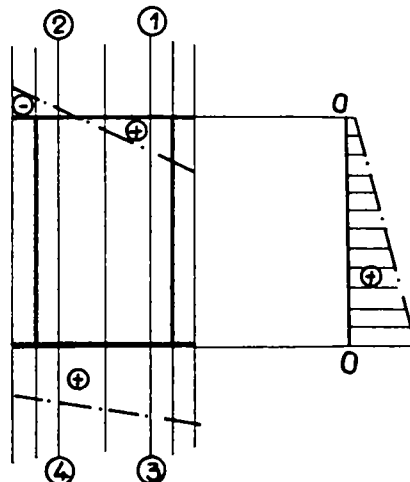
Q_1 în P3



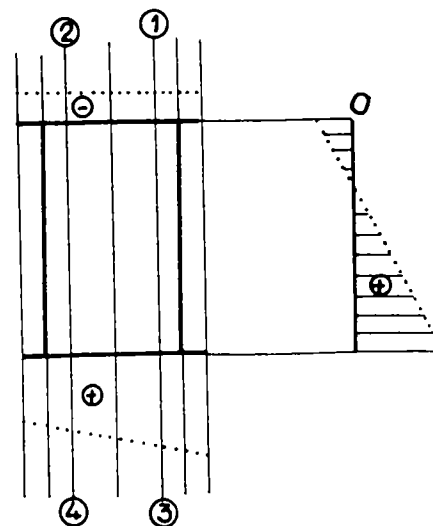
Q_1 în P4



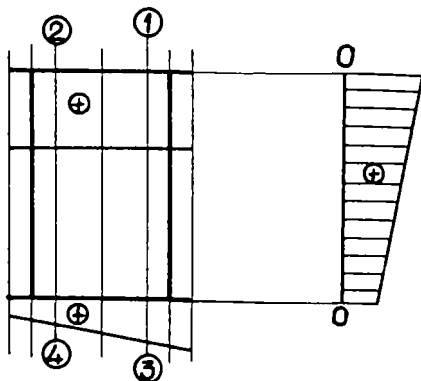
Q_2 în P2



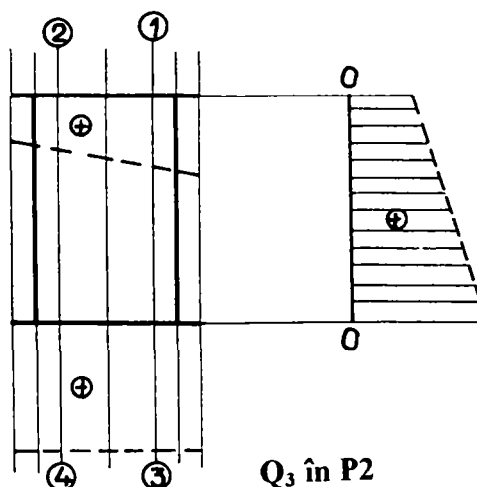
Q_2 în P3



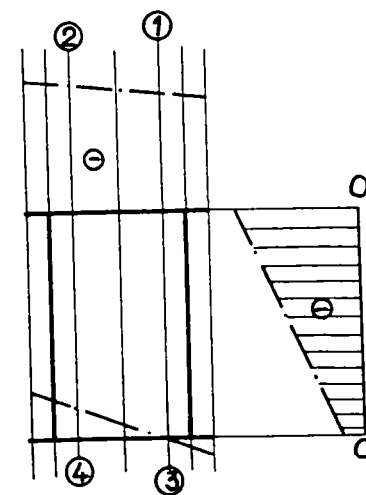
Q_2 în P4



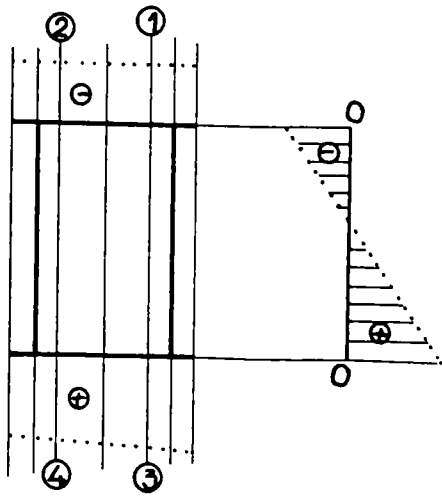
Q_3 în P1



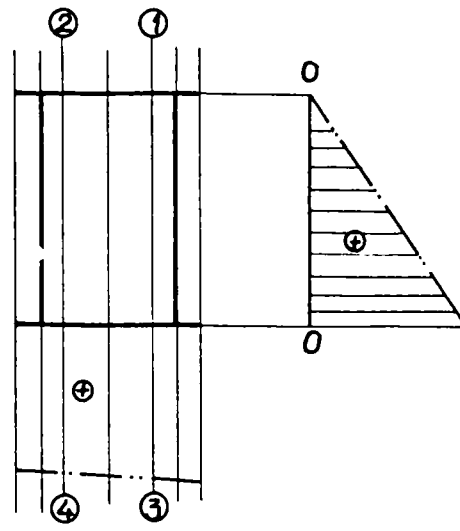
Q_3 în P2



Q_3 în P3



Q_3 în P4



Q_3 în P5

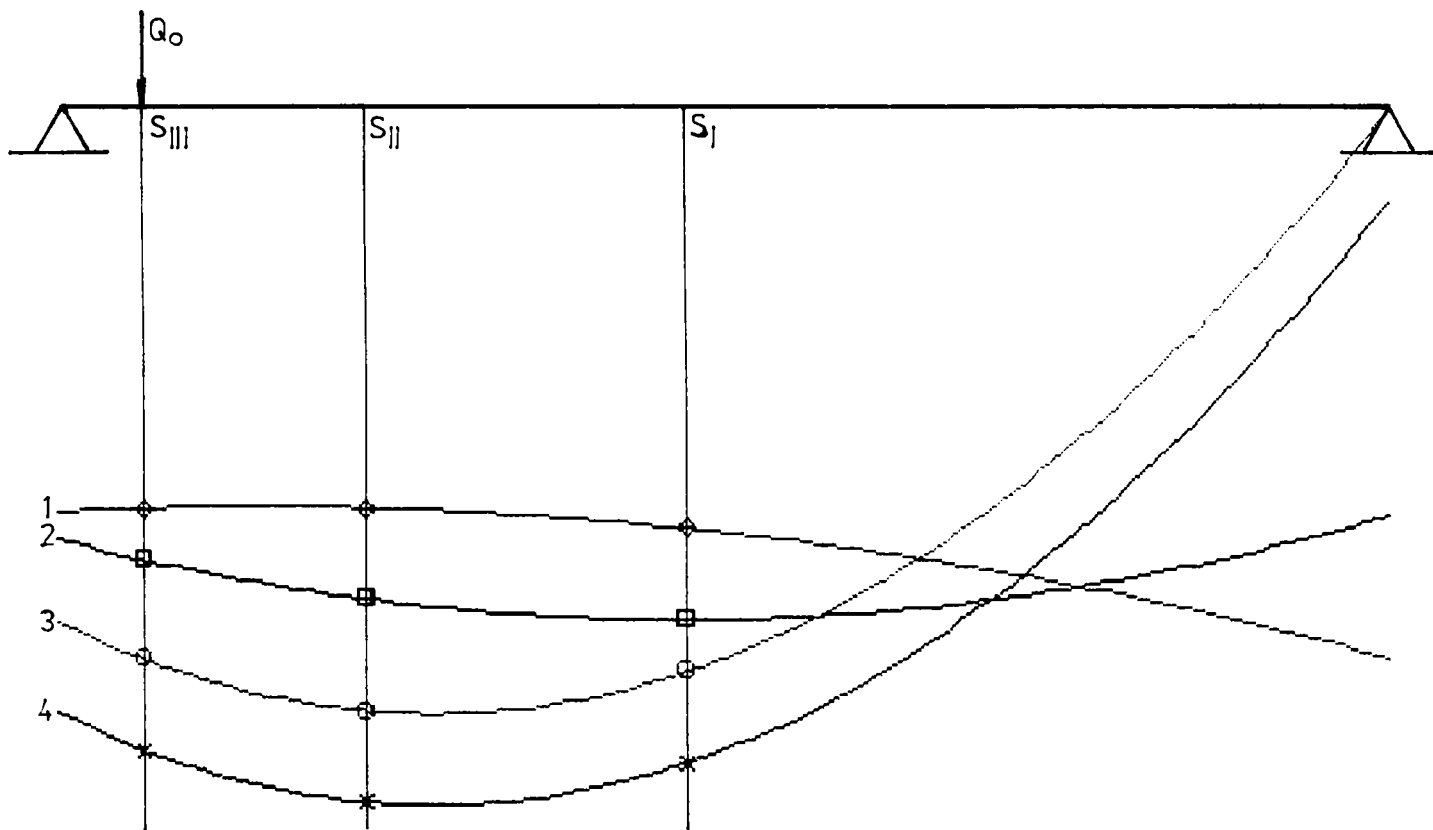


Fig.A.6.1. Sarcina de încărcare Q_0 în poziția P_1

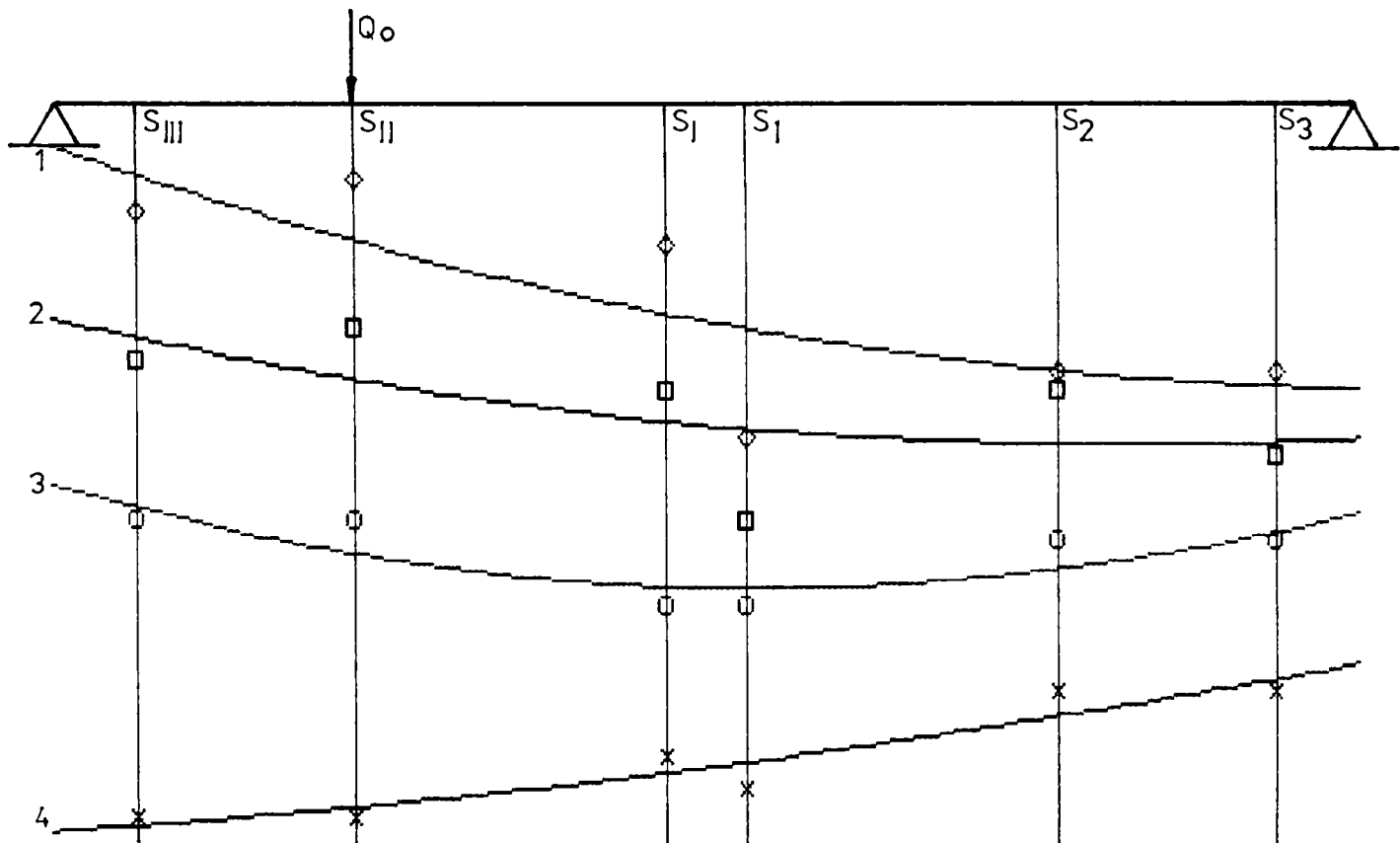


Fig.A.6.2. Sarcina de încărcare Q_0 în poziția P_2

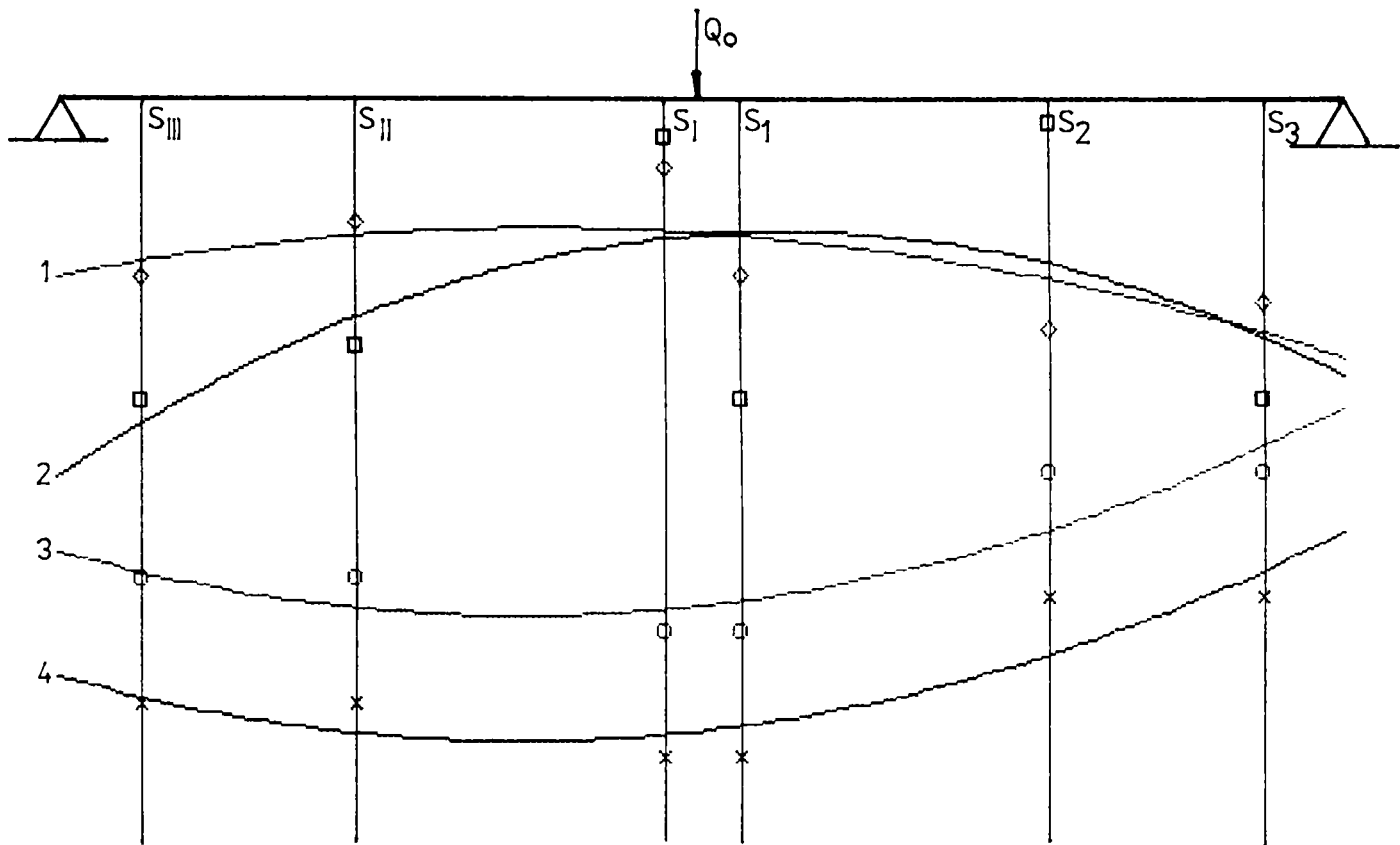


Fig.A.6.3. Sarcina de încărcare Q_0 în poziția P_3

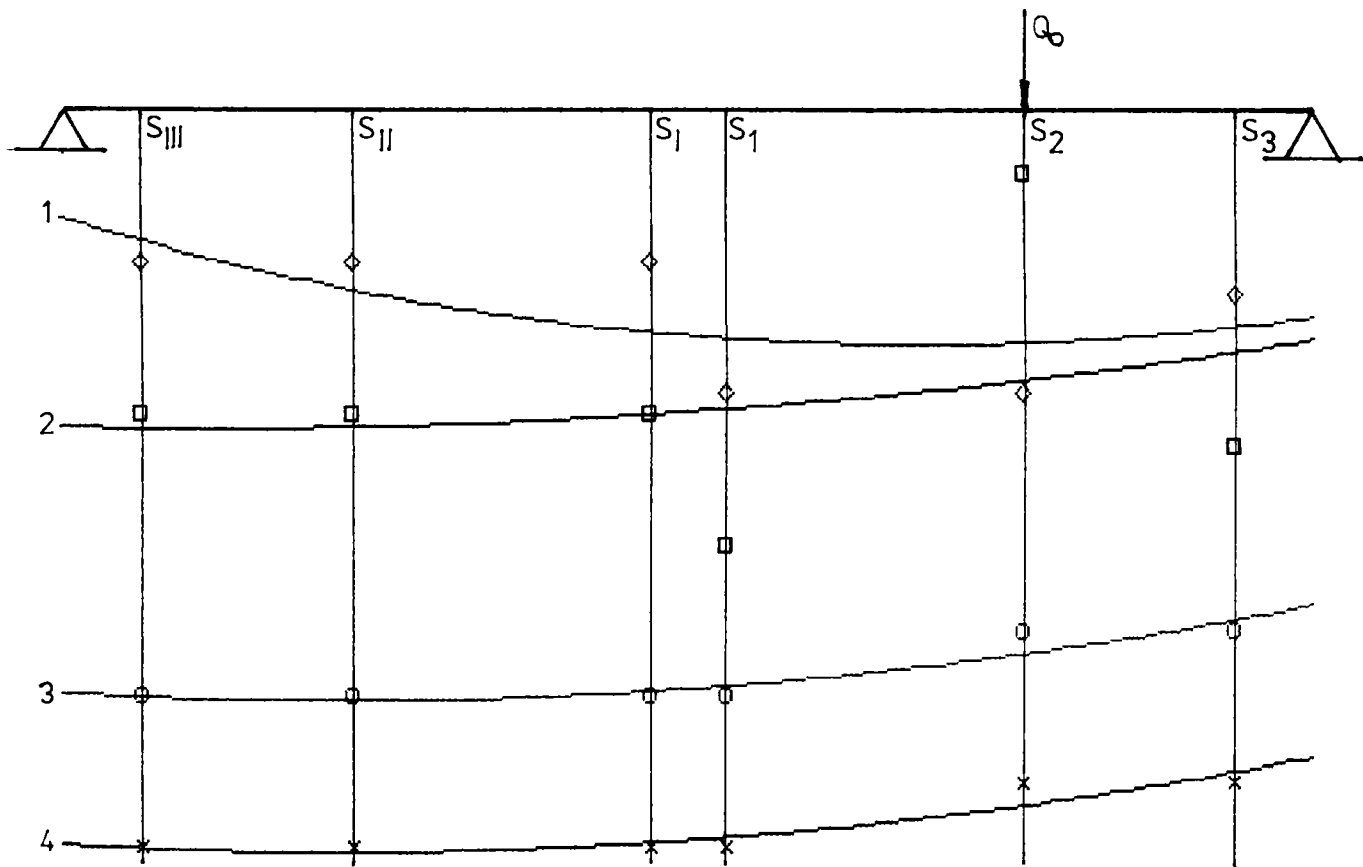


Fig.A.6.4. Sarcina de încărcare Q_0 în poziția P_4

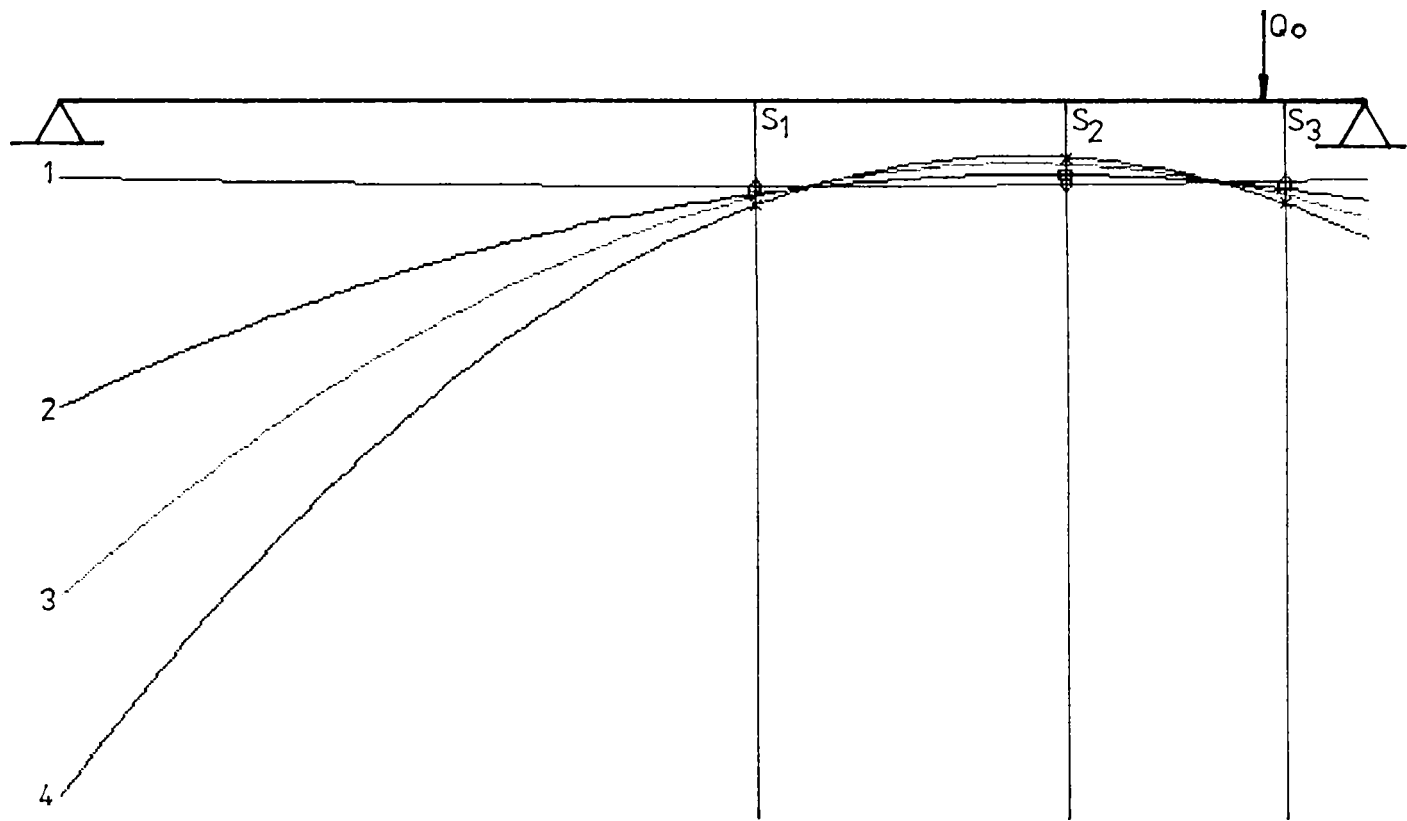


