

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ
DEPARTAMENTUL MECATRONICĂ

ing. HOREA NICOLAE HORA

**CONTRIBUȚII PRIVIND INFLUENȚA STĂRII DE
TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A SISTEMELOR
OPTOMECANICE ASUPRA CALITĂȚII IMAGINII**

conducător științific:

prof. dr. ing. **Ioan NICOARĂ**

2009

CUPRINS

| | |
|--|----|
| 1.INTRODUCERE | 4 |
| 2. ELEMENTE PRIVIND EVALUAREA CALITĂȚII SISTEMELOR OPTICE. INFLUENȚA ERORILOR DE EXECUȚIE ȘI MONTAJ. TOLERANȚE | |
| 2.1. Criterii de evaluare a calității sistemelor optice | 10 |
| 2.2. Toleranțele parametrilor de calitate a imaginii | 18 |
| 2.3. Influența erorilor de execuție și montaj a componentelor optice și mecanice asupra calității imaginii | 20 |
| 2.4. Clase de calitate a sistemelor optice..... | 29 |
| 2.5. Concluzii și contribuții originale..... | 30 |
| 3. PARTICULARITĂȚI ALE STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A PIESELOR DIN STICLĂ OPTICĂ | 32 |
| 3.1. Materiale optice | 32 |
| 3.1.1. Proprietățile optice ale structurilor materiale în interacțiune cu radiația electromagnetică..... | 32 |
| 3.1.2. Materiale optice | 37 |
| 3.1.3. Proprietățile materialelor optice | 39 |
| 3.1.3.1. Proprietățile optice ale materialelor optice | 39 |
| 3.1.3.2. Proprietăți termice ale sticlei optice | 45 |
| 3.1.3.3. Proprietăți mecanice ale sticlei optice..... | 47 |
| 3.1.3.4. Proprietățile electrice ale sticlei optice..... | 49 |
| 3.2. Starea reală de solicitare complexă a componentelor optice | 49 |
| 3.3. Elemente de teoria elasticității generalizate..... | 54 |
| 3.3.1. Ecuațiile de bază ale teoriei elasticității. Ecuațiile constitutive de material | 54 |
| 3.3.2. Eforturi unitare și direcții principale. Invarianti | 57 |
| 3.3.3. Stări limită. Criterii fenomenologice ale stărilor limită | 59 |
| 3.4. Concluzii și contribuții originale..... | 62 |
| 4. ELEMENTE PRIVIND APLICAREA METODEI ELEMENTULUI FINIT ÎN ANALIZA STĂRII TRIAXIALE DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE PENTRU REZOLVAREA PROBLEMELOR DE ELASTICITATE | 66 |
| 4.1. Principii fundamentale | 66 |
| 4.2. Discretizarea domeniului de analiză..... | 68 |
| 4.3. Constituirea ecuațiilor elementelor finite și asamblarea lor în sistemul de ecuații al structurii..... | 70 |
| 4.4. Rezolvarea sistemului de ecuații și postprocesarea rezultatelor..... | 79 |
| 4.5. Utilizarea programului Abaqus în rezolvarea problemelor de elasticitate. 79 | |
| 4.6. Concluzii și contribuții originale..... | 95 |
| 5. ANALIZA NUMERICĂ A STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A SUBANSAMBLURILOR OPTOMECANICE IDEALE (FĂRĂ ERORI DE MONTAJ) | 97 |
| 5.1. Sinteza unui dublet acromat limitat la difracție | 97 |
| 5.2. Modelarea și simularea ansamblului optomecanic prin mef. Birefringența și | |

| | |
|---|------------|
| variația mărimii câmpului vizual caracterizat prin liniaritate | 101 |
| 5.2.1. Analiza modelului sistemului optomecanic în programul Abaqus pe baza structurii generate în AutoCAD | 101 |
| 5.2.2. Analiza variației parametrilor de calitate a imaginii funcție de starea de tensiune și deformație | 125 |
| 5.3. Concluzii și contribuții originale..... | 131 |
| 6. ANALIZA NUMERICĂ A STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A SUBANSAMBLURILOR OPTOMECANICE CU ERORI DE MONTAJ..... | 136 |
| 6.1. Modelarea și simularea ansamblului optomecanic real prin mef..... | 136 |
| 6.2. Analiza variației parametrilor de calitate a imaginii funcție de starea de tensiune și deformație | 156 |
| 6.3. Concluzii și contribuții originale..... | 163 |
| 7. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE | 168 |
| 7.1. Proiectarea experimentului | 168 |
| 7.2. Descrierea standului..... | 170 |
| 7.3. Rezultate experimentale | 171 |
| 7.4. Concluzii și contribuții originale..... | 174 |
| 8. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE..... | 175 |
| Bibliografie | 186 |

1. INTRODUCERE

Calitatea, în cea mai generală accepțiune, reprezintă criteriul de ierarhizare a ofertanților de pe piața concurențială existentă în toate domeniile și, ca urmare, eforturile tuturor furnizorilor de produse sau servicii converg spre creșterea calității.

În domeniul produselor tehnice, calitatea vizează obținerea unor calificative cât mai ridicate pentru o paletă largă de atribute: o gamă extinsă de parametri care determină performanțele tehnice specifice, gradul de universalitate, manevrabilitatea, fiabilitatea și mentenabilitatea, designul, consumul de materiale, prețul etc.

În ceea ce privește grupa aparatelor optomecanice și optoelectronice, ultimele decenii poartă amprenta unei evoluții foarte dinamice, manifestate printr-o spectaculoasă diversificare a gamei de aplicații și o continuă creștere a performanțelor legate sensibilitate, rezoluție, domeniu spectral și miniaturizare.

Succesul remarcabil al optomecanicii și optoelectronicii se datorează, pe de o parte, progreselor în tehnologia realizării componentelor electronice și dezvoltării metodelor și tehnicilor de prelucrare a imaginii și, pe de altă parte, unui salt semnificativ în ceea ce privește acuratețea și viteza de proiectare și execuție a subansamblurilor optice având performanțe deosebite de calitate a imaginii.

Baza teoretică pentru evoluția calitativă a sistemelor optice există de la jumătatea secolului trecut, când, pe lângă metodele tradiționale de sinteză și analiză s-a dezvoltat optica ondulatorie și Fourier, în forma aplicativ-ingenerească a algoritmilor de calcul.

Caracterul laborios și iterativ al calculului optic a constituit un impediment important în aplicarea sa cu eficiența cerută într-o unitate de producție. Sistemele de calcul automat au permis dezvoltarea, răspândirea și utilizarea curentă a unor softuri specializate, care au eliminat inconvenientele ultimelor două secole.

În prezent, ingineria optică reprezintă încă o ramură tânără a tehnicii. Metodele de sinteză și algoritmi de calcul aferenți nu au intrat în patrimoniul universal de cunoștințe și nu se află în mod gratuit la dispoziția oricărui utilizator, prin bibliografie cu conținut explicit sau standarde specifice sistemice, ci se află sub protecția firmelor de profil, care le-au elaborat și le utilizează sub semnul exclusivității.

Totuși, oferta de pe piață indică standarde tot mai ridicate privind calitatea imaginii. O clasificare de cea mai largă generalitate include sistemele optice în trei categorii: sisteme limitate la difracție, sisteme precise și sisteme comerciale. Chiar și ultima categorie, a sistemelor numite comerciale, se bucură de performanțe optice ridicate, greu de imaginat pentru producția de serie, la prețuri accesibile, în urmă cu câteva decenii.

Acceptând ca valabilă aserțiunea că un sistem optic asociat unui subansamblu optomecanic sau optoelectronic având o funcționalitate oarecare, poate fi proiectat la parametrii optici impuși de aplicație, se pune problema regăsirii acestor parametri la artefactul realizat practic.

Această problemă are un caracter mult mai acut decât în cazul punerii în practică al oricărui alt tip de proiect, având în vedere că valorile parametrilor de calitate semnificativi se încadrează în domeniul nanometrilor. Astfel, dacă pentru o construcție mecanică proiectarea corectă și respectarea tehnologiei adecvate reprezintă o garanție a calității

produsului final, în cazul sistemelor optice acționează o serie de elemente suplimentare a căror influență nu poate fi ignorată.