Fig.A.6.5. Sarcina de încărcare Q_0 în poziția P_5

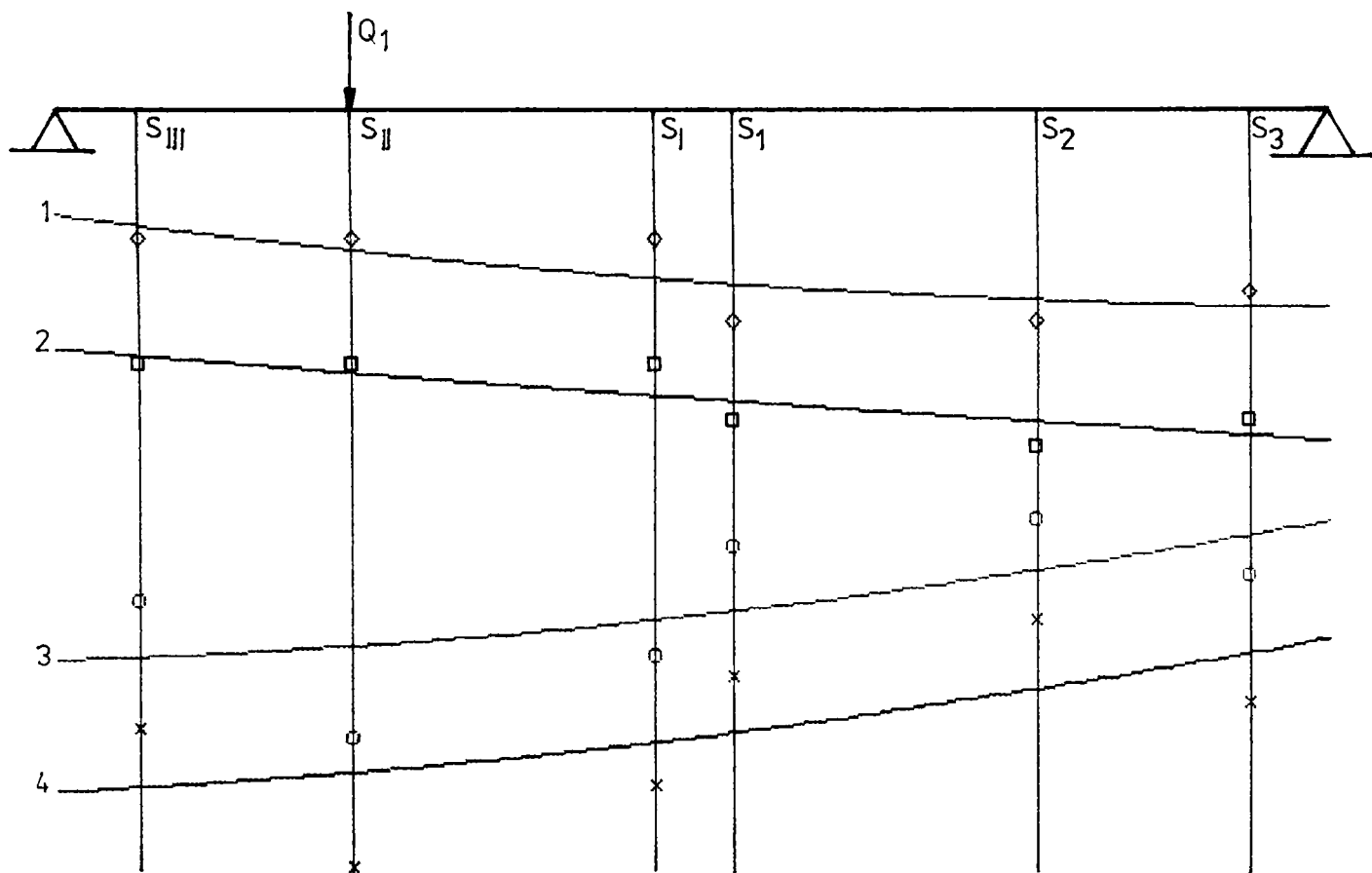


Fig.A.6.6. Sarcina de încărcare Q_1 în poziția P_2

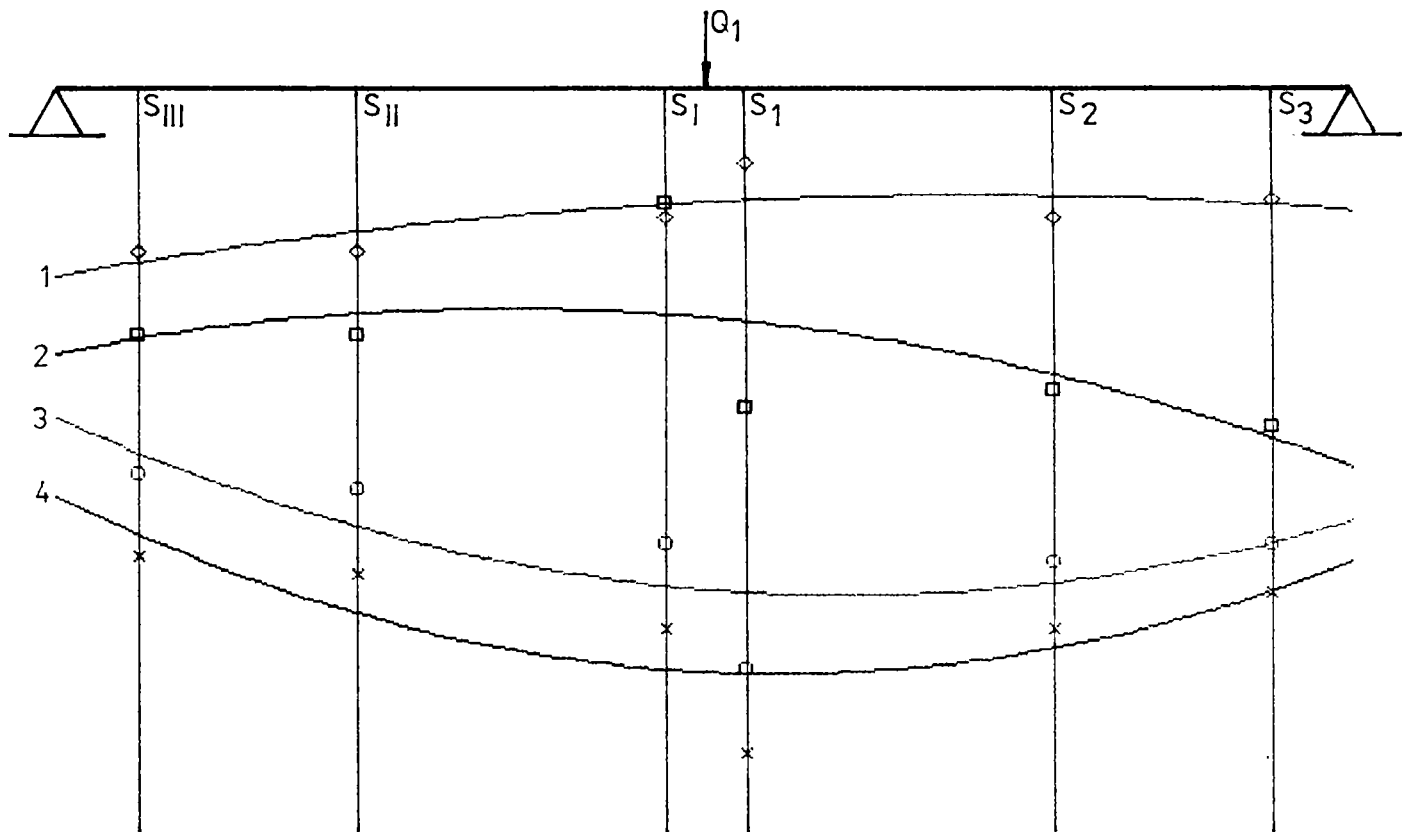


Fig.A.6.7. Sarcina de încărcare Q_1 în poziția P_3

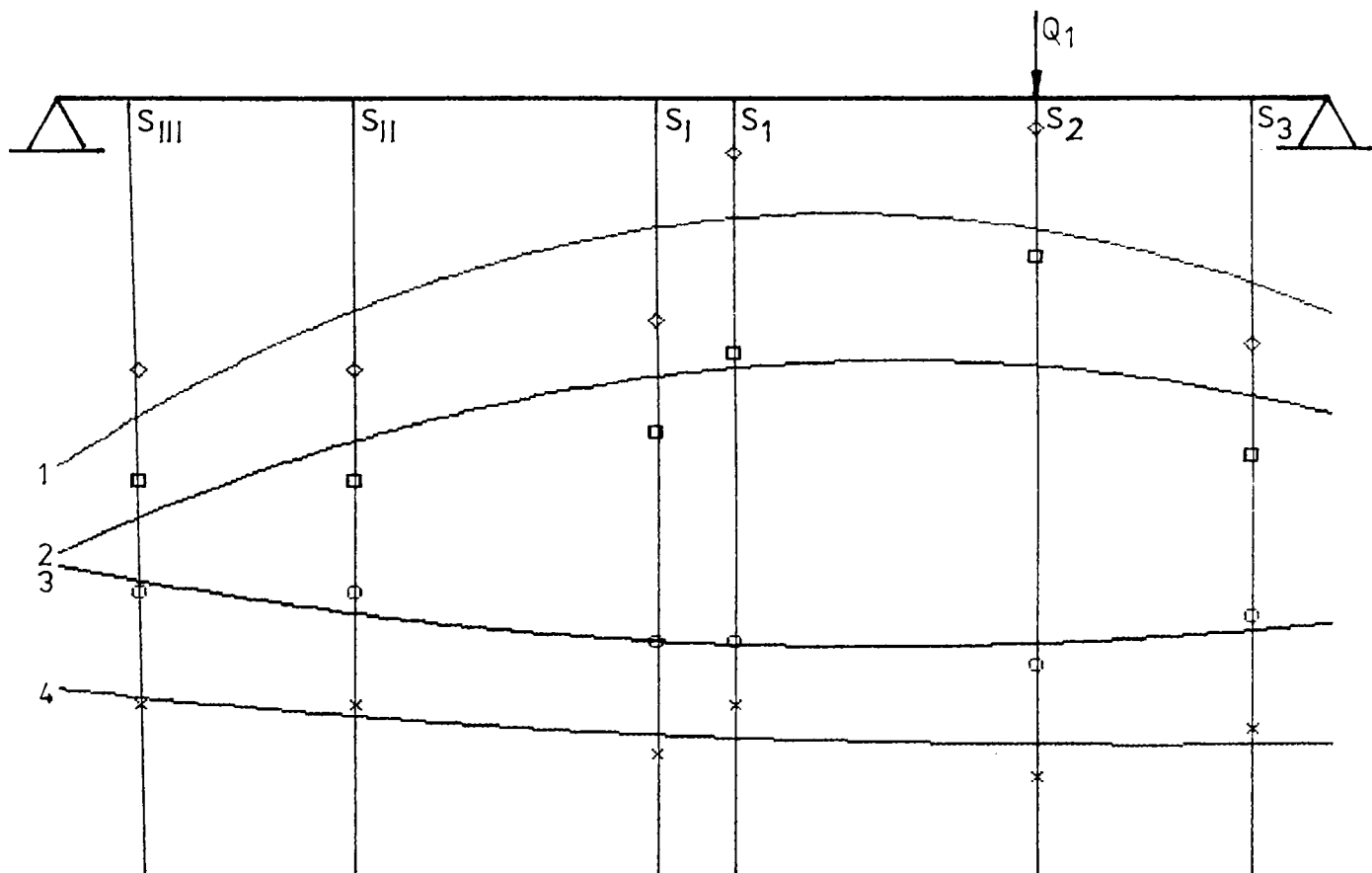


Fig.A.6.8. Sarcina de încărcare Q_1 în poziția P_4

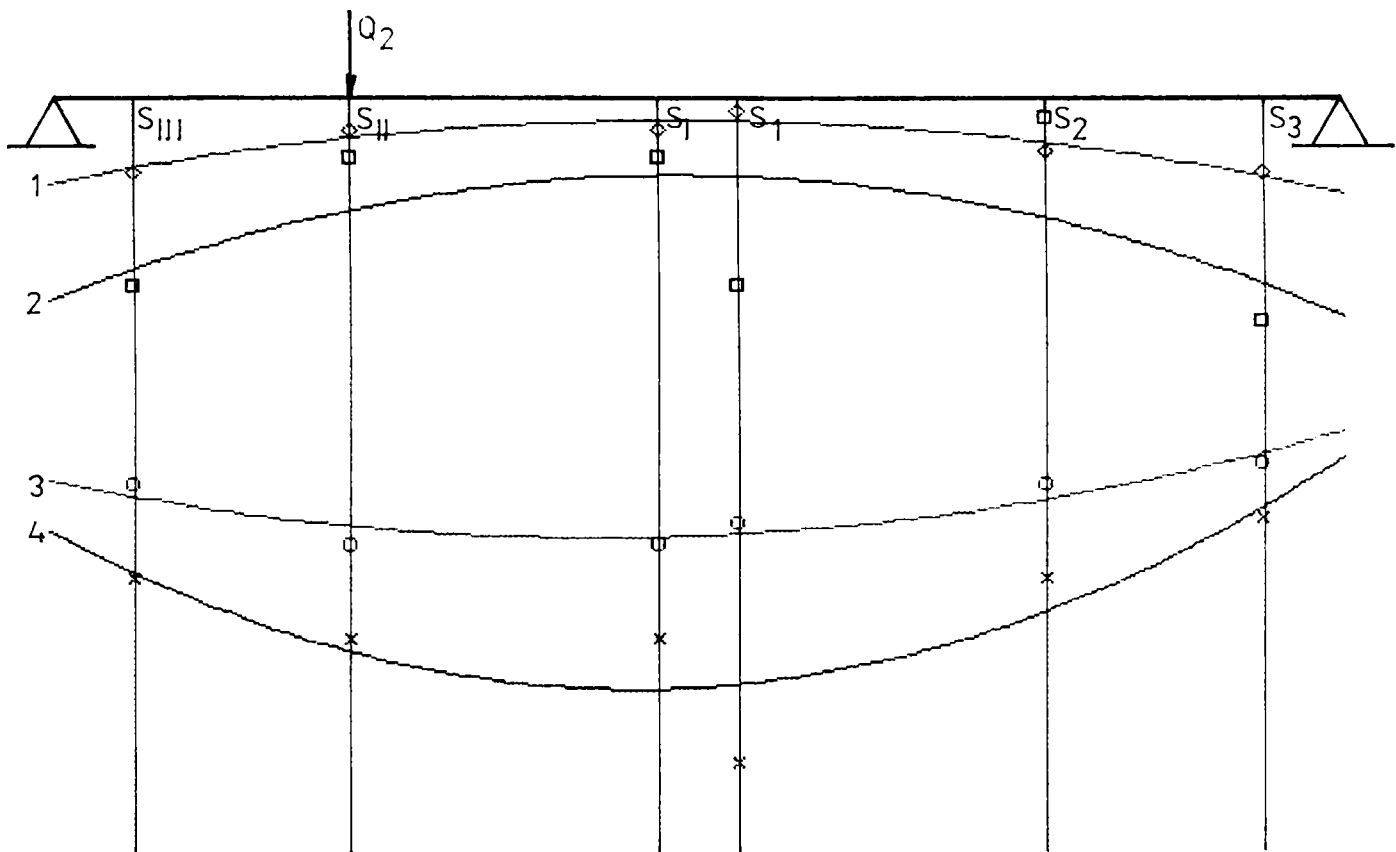


Fig.A.6.9. Sarcina de încărcare Q_2 în poziția P_2

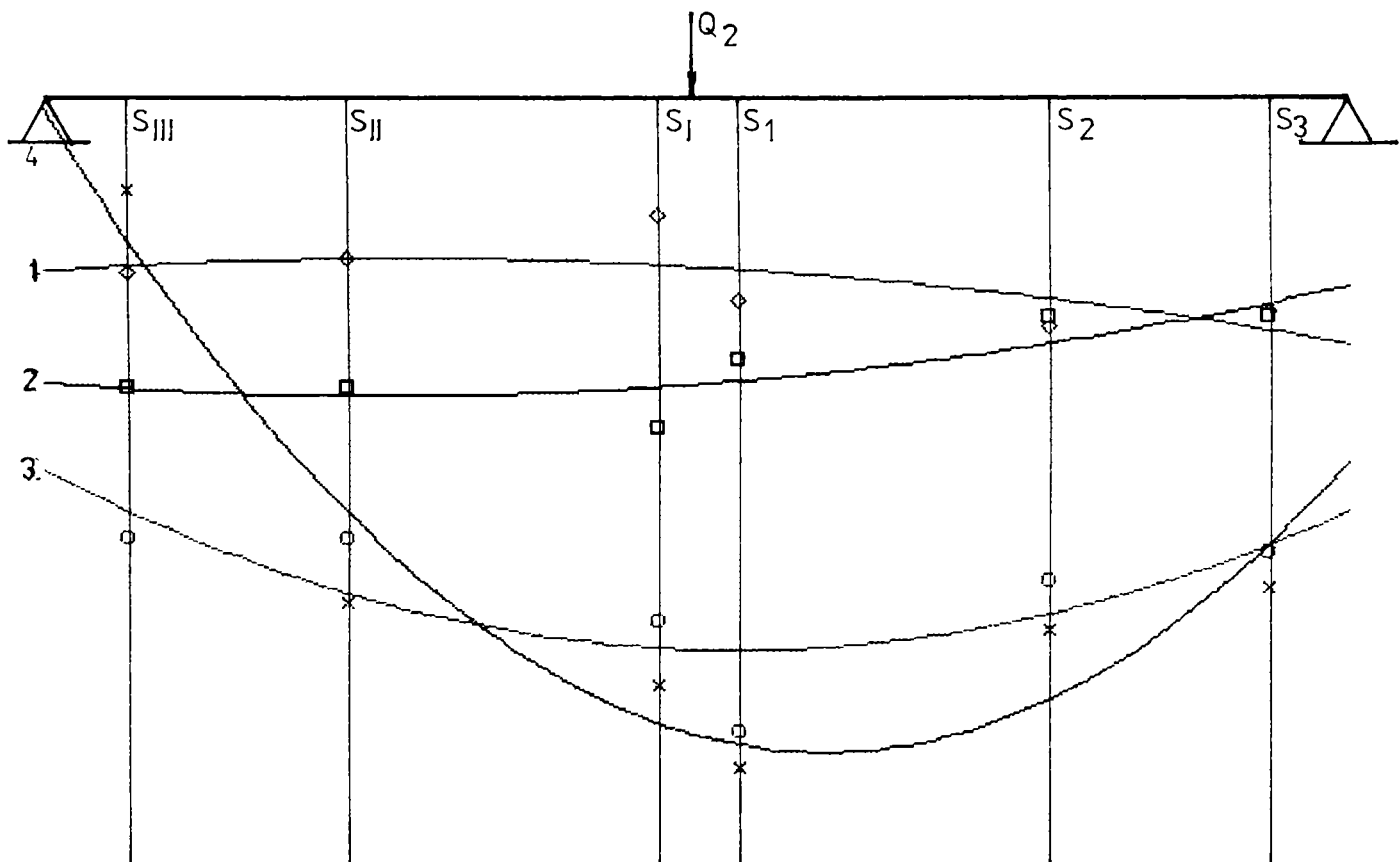


Fig.A.6.10. Sarcina de încărcare Q_2 în poziția P_3

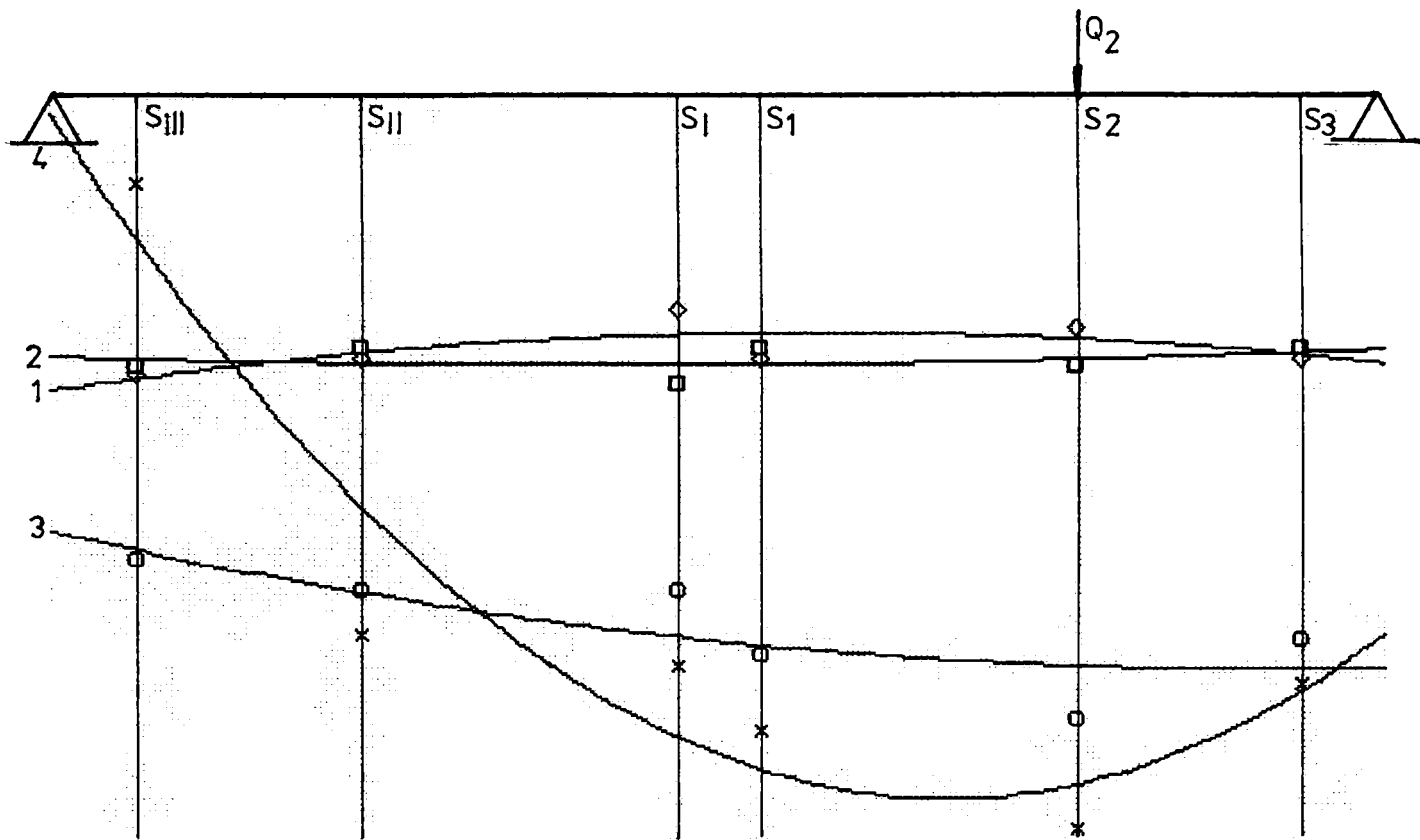


Fig.A.6.11. Sarcina de încărcare Q_2 în poziția P_4

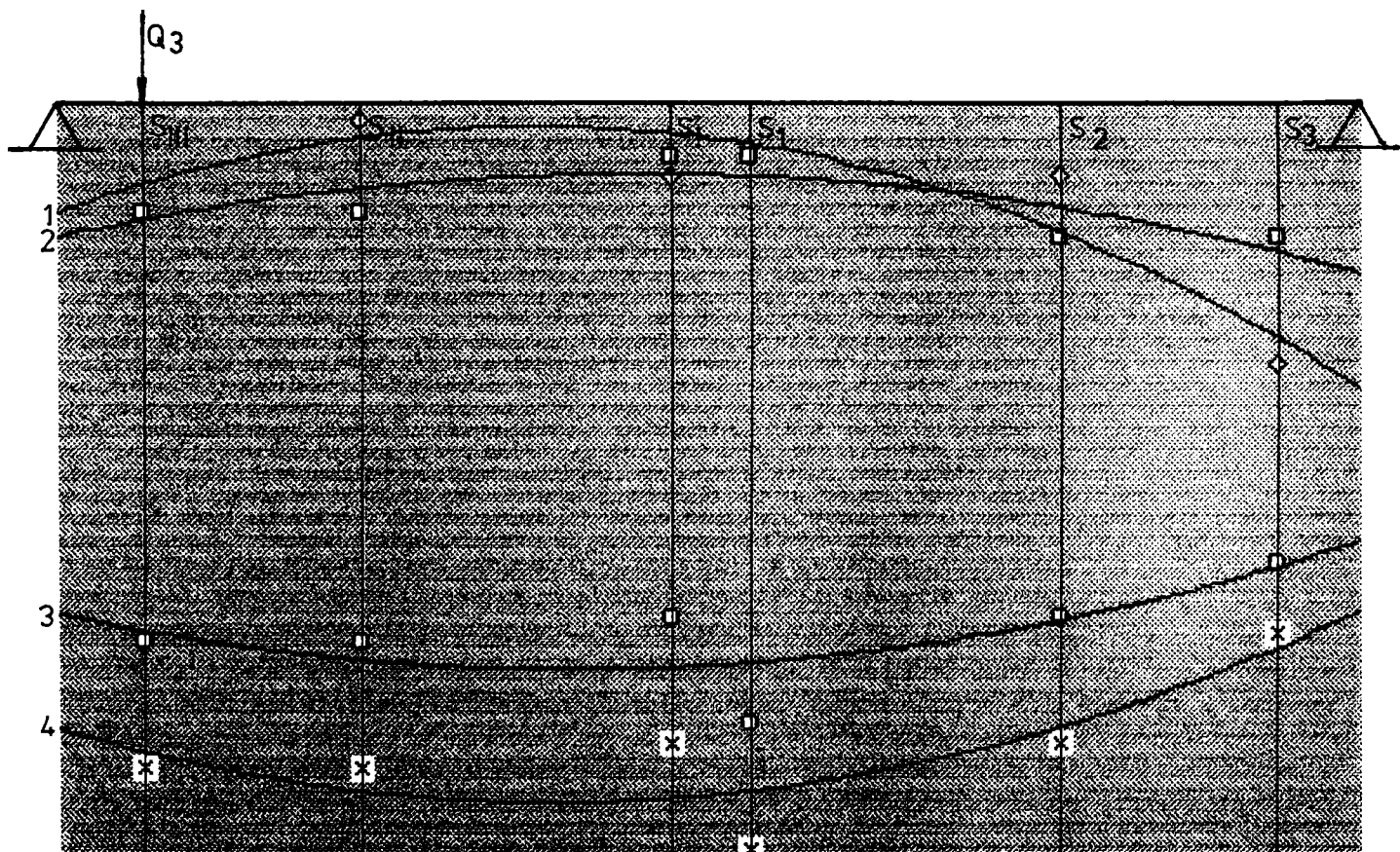


Fig.A.6.12. Sarcina de încărcare Q_3 în poziția P_1

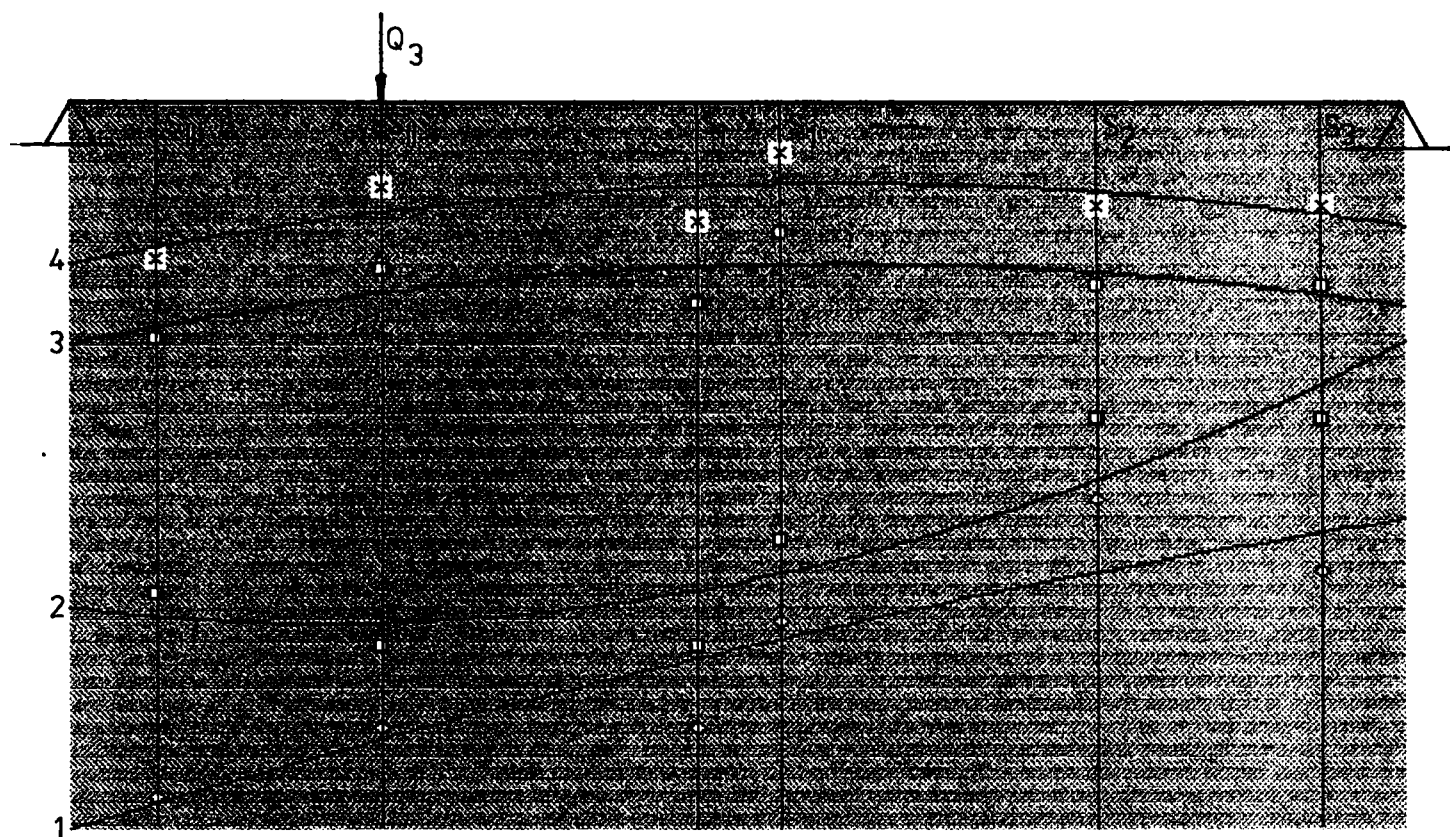


Fig.A.6.13. Sarcina de încărcare Q_3 în poziția P_2

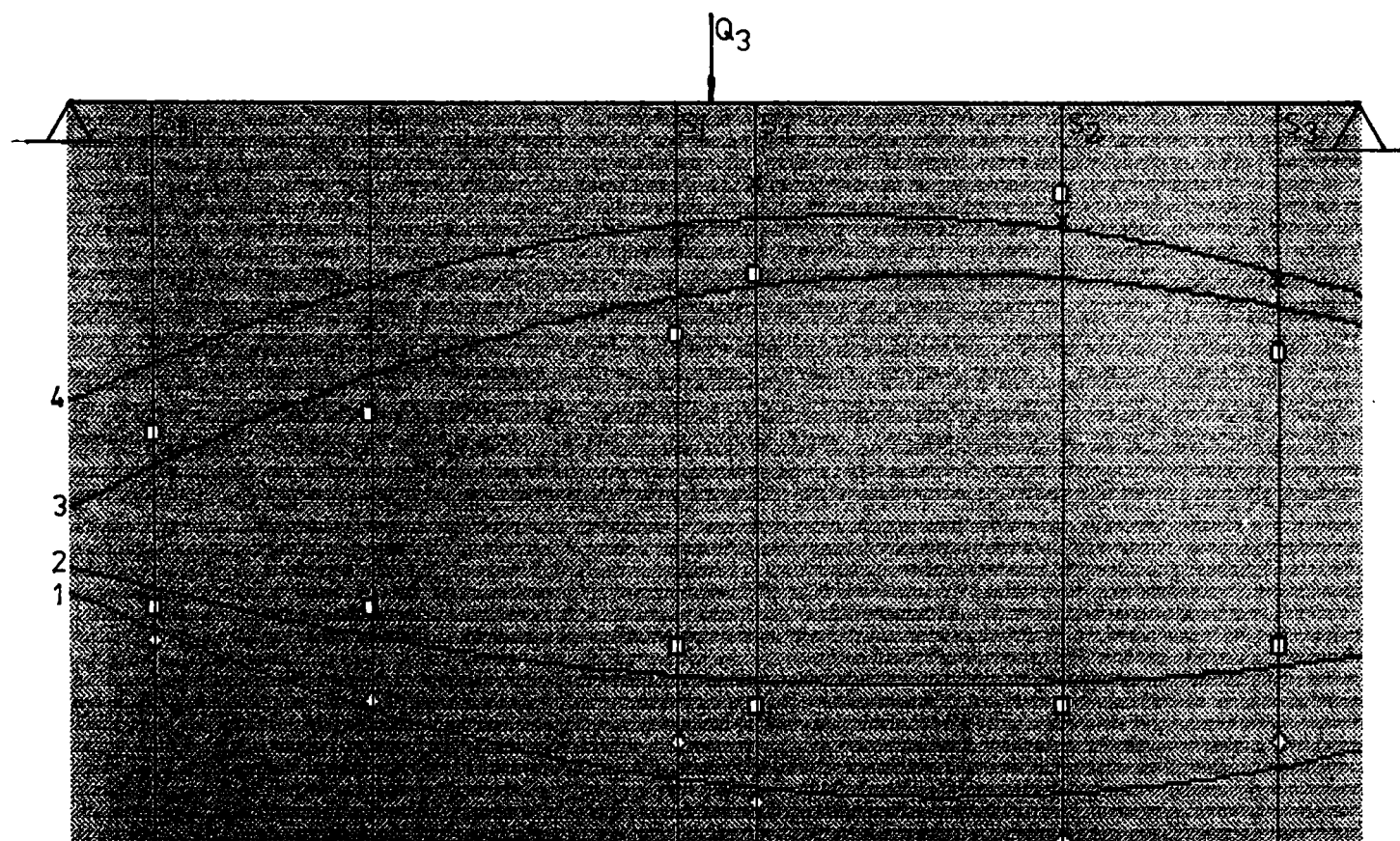


Fig.A.6.14. Sarcina de încărcare Q_3 în poziția P_3

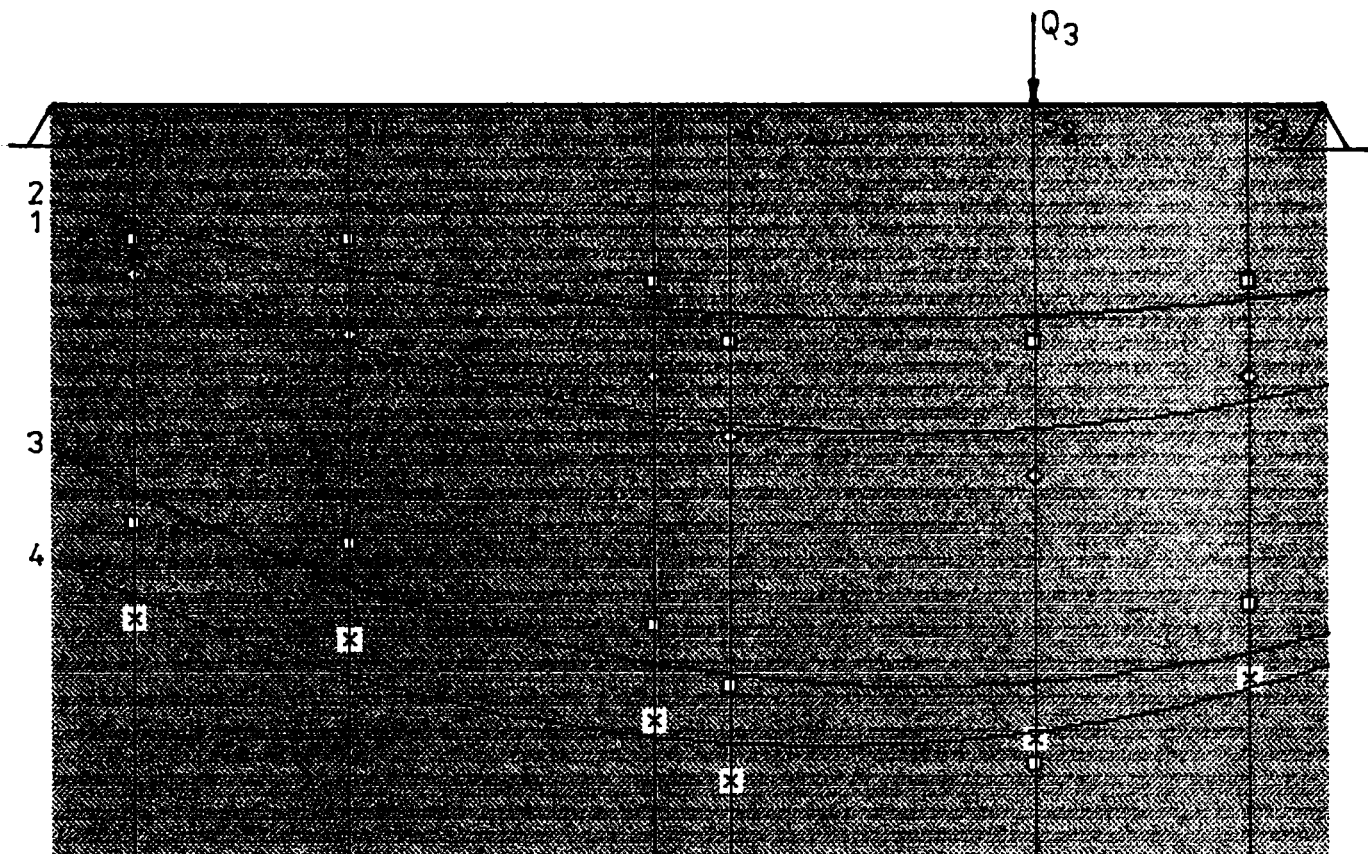


Fig.A.6.15. Sarcina de încărcare Q_3 în poziția P_4

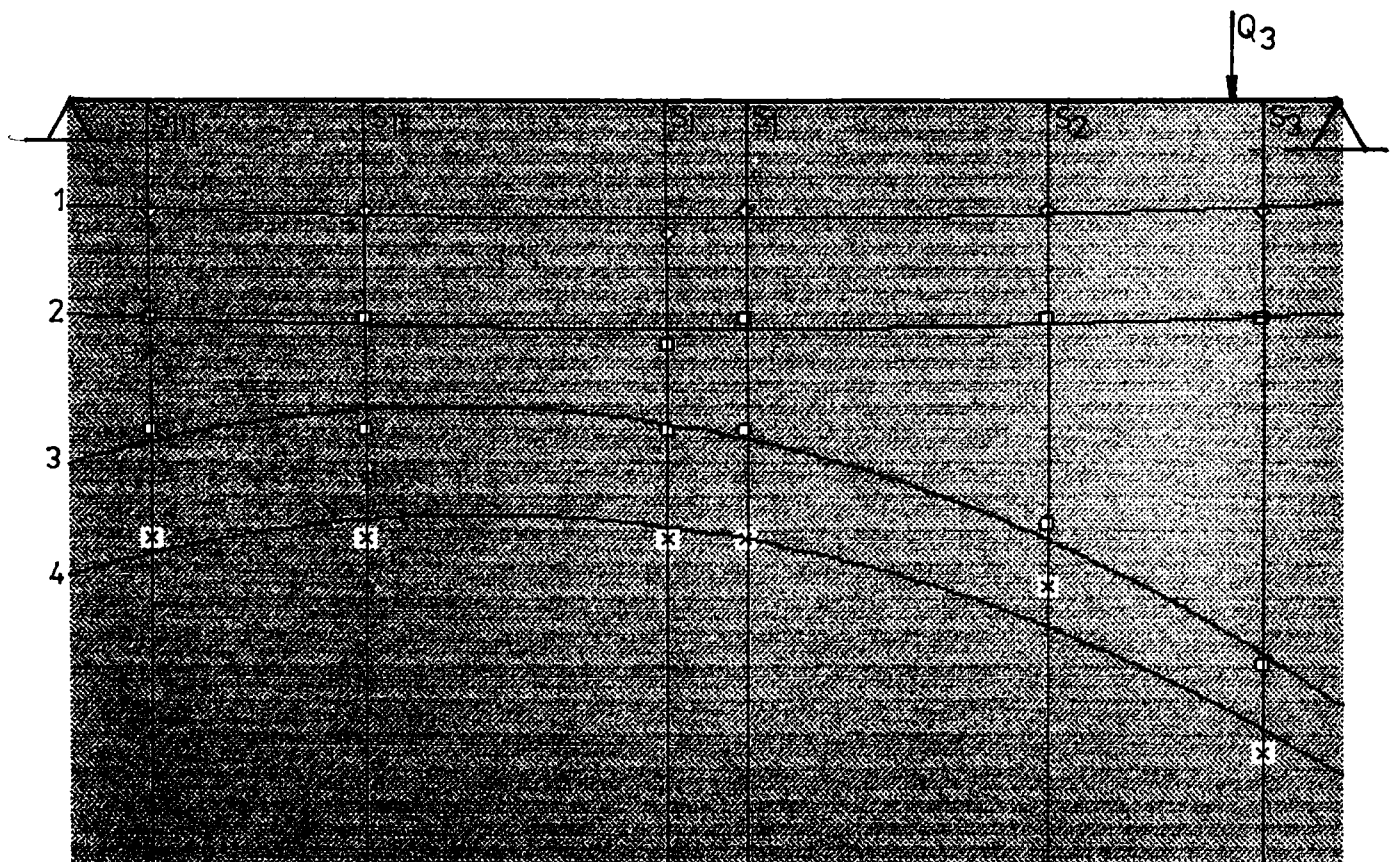


Fig.A.6.16. Sarcina de încărcare Q_3 în poziția P_5

Fișier de comenzi cu datele de intrare în modulul de optimizare

```

C* COSMOS/M    Geostar V2.50
C* FILE,"D:\Program Files\Working\cbreto\optimizare\logeron1min1.ses",1,1,1,1
VIEW,0,0,1,0
PT,1,0,750,0
PT,2,0,162,0
SCALE,0
SCALE,0
PT,3,2500,0,0
SCALE,0
PT,4,2500,750,0
SF4PT,1,2,3,4,1,0
SFEXTR,4,4,1,X,1035
SCALE,0
SFEXTR,5,5,1,X,1000
SCALE,0
SFEXTR,8,8,1,X,490
SCALE,0
SFEXTR,11,11,1,X,510
SCALE,0
SFEXTR,14,14,1,X,1000
SCALE,0
PT,15,670,750,0
PT,16,1500,750,0
CREXTR,15,16,1,Z,-750
CREXTR,15,18,1,Y,-750