Un sistem optic de cea mai bună calitate – limitat la difracție – conform proiectului, poate fi afectat de erori de execuție a pieselor optice sau mecanice și de erori de montaj, care să descalifice total subansamblul materializat practic. Sensibilitatea problemei rezidă în faptul că forma pieselor optice este mult mai importantă decât în cazul oricărui organ de mașină metalic, având în vedere faptul că funcționalitatea piesei optice este legată direct de forma dioptrilor. Abaterile globale și locale de la formele sferice, plane sau asferice prescrise de proiectant trebuie să se încadreze în toleranțe mult mai restrânse decât în domeniul mecanic. De asemenea, centrarea sistemelor optice este o condiție esențială pentru calitatea imaginii și ca urmare, pozițiile relative ale pieselor optice și ale subansamblurilor optice în raport cu monturile mecanice dobândesc o importanță deosebită și necesită un control mult mai atent decât în celelalte aplicații tehnice.

Un aspect particular, cu influență majoră, în cazul subansamblurilor optice fixate în monturi de orice tip, este legat de deformațiile locale și globale ale dioptrilor ca urmare a presiunii de contact sticlă-metal și tensiunile interne permanente din volumul sticlei determinat de aceeași cauză.

Efectele fixării lentilelor în monturi prin apăsarea muchiilor inelelor filetate pot fi încadrate în două categorii: modificarea formei nominale a dioptrilor prin deformări locale în zona contactului și deformări globale pe suprafețe extinse în zona centrală a lentilei, precum și inducerea fenomenului de birefringență, ca urmare a tensionării sticlei în masă. Ambele efecte influențează calitatea imaginii. Nivelul influenței depinde de momentul de strângere a inelului filetat, coroborată cu erorile de formă și poziție ale componentelor și poate ajunge până la descalificarea subansamblului.

Prezenta teză își propune să dezvolte un studiu care să pună în

evidență evoluția parametrilor de calitate a imaginii în condiții în care se au în vedere toate aspectele implicate în realizarea practică a unui sistem optic care, teoretic, prin aplicarea algoritmilor de proiectare, este limitat la difracție.

Scopurile declarate ale tezei pot fi formulate astfel:

- *stabilirea toleranțelor de formă și poziție a componentelor optice pentru prezervarea caracterului limitat la difracție al sistemului optic*
- *identificarea tipului și mărimii erorilor de montaj, generate de prescrierea ajustajului cu joc dintre subansamblul optic și montura metalică*
- *modelarea numerică a ansamblului optomecanic lentile-montură și simularea comportamentului ansamblului la aplicarea unor forțe de apăsare de diferite valori, prin metoda elementului finit*
- *analiza evoluției parametrilor de calitate a imaginii sub acțiunea presiunii de contact care determină deformări locale în zona contactului și deformări de suprafață extinse ale dioptrilor în zonele centrală și mediană, ca urmare a stării de tensiune și deformație care afectează componentele optice*
- *studiul manifestării și evoluției fenomenului de birefrință generat de tensiunile din masa lentilelor*
- *elaborarea unor recomandări privind momentele de strângere admisibile pentru inelele de fixare a lentilelor, astfel încât caracterul limitat la difracție al sistemului optic să se păstreze, conform proiectului.*

Teza este structurată pe 8 capitole.

Capitolul 2, intitulat **Elemente privind evaluarea calității sistemelor optice. Influența erorilor de execuție și montaj. Toleranțe**, prezintă o sinteză a parametrilor tradiționali de calitate a imaginii (aberații), precum și a celor moderni, care vizează indicatori ondulatorii (OPD, RMS OPD) și Fourier (MTF, PTF, PSF, Raportul Strehl). Sunt prezentate, ca rezultat al studiului bibliografic și al unor cercetări desfășurate la Universitatea Politehnica Timișoara, valori extreme admise

ale acestor parametri pentru păstrarea caracterului limitat la difracție al sistemelor optice. Un paragraf separat este dedicat descrierii erorilor de execuție și montaj a subansamblurilor optice, precum și a toleranțelor admise pentru acestea. În final, este prezentată o clasificare a sistemelor optice pe categorii de calitate și parametrii acceptați pe plan mondial drept criterii de clasificare.

Capitolul 3, **Particularități ale stării de tensiune și deformație a pieselor din sticlă optică**, prezintă caracteristicile optice, mecanice, termice și electrice ale materialelor optice, precum și necesitatea abordării particulare a sticlei din punct de vedere al rezistenței materialelor. Este justificată inițierea unui demers de analiză triaxială a stării de tensiune și deformație a pieselor de tipul lentilelor. Se face o prezentare sintetică a teoriei elasticității generalizate, a stărilor limită și se justifică desemnarea tensiunilor echivalente von Mises ca cele mai adecvate pentru problema de elasticitate generalizată care urmează să fie abordată.

Capitolul 4, **Elemente privind aplicarea metodei elementului finit în analiza stării triaxiale de tensiune și deformație**, conține o descriere de principiu a metodei, cu particularizări pentru elementele finite tetraedrice liniare, care sunt considerate adecvate discretizării unor structuri de tipul lentilelor. Este exemplificată printr-o demonstrație aplicativă metoda de lucru cu programul de element finit Abaqus.

Capitolul 5, **Analiza stării de tensiune și deformație a sistemelor optomecanice ideale (fără erori de montaj)**, prezintă un studiu detaliat al efectului solicitărilor mecanice asupra componentelor optice în cazul poziționării ideale, nominale a acestora în raport cu axa optică, respectiv geometrică a subansamblului optomecanic. Obiectul analizei este un dublet acromat limitat la difracție, de concepție originală. Modelarea acestuia și simularea părții mecanice prin efectele sunt realizate cu ajutorul programului de element finit Abaqus. Rezultatele analizei pentru mai multe cazuri de încărcare permit studiul apariției și evoluției fenomenului de birefringență, precum și corelarea acestuia cu mărimea deformațiilor suplimentare ale frontului de undă. Starea de

tensiune, dar mai ales de deformație indică abaterile de la sfericitate a dioptrilor, cauzate de solicitarea mecanică. Prin prelucrarea datelor numerice prelevate din Abaqus și preluate în Microsoft Excel s-au determinat generatoarele deformate, reale ale dioptrilor liberi ai lentilelor, în forme analitice canonice. Reevaluarea calitativă a sistemului optic cu dioptri asferici s-a realizat cu programul dedicat analizei sistemelor optice OSLO LT. S-au putut formula aprecieri privind reducerea liniarității sistemului optic pe anumite zone ale aperturii și concluzii privind influența montajului chiar asupra unui sistem optic poziționat ideal.

Capitolul 6, **Analiza numerică a stării de tensiune și deformație a sistemelor optomecanice cu erori de montaj**, reia studiul din capitolul anterior, pentru același subsansamblu optic, poziționat în montură cu erori, care, din punct de vedere al criteriilor optice, se încadrează în limitele abaterilor admisibile. Sunt puse în evidență aceleași efecte – birefringența și asferizarea dioptrilor, accentuate de asimetria sistemului în plan meridian. În final, sunt discutate posibilitățile de recomandări practice în funcție de parametrii concreți ai fiecărei aplicații.

Capitolul 7, **Determinări experimentale**, vizează validarea rezultatelor obținute numeric prin măsurări calitative bazate pe aspectare prin microscopie și preluare digitală de imagine. Rezultatele experimentale confirmă concluziile simulărilor numerice din partea anterioară a tezei.

Capitolul 8, **Concluzii finale și contribuții originale**, reiterează, pe scurt, motivația și obiectivele tezei, realizările demersului numeric și experimental și, în final, conturează un sumar al contribuțiilor originale prezente în lucrare.

Teza, cu un vădit caracter interdisciplinar, care reunește prin conexiuni impuse de necesitate, discipline diverse, printre care ingineria optică, rezistența materialelor, informatica și știința materialelor, s-a bucurat de sprijinul substanțial, competent și permanent al conducătorului științific, dl prof. dr. ing Ioan Nicoară, căruia, pe această cale, autorul își exprimă o profundă grațitudine.