PTINTCC,1,22,23,1,5E-005
CRDEL,22,23,1
CRDEL,24,25,1
CRLINE,22,17,23
CRLINE,23,16,24
SF2CR,7,3,22,0
SF2CR,8,22,23,0
SF2CR,9,23,4,0
SFDEL,3,6,1
SFDEL,2,2,1
SFEXTR,4,4,1,X,1035
SFEXTR,30,30,1,X,510
SFEXTR,33,33,1,X,490
SFEXTR,36,36,1,X,1000
SFDEL,1,1,1
SFSYM,7,13,1,Z,1,256
VIEW,1,1,1,0
SFDEL,14,20,1
VIEW,0,0,1,0
VIEW,1,1,1,0
CRDEL,25,27,2
CRDEL,7,8,1
SFDEL,7,8,1
CRDEL,20,21,1
VIEW,0,0,1,0

```

PT,33,0,162,0
PT,34,0,750,0
CREXTR,34,34,1,X,670
CRLINE,43,33,24
CRLINE,44,35,16
CREXTR,35,35,1,Y,-700
PTINTCC,43,45,45,1,5E-005
CRDEL,45,45,1
CRLINE,45,35,37
CRLINE,46,34,33
SF2CR,14,46,45,0
SF2CR,15,45,23,0
VIEW,1,1,1,0
SFSYM,9,15,1,Z,1,256
SF2CR,23,67,46,0
SF2CR,24,68,45,0
SF2CR,25,71,23,0
SF2CR,26,52,4,0
SF2CR,27,55,30,0
SF2CR,28,58,33,0
SF2CR,29,61,36,0
SF2CR,30,64,39,0
SF2CR,31,66,42,0
SF2CR,32,70,44,0
SF2CR,33,49,29,0