2. ELEMENTE PRIVIND EVALUAREA CALITĂȚII SISTEMELOR OPTICE. INFLUENȚA ERORILOR DE EXECUȚIE ȘI MONTAJ. TOLERANȚE

2.1. CRITERII DE EVALUARE A CALITĂȚII SISTEMELOR OPTICE

Din punct de vedere calitativ, imaginea formată de un sistem optic este corespunzătoare dacă satisface două condiții, [G15]:

- este asemenea cu obiectul – nu prezintă imperfecțiuni geometrice
- reproduce fidel culoarea obiectului în toate punctele componente.

În cazul sistemelor optice reale, ambele condiții sunt satisfăcute numai într-o anumită măsură, care depinde de complexitatea și caracteristicile impuse sistemului, de calitatea proiectării, execuției și montajului subansamblurilor optomecanice componente.

La modul absolut, asemănarea perfectă, la o scară constantă pentru orice punct din planul imagine, este realizată numai de sistemele optice ideale, descrise prin dioptrica de ordinul I. Numai în domeniul gaussian imaginea este ideală (stigmatică, aplanatică și ortoscopică).

Sistemele optice reale lucrează cu fascicule de deschidere mare și înclinare mare față de axa optică pentru a asigura câmpurile obiect impuse și luminozitatea corespunzătoare în planul imagine. În consecință, imaginile formate de sistemele optice reale sunt afectate de erori

geometrice, a căror mărime nu depinde numai de deschiderea și înclinarea fasciculelor luminoase, ci și de forma dioptrilor și densitatea optică a mediilor. Complexul interdependent al valorilor concrete privind geometria și sorturile optice ale componentelor determină diferențe de drum între punctele aparținând aceluiași front de undă și, ca urmare, deformarea acestuia.

Din punct de vedere al reproducerii culorii, numai utilizarea luminii monocromatice asigură un răspuns spectral ideal. În realitate, majoritatea aparatelor optice lucrează cu radiație policromatică. Sistemele laser sunt singurele pentru care analiza cromatică a imaginii nu este justificată.

În ordine cronologică, parametrii de calitate a imaginii au evoluat de la criterii bazate pe fundamente strict geometrice spre analiză ondulatorie și Fourier.

În tabelul 2.1, [G16], este prezentată o sinteză a parametrilor de evaluare a calității imaginii.

Toți parametrii indicați în tabelul 2.1 sunt utilizați în prezent, deși informația rezultată prin analiza variației valorilor acestora funcție de apertură sau mărimea câmpului are un caracter oarecum redundant. Se pot stabili echivalențe cu un grad de precizie relativ ridicat cel puțin între unii dintre parametri aparținând unor categorii diferite.

Studierea alurii curbelor reprezentând aberațiile geometrice și cromatice, reprezentările grafice ale frontului de undă emergent, ale funcției imagine a punctului, ale funcției optice de transfer de modulație și de fază, conduc, din punct de vedere calitativ, la concluzii asemănătoare.

Spre exemplu, în figurile 2.1...2.6 sunt ilustrate rezultatele analizei unui subansamblu optic de tip dublet.

Tabelul 2.1

| Categorie criterială | Parametru de calitate a imaginii | Simbol | Metode de calcul |
|--|---|-----------------|---|
| Criterii geometrice (aberații geometrice și cromatice) | Aberația sferică transversală și axială | dy', ds' | Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiective |
| | Coma tangențială și sagitală | k_T, k_S | Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală |
| | Curburile astigmatice de câmp tangențială și sagitală | z_T, z_S | Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală; Trasarea oblică a razelor |
| | Distorsiunea | $d\tilde{y}'\%$ | Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală |
| | Diagrama spot | - | Trasare vectorială a razelor |
| Criterii ondulatorii | Aberația de undă | OPD, RMS OPD | Calcul geometric |
| | Criteriul Rayleigh | RL | Impune valoarea minimă $OPD = \lambda/4$ pentru sisteme limitate la difracție |
| Criterii bazate pe optica Fourier | Funcția imagine a punctului | PSF | Analiză Fourier |
| | Funcția optică de transfer de modulație | MTF | Analiză Fourier |
| | Funcția optică de transfer de fază | PTF | Analiză Fourier |
| | Funcția imagine a liniei | LSF | Analiză Fourier |
| | Raportul Strehl | Strehl | Funcție de OPD sau MTF |

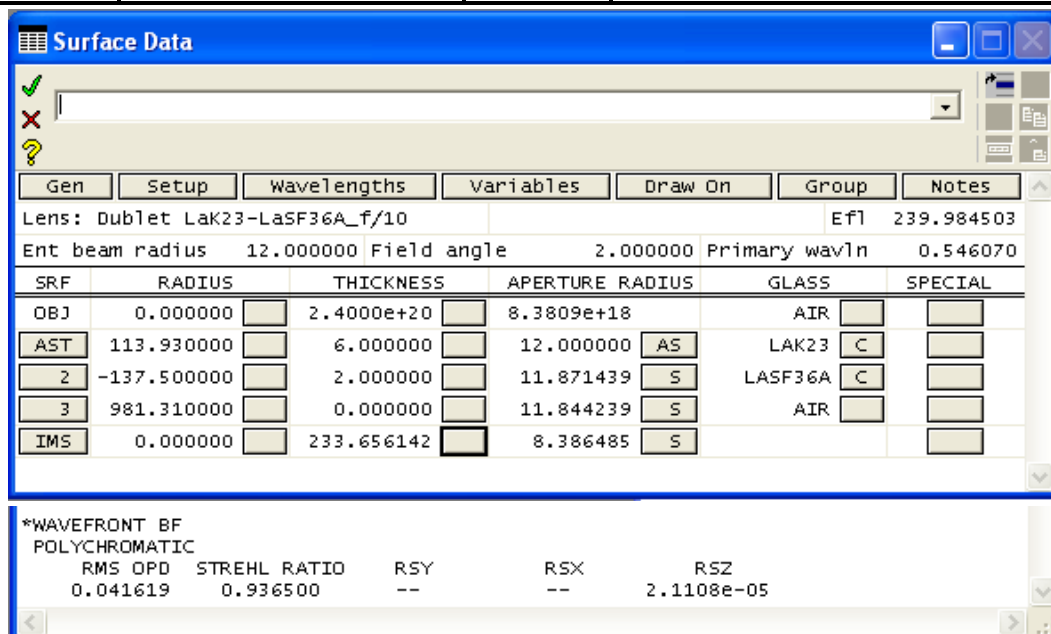


Fig. 2.1. Foaia de date a sistemului și valorile parametrilor RMS OPD și Strehl

În figura 2.1 pot fi urmărite caracteristicile geometrice și de material, precum și distanța focală, respectiv abscisele obiect și imagine conjugate. În subsolul ferestrei de date este redat parametrul ondulatoriu sintetic RMS OPD și parametrul energetic Raportul Strehl. Valoarea foarte redusă a primului și valoarea foarte ridicată a celui de-al doilea indică o calitate deosebit de bună a sistemului.

Aceeași concluzie, dar în mod mai explicit și nuanțat, rezultă din tabloul sintetic al aberațiilor reziduale din figura 2.2, care conține schema optică și mersul razelor prin sistem, curbele de sferocromatism funcție de apertură, variația cromatică a focarului în raport cu lungimea de undă, în spectrul vizibil, curburile astigmatice de câmp funcție de înălțimea de incidență, distorsiunea procentuală și aberația cromatică de mărire pe înălțimea de incidență, precum și curbele de interceptare a razelor în plan meridian și sagital funcție de panta razei extraaxiale emergente, la trei înclinări ale razei pupilare principale (pe axă, la 0.7, respectiv la deschiderea maximă a câmpului obiect).

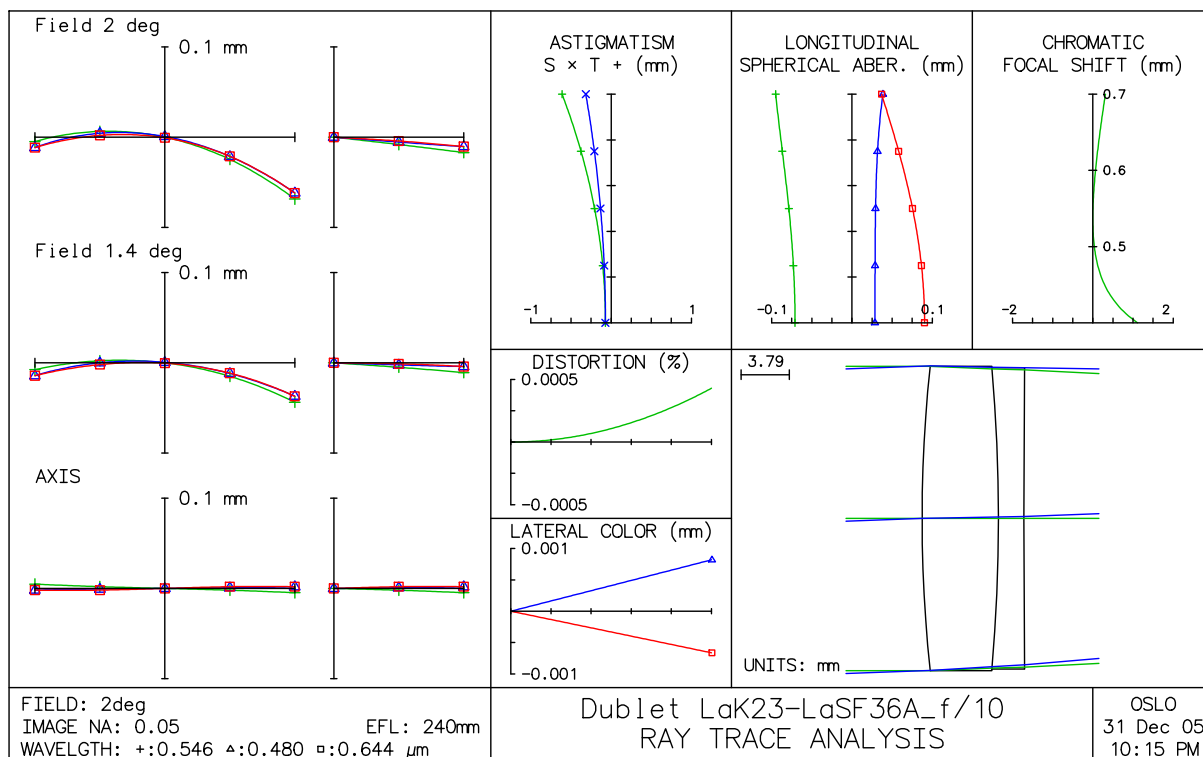


Fig. 2.2. Aberațiile geometrice și cromatice ale sistemului

Deși, în principiu, toate curbele din figura 2.2 indică o foarte bună calitate a sistemului optic analizat, informațiile furnizate de fiecare curbă nu se suprapun total, ci conțin și elemente particulare, specifice. De exemplu, caracterul ușor subcorectat din punct de vedere al aberației sferice rezultă atât din curba de variație a sfericității longitudinale, cât și din curbele de interceptare a razelor. Totuși, acestea din urmă conțin câteva elemente suplimentare. Se observă că alura acestora în plan meridian este asimetrică, ceea ce denotă și prezența comei reziduale (negative) tot mai accentuate pe măsură ce înclinarea razei pupilare crește. De asemenea, numai curbele de interceptare a razelor, prin extinderea constantă în plan meridian indică absența vignetații fasciculului la traversarea tubului optic. Acromazia este certificată de suprapunerea curbelor în radiație roșie și albastră, iar distanța de la aceasta la curba în radiație verde este un indicator al spectrului secundar. Caracterul negativ al curburilor de câmp astigmatice rezultă atât din graficele curbelor de interceptare, cât și din variațiile explicite ale acestor curburi în plan sagital și meridian.

Caracterul acromat al subansamblului optic rezultă atât din reprezentarea curbelor de sferocromatism, cât și din variația cromatică a focarului.

Diagrama spot (fig. 2.3) trasată pentru planul imagine optimizat prin defocusare, pune în evidență în modul cel mai intuitiv și rapid, prezența comei ca aberație reziduală semnificativă, cu valori negative tot mai ridicate odată cu creșterea înălțimii de incidență, precum și prezența spectrului secundar de valoare maximă pe axă.

În urma abordării ondulatorii a analizei sistemului rezultă forma frontului de undă emergent și parametrii numerici determinați prin prelucrarea statistică a diferenței optice de drum (OPD) pe trei deschideri ale câmpului obiect, corespunzător razei pupilare principale pe axă, la 0.7, respectiv la întreg câmpul unghiular obiect (fig. 2.4).