SF2CR,34,53,32,0
SF2CR,35,56,35,0
SF2CR,36,59,38,0
SF2CR,37,62,41,0
SF2CR,38,65,47,0
SF2CR,39,69,48,0
SF2CR,40,50,28,0
SF2CR,41,54,31,0
SF2CR,42,57,34,0
SF2CR,43,60,37,0
SF2CR,44,63,40,0
SFEXTR,41,42,1,Z,-47
SFEXTR,29,38,3,Z,-47
SFEXTR,44,44,1,Z,-47
SFEXTR,66,66,1,Z,47
SFEXTR,70,70,1,Z,47
SFEXTR,49,49,1,Z,47
SFEXTR,53,53,1,Z,47
SFEXTR,56,56,1,Z,47
SFEXTR,59,59,1,Z,47
SFEXTR,62,62,1,Z,47
SFEXTR,47,47,1,Z,-47
SFEXTR,48,48,1,Z,-47
SFEXTR,28,28,1,Z,-47
SFEXTR,31,31,1,Z,-47
SFEXTR,34,34,1,Z,-47
SFEXTR,37,37,1,Z,-47

SFEXTR,40,40,1,Z,-47
 SFEXTR,65,65,1,Z,47
 SFEXTR,69,69,1,Z,47
 SFEXTR,50,50,1,Z,47
 SFEXTR,54,54,1,Z,47
 SFEXTR,57,57,1,Z,47
 SFEXTR,60,60,1,Z,47
 SFEXTR,63,63,1,Z,47
 SFSYM,14,72,1,X,1,5535
 SFDEL,73,200,1
 SFSYM,14,72,1,X,1,5535
 SFDEL,73,200,1
 SFSYM,14,72,1,X,1,11070
 SCALE,0
 PARASSIGN,T1,REAL,5.5