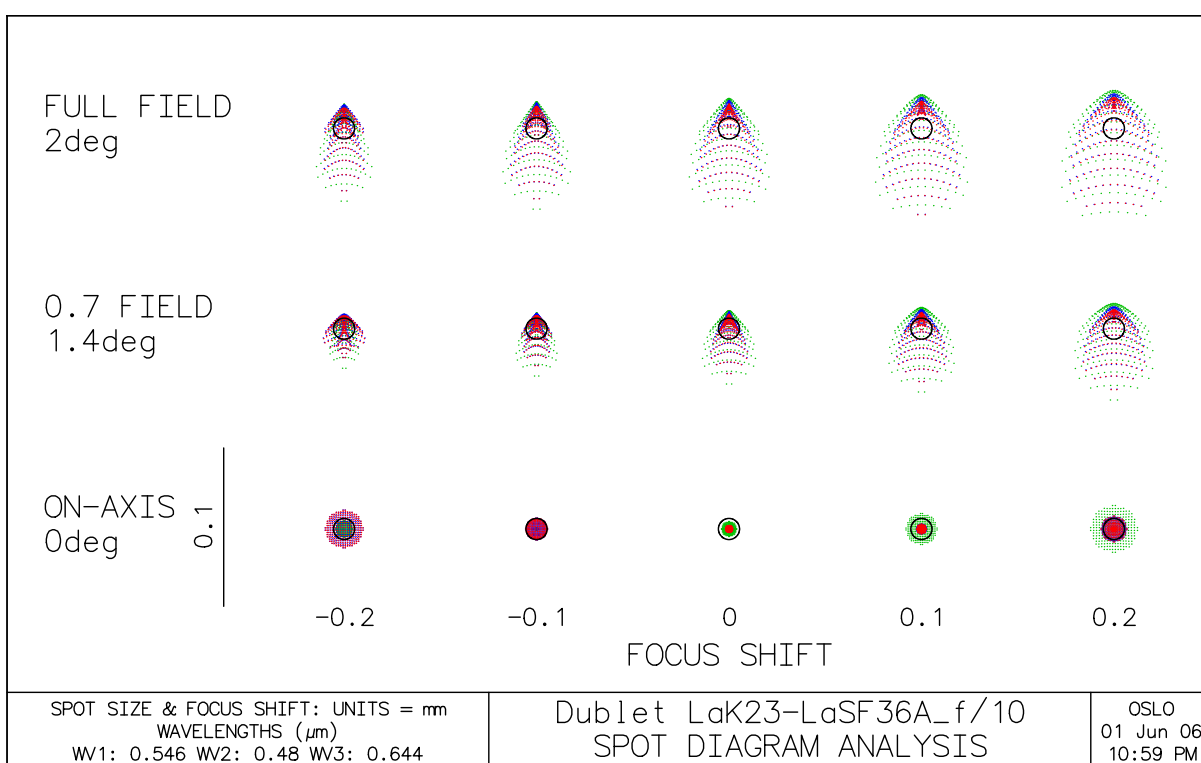


Fig. 2.3. Diagrama spot cu evidențierea cercului Airy

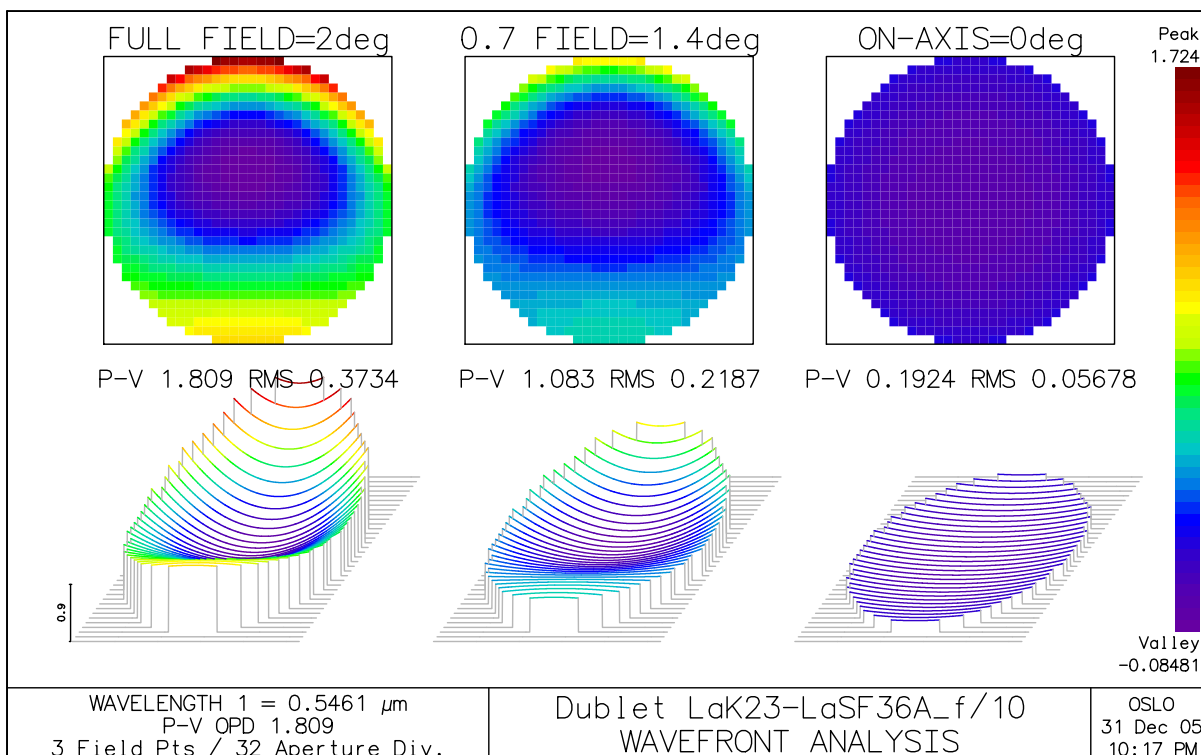


Fig. 2.4. Rezultatele grafice și numerice ale analizei frontului de undă emergent

Scara cromatică asociată atât reprezentării plane, cât și celei spațiale sugerează în mod intuitiv cotele punctelor de pe frontul de undă emergent. În reprezentarea spațială, forma necirculară, alungită și diferența de nivel reiterează prezența și evoluția comei și astigmatismului.

Din punct de vedere al transferului iluminării din planul obiect în planul imagine, sistemul are caracteristici superioare, așa cum rezultă din reprezentarea funcției imagine a punctului (PSF) din figura 2.5. Valoarea ridicată a acestuia denotă caracterul limitat la difracție al subansamblului. Pentru sistemele de foarte bună calitate, valoarea PSF este practic egală cu raportul Strehl (fig. 2.1).

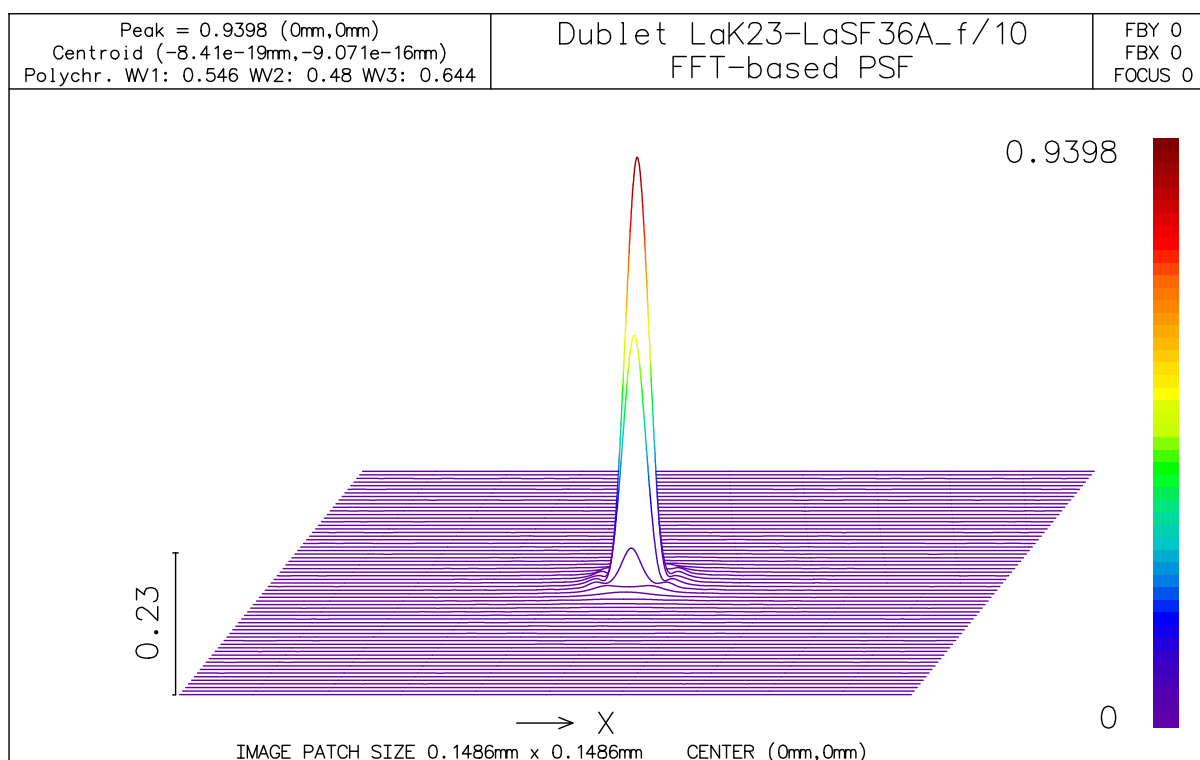


Fig. 2.5. Funcția imagine a punctului

Funcția optică de transfer (fig. 2.6), prin componentele sale reală (MTF – funcția optică de transfer de modulație) și imagină (PTF – funcția optică de transfer de fază) confirmă caracterul calitativ superior al sistemului, așa cum a demonstrat analiza parametrilor descriși anterior, dar oferă și unele informații specifice. MTF este o măsură directă a rezoluției sistemului, mărime măsurată în perechi de linii pe milimetru și indicată pe

abscisă. De asemenea, aria determinată de curba MTF, axele de coordonate și frecvența spațială de interes (sau de tăiere) este direct proporțională cu iluminarea globală a imaginii. Rezultă ca alura curbei (concavă, convexă, cu puncte de inflexiune) necesită un studiu atent, ca fiind singurul element care furnizează o astfel de informație.

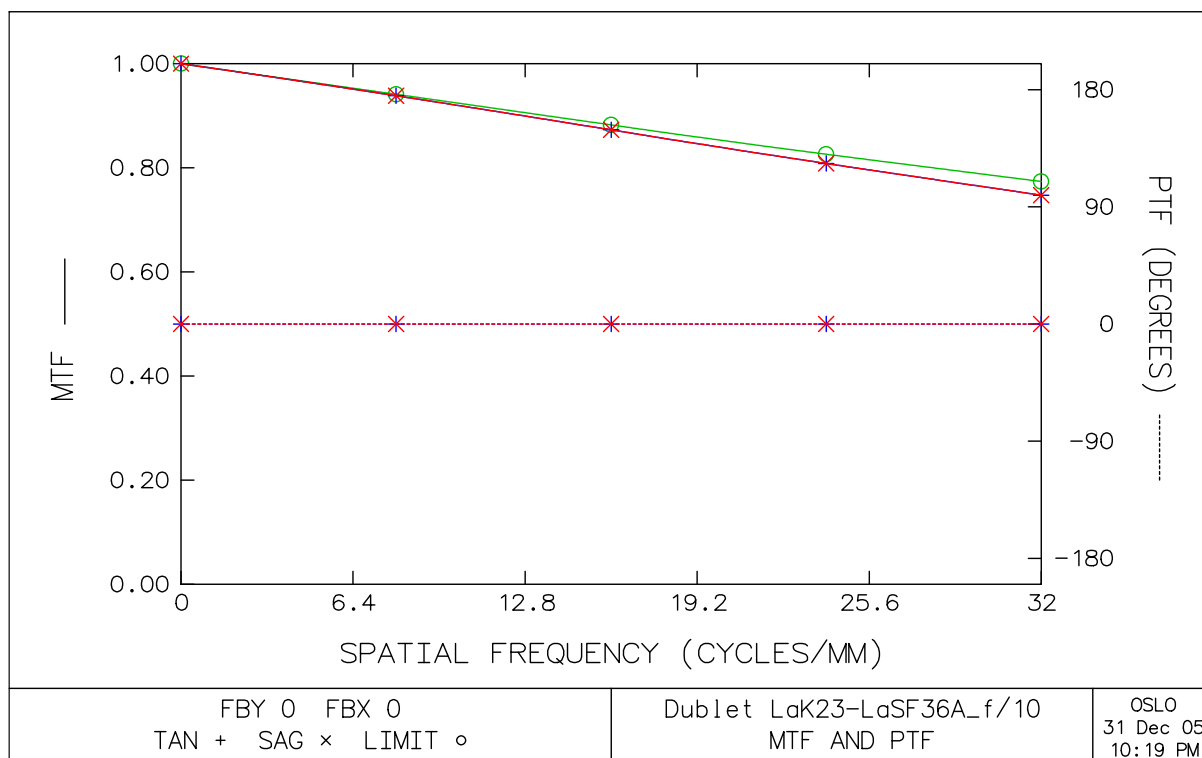


Fig. 2.6. Funcția optică de transfer de modulație și de fază

PTF este un parametru mai explicit pentru distorsiuni de mărimi deosebite, care pot induce inversiuni de fază, respectiv de iluminare.

Atât MTF, cât și PTF pot fi studiate separat în plan meridian și sagital și pot fi raportate la curbele ideale (dreapta verde pentru MTF și orizontala la ordonata nulă pentru PTF).

Determinarea tuturor parametrilor de evaluare a imaginii ilustrați anterior necesită trasarea unui număr mare de raze, apelează un aparat matematic complex care vizează geometria analitică și diferențială, calculul statistic pe șiruri cu un număr mare de elemente și matematica Fourier, astfel încât, în prezent, analiza calității imaginii necesită calculul automat, asigurat de softuri specializate.

2.2. TOLERANȚELE PARAMETRILOR DE CALITATE A IMAGINII

Calculul de proiectare al unui sistem optic, respectiv calculul de gabarit și sinteza subansamblurilor componente are la bază o serie de date de intrare, care vizează grosimentul, mărirea liniară sau unghiulară, abscisele conjugate, mărirea câmpurilor obiect și imagine, iluminarea în planul imagine și, eventual, vignetarea permisă.

Calculul de gabarit operează cu relațiile din dioptrica de ordinul I, iar sinteza componentelor are la bază sumele-G din teoria aberațiilor primare (dezvoltată din dioptrica de ordinul III), [S6]. Trecerea la componente reale, cu grosimi finite, conduce la abateri de la valorile gaussiene ale caracteristicilor de referință ale sistemului. Se pune problema stabilirii unor toleranțe admisibile pentru aceste caracteristici.

În tabelul 2.2, [M1], sunt prezentate sintetic abaterile maxime admise de producătorii de aparate optice pentru cele mai importante mărimi caracteristice unui sistem optic. Tabelul, în ultimele două coloane, indică importanța și mijlocul de măsurare pentru fiecare parametru.

Tabelul 2.2

| Parametrul | Toleranța | Importanța | Mijloc de măsurare |
|-------------------------------|---|--|--------------------|
| Distanța focală, f' | 1...2% | Poziția focarului, respectiv a imaginii | Banc optic |
| Numărul de deschidere, f'/D | $<\pm 5\%$ | Iluminarea în planul imagine | Geometric |
| Unghiul de câmp, ω | $<\pm 2\%$ | Extinderea imaginii | Banc optic |
| Mărirea liniară, β | $<\pm 2\%$ | Poziția planelor conjugate | Banc optic |
| Frontifocala imagine, s'_F | $\pm 5\%$ | Poziția imaginii | Banc optic |
| Transmitanță, τ | $>0.98^n$, unde n este numărul de componente | Energia totală la ieșirea din sistem | Spectrofotometru |
| Vigneta | $<20\%$ la marginea câmpului | Uniformitatea iluminării în planul imagine | Spectrofotometru |

Datele din tabelul 2.2 au un caracter general, informativ, în sensul

că, funcție de aplicație, importanța relativă a parametrilor diferă. Astfel, în diverse cazuri, unele mărimi mai semnificative vor fi tolerate mai strâns, în timp ce altele pot avea valori într-un domeniu mai permisiv. Pentru un aparat de proiecție, de exemplu, distanța focală foarte exactă este mai puțin importantă decât iluminarea uniformă și de o anumită valoare în planul imagine. În acest caz, se impune tolerarea strânsă a iluminării și aperturii numerice, precum și vignetarea nulă. Pentru o cameră foto, la care poziția planului imagine este fix, va fi importantă puterea și poziția planelor conjugate etc.

Obținerea caracteristicilor de referință și de calitate a imaginii este condiționată de calitatea materialelor utilizate și de precizia execuției și montajului sistemului optomecanic.

În tabelul 2.3, [M1], sunt prezentate, cu caracter informativ, toleranțele admise pentru diverși parametri geometrici și de material, detaliați pe trei clase de calitate a sistemelor optice: comerciale, precise și limitate la difracție.

Tabelul 2.3

| Parametru | Toleranțe pentru sistem optic comercial | Toleranțe pentru sistem optic precis | Toleranțe pentru sistem optic limitat la difracție |
|--|---|--------------------------------------|--|
| RMS OPD | 0.25λ | 0.1λ | <0.07λ |
| OPD | 2λ | 0.5λ | <0.25λ |
| Grosime pe axă | 0.1mm | 0.01mm | 0.001mm |
| Raze | 1% | 0.1% | 0.01% |
| Indice de refracție de referință | 0.001 | 0.0001 | 0.00001 |
| Nr. Abbe | 1% | 0.1% | 0.01% |
| Omogenitate | 0.0001 | 0.00001 | 0.000002 |
| Descentrare | 0.1mm | 0.01mm | 0.001mm |
| Înclinare | 1min | 10sec | 1sec |
| Abatere de la sfericitate | 2 inele | 1 inel | 0.25 inele |
| Abateri locale de formă (neregularități) | 1inel | 0.25inele | <0.1inele |

Datele din tabelul 2.3 trebuie interpretate mai ales în sensul observației că obținerea unui plus de calitate presupune creșterea prețului de fabricație cu un factor mult mai mare decât al îmbunătățirii performanțelor sistemului.

În plus, trebuie avut în vedere faptul că influența erorilor unei caracteristici geometrice sau de montaj nu este aceeași pentru orice sistem. De exemplu, aceleași abateri ale razelor $r_1, r_2 \dots r_k$ într-un sistem format din k dioptri, vor avea ponderi diferite la stabilirea RMS OPD sau MTF a sistemului.

2.3. INFLUENȚA ERORILOR DE EXECUȚIE SI MONTAJ A COMPONENTELOR OPTICE ȘI MECANICE ASUPRA CALITĂȚII IMAGINII

Erorile care pot afecta sistemele optice se pot clasifica în două mari categorii:

- erori de execuție
- erori de montaj.