 PARASSIGN,T2,REAL,5
 EGROUP,1,SHELL3,0,0,0,0,0,0,0,0
 MPROP,1,EX,2.1E5,NUXZ,.3
 RCONST,1,1,1,6,T1,0,0,0,0,0
 RCONST,1,2,1,6,T2,0,0,0,0,0
 SCALE,0
 SCALE,0
 ACTSET,RC,1
 MA_SF,31,44,1,0,23,0
 EDEL,1,20000,1
 SCALE,0
 MA_SF,31,44,1,0,47,0
 SCALE,0
 MA_SF,45,50,1,0,47,0
 SCALE,0
 MA_SF,51,51,1,0,47,0
 SCALE,0
 MA_SF,104,110,1,0,47,0
 MA_SF,52,58,1,0,47,0
 MA_SF,61,65,1,0,47,0
 MA_SF,59,60,1,0,47,0
 MA_SF,66,72,1,0,47,0
 MA_SF,118,124,1,0,47,0
 MA_SF,125,131,1,0,47,0
 MA_SF,90,103,1,0,47,0
 ACTSET,RC,2
 ACTSET,RC,1
 MA_SF,111,117,1,0,47,0
 INITSEL,SF,1,1
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SF2CR,132,39,198,0
 SF2CR,133,198,195,0
 SF2CR,134,195,192,0
 SF2CR,135,192,189,0
 SF2CR,136,189,154,0
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1

SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 ACTSET,RC,2