Erorile de execuție sunt determinate de parametrii caracteristici prelucrărilor mecanice: vibrații, uzarea mașinii sau sculei, dereglări în sistemul mașină-sculă-piesă etc. Aceste erori de prelucrare pot avea ca efect valori diferite ale razelor în raport cu cele nominale, abateri de la formele nominale sferică, plană sau asferică (globale sau locale). În aceeași categorie se includ erorile introduse de abaterea de la poziția relativă nominală a suprafețelor lentilelor lipite într-un subansamblu. În acest sens pot apărea descentrări ale dioptrilor cauzate de înclinări unghiulare sau deplasări liniare ale vârfului suprafeței în raport cu oricare dintre cele trei axe de referință.

Erorile de execuție sunt diverse și au efecte specifice asupra calității imaginii.

Tabelul 2.4 propune o clasificare a erorilor de execuție și prezintă efectele posibile ale acestora. Figurile 2.7...2.10 schițează profilul sau poziția reală a elementelor de geometrie a lentilelor în raport cu cele

nominale, [G4], [G16].

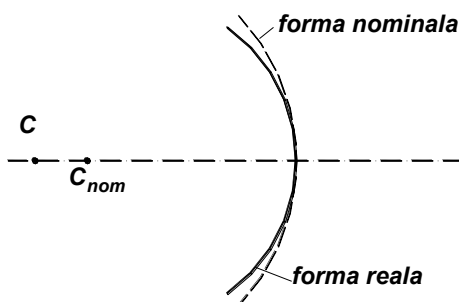


Fig.2.7. Abatere de la forma nominală sferică

Tabelul 2.4

| Descriere | Schiță | Efecte |
|--|------------|---|
| 1. Abatere de la forma nominală sferică sau asferică a. abatere locală b. abatere globală (rază diferită sau alt tip de suprafață generată de o conică sau o curbă oarecare) | b.fig.2.7 | a.- distorsiune locală a imaginii - neuniformitate locală a iluminării - scădere locală a contrastului și rezoluției b.- modificare a puterii optice - defocusare - aberații geometrice transversale |
| 2. Abatere de la forma nominală plană a.neregularități locale b.abatere globală (altă formă) | b. fig.2.8 | a.- distorsiune locală a imaginii - neuniformitate locală a iluminării b.- modificarea puterii optice - defocusare - aberații geometrice transversale |
| 3. Descentrarea suprafețelor sferice în plan meridian sau sagital (cu intersecția axelor) | fig.2.9 | - efect de prismă (deplasarea imaginilor de-a lungul axelor y sau x) - aberații geometrice axiale și transversale - scăderea rezoluției și contrastului |
| 4. Descentrarea suprafețelor sferice în plan meridian sau sagital (cu axe paralele) | fig.2.10 | - efect de prismă cu aberații geometrice pronunțate |

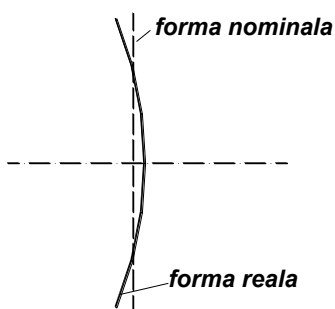


Fig.2.8. Abatere globală de la forma nominală plană

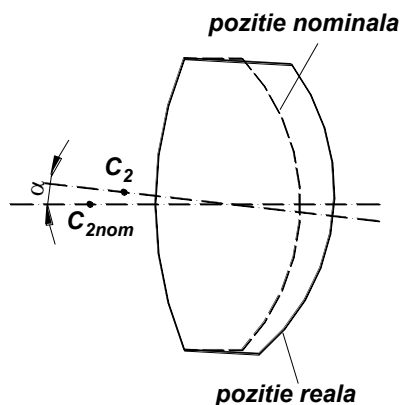


Fig.2.9. Descentrarea suprafețelor în plan meridian sau sagital (axe intersectate)

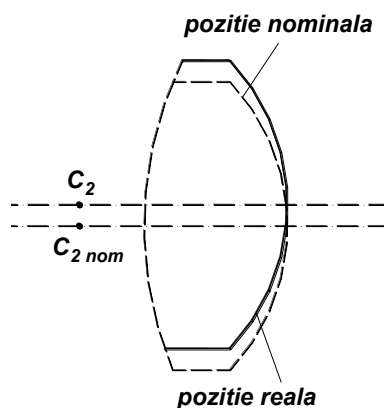


Fig.2.10. Descentrarea suprafețelor în plan meridian sau sagital (axe paralele)

Erorile de execuție afectează în special puterea sistemului optic. Păstrarea calității imaginii la nivelul determinat în faza de proiectare impune prescrierea toleranțelor pentru raze în intervalul $(\pm 0.5 \dots \pm 1)\%$ și pentru grosimi în domeniul $\pm 1\%$, la o abatere mai mică de $\pm 1\%$ pentru distanța focală, [G16].

Erorile de prelucrare pot fi observate și măsurate la operația de verificare a reperelor optice, după execuția propriu-zisă. Piesele care nu se înscriu în limitele admise sunt eliminate.

Erorile de montaj sunt mai puțin controlabile și mai greu de măsurat în mod direct. Ele apar din cauza jocurilor care se prescriu la montajul componentelor optice în tubul mecanic. Ajustajul cu joc prescris pentru

ansamblul montură-componentă optică poate permite fie descentrarea sistemului optic prin deplasare liniară față de axa geometrică a alezajului, fie prin rotirea întregului sistem sau a unor componente ale acestuia în spațiul cilindric permis de ajustaj. Practic, partea optică se împănăază în montură într-o poziție înclinată cu un unghi care depinde de mărimea efectivă a jocului.

Erorile de montaj afectează într-o măsură mai mare calitatea imaginii, comparativ cu cele de execuție.

Erorile de montaj nu pot fi decelate individual ci pot fi apreciate ca prezente prin verificarea experimentală, prin testare, a fiecărui produs finit care include un sistem optic.

Tabelul 2.5, [G4], [G16], prezintă o sinteză a acestui tip de erori, ilustrate în figurile 2.11...2.15.

Tabelul 2.5

| Descriere | Schița | Efect |
|--|---|--|
| 1. Deplasarea axială a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa optică | fig.2.11 | - deplasarea planului imagine (defocusare dacă poziția receptorului este fixă cu scăderea dramatică a parametrilor difracționali) |
| 2. Deplasare transversală a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa y sau x | fig.2.12 | - aberații geometrice transversale în plan meridian și sagital |
| 3. Înclinarea lentilei a. planele principale sunt rotite în raport cu vârful unui dioptru b. planele principale sunt rotite în raport cu punctul principal obiect c. planele principale sunt rotite în raport cu un punct de pe axa optică d. planele principale sunt rotite în raport cu un punct oarecare din spațiul obiect sau imagine | poz. a. fig.2.13 poz. b. fig.2.14 poz. c. fig.2.15 | - deplasarea planului imagine - distorsiunea imaginii - aberații geometrice axiale și transversale - parametri difracționali scăzuți (rezoluție, contrast și iluminare globală drastic micșorate) |

Deprecierea calității imaginii datorită erorilor de montaj poate fi minimizată prin prescrierea unor toleranțe corespunzătoare atât pentru

piesele optice, cât și pentru cele mecanice. În primul rând trebuie impuse ajustaje raționale pentru montarea părții optice în locașele din tuburile mecanice.

În acest sens sunt vizate direct abaterile admise pentru alezajul mecanic și gabaritul radial al pieselor optice. Pentru respectarea distanțelor axiale dintre componentele sistemului optic, conform calculului de proiectare, se urmărește controlul dimensiunilor tubului mecanic prin cotarea adecvată a alezajelor pe direcția axei optice.