 MA_SF,23,30,1,0,47,0
 MA_SF,82,88,1,0,47,0
 MA_SF,9,15,1,0,47,0
 MA_SF,73,74,1,0,47,0
 MA_SF,132,136,1,0,47,0
 MA_SF,16,22,1,0,47,0
 MA_SF,75,81,1,0,47,0
 NMERGE,1,1,20000,1,0,0,0
 NMERGE,1,20000,1,1,0,0,0
 NCOMPRESS,1,15821
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,SF,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 PT,142,1250,750,0
 SELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,750,750,-47,303,1
 SELRANGE,ND,0,1,1,1,0,11070,750,750,-47,303,1
 FND,214,FY,-751,218,1
 PT,143,9820,750,0
 SCALE,0
 SELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,750,750,-47,303,1
 SELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,750,750,-47,303,1
 SELRANGE,ND,0,1,1,1,0,11070,750,750,-47,303,1
 FND,3062,FY,-751,3066,1
 UNSELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 VIEW,0,0,1,0
 UNSELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 SCALE,0
 UNSELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 VIEW,0,0,1,0
 VIEW,1,0,1,0
 VIEW,0,0,1,0
 VIEW,1,1,14,0
 VIEW,1,1,1,0
 SELRANGE,EL,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 UNSELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 FND,722,FY,-4498,728,1
 UNSELRANGE,CR,0,1,1,1,0,11070,0,750,-47,303,1
 FCR,399,FY,-9369,399,1
 SELRANGE,ND,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 SELRANGE,ND,0,1,1,1,0,11070,0,750,0,0,1
 FND,5083,FY,-10618,5097,1
 DSF,23,AL,0,23,1

DSF,82,AL,0,82,1
CLS,1
DVARDEF,1,0,T1,1,20,0.19,0,S_THICK,0
DVARDEF,2,0,T2,1,20,0.19,0,S_THICK,0
OP_OBJDEF,1,0,WEIGHT,0,0,1,0.01,-1
OP_CONDEF,1,0,VON,0,1,0,0,1,SF,9,136,1,1,160,1.59,-1
A_OPTIMIZE,10,1,5,1,1,0,STATIC
C* R_STATIC