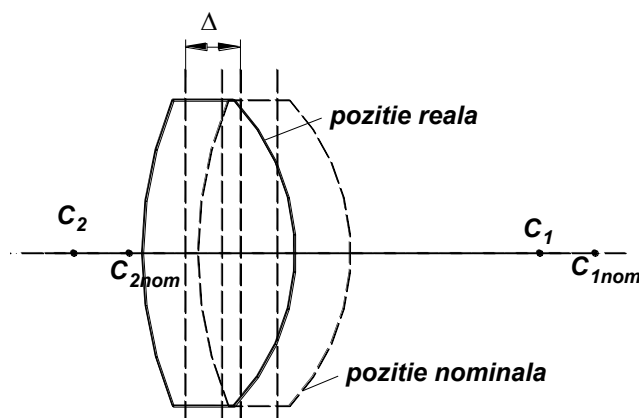


Fig.2.11. Deplasarea axială a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa optică

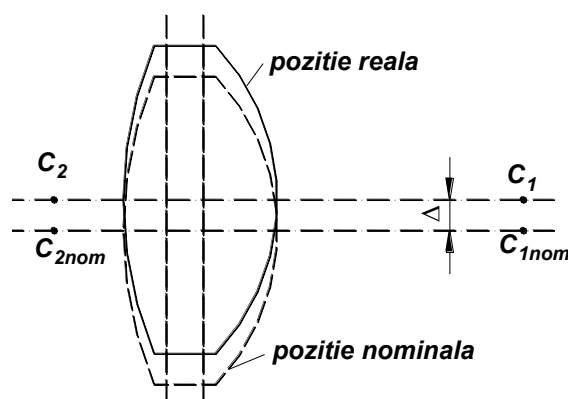


Fig.2.12. Deplasare transversală a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa y sau x

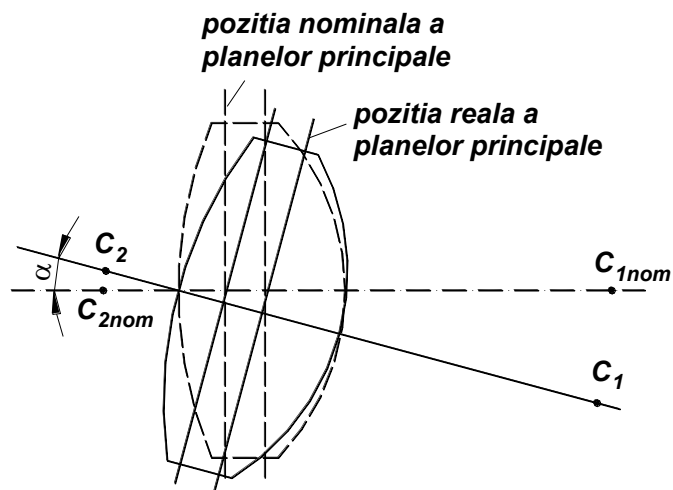


Fig.2.13. Rotirea planelor principale în raport cu vârful dioptrului

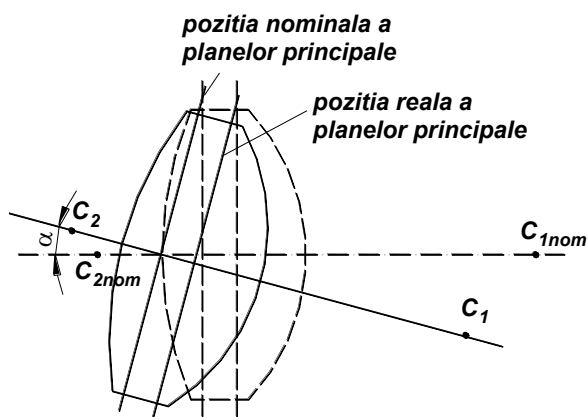


Fig.2.14. Rotirea planelor principale în raport cu punctul principal obiect

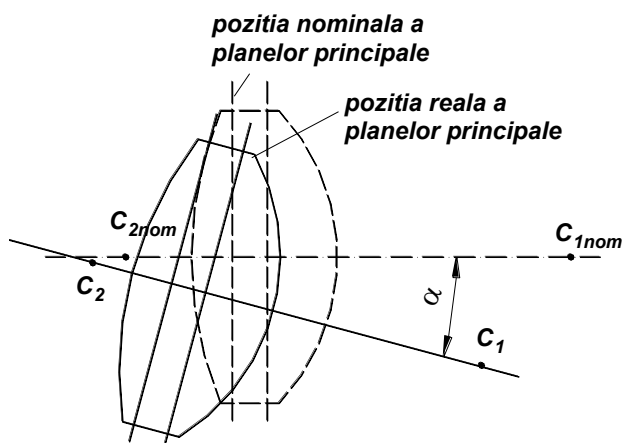


Fig.2.15. Rotirea planelor principale în raport cu un punct oarecare din spațiul obiect sau imagine

Prescrierea toleranțelor privind montajul subansamblurilor

optomecanice trebuie să aibă în vedere următoarele elemente, [G16]:

- montarea subansamblului optic în tubul mecanic se face prescriind un ajustaj cu joc
- tolerarea mai strânsă trebuie prescrisă monturii metalice având în vedere posibilitățile tehnologice și precizia mașinilor de prelucrare a metalelor și sticlei
- centrarea și înclinarea relativă a componentelor lipite ale unui subansamblu se realizează pe standuri special destinate, atașate mașinilor de debordat care prelucrează suprafața exterioară, laterală a subansamblului, a cărei dimensiune radială efectivă rezultă în urma operației de debordare
- prin prescrierea ajustajului subansamblului optomecamic este controlată efectiv numai descentrarea globală a sistemului optic
- jocul efectiv reprezintă dublul descentrării reziduale a sistemului optic (fig. 2.16). Rezultă că cel puțin jocul mediu, cel mai probabil, nu trebuie să depășească dublul descentrării admise

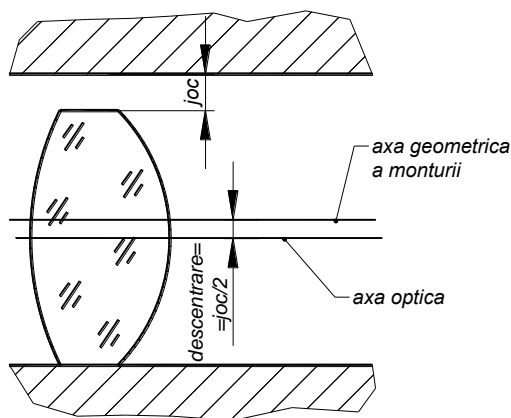


Fig.2.16. Relația dintre jocul montură-piesă optică și descentrarea sistemului optic

- descentrările admise nu variază semnificativ cu apertura sistemului, în timp ce, conform standardelor de toleranțe și ajustaje în vigoare, valoarea jocului minim, respectiv maxim, pentru același tip de ajustaj variază foarte mult funcție de dimensiunea nominală. Rezultă că, cel puțin pe domenii de dimensiuni de gabarit radial al

ansamblului optomecanic, ajustajul trebuie să difere pentru a asigura aceeași descentrare maximă

- pentru asigurarea descentrărilor cât mai mici trebuie prescrise ajustaje cu jocuri mici, cu diferențe cât mai mici între jocul minim și maxim. Ca urmare, se recomandă îmbinarea unei piese mecanice cu câmpuri de toleranță reduse cu piese optice cu câmpuri de toleranță mai largi; în aceste condiții devin recomandabile ajustaje de tipul H/e și H/f
- pentru a pune în evidență importanța poziției și mărimii câmpului de toleranță și, de asemenea, a dimensiunii nominale a îmbinării, se prezintă în tabelul 2.6 un studiu comparativ a cinci tipuri de ajustaje pentru trei dimensiuni nominale. Studiul pe orizontală al tabelului pune în evidență clar creșterea erorii de descentrare a sistemului optic odată cu creșterea aperturii, la același ajustaj prescris; o proiectare corectă a ansamblului optomecanic trebuie să aibă în vedere acest aspect foarte important. Studiul pe verticală al tabelului arată că îmbinarea este mai eficientă prin impunerea unor ajustaje cu jocuri mai mici; acestea rezultă ca diferențe ale unor abateri superioară și inferioară mai mici ale ambelor piese ale îmbinării; dacă pentru montura metalică prelucrarea cu precizie ridicată nu reprezintă o dificultate deosebită, trebuie avut în vedere faptul că partea optică are ca ultimă operație de prelucrare o strunjire, eventual cu caracter de finisare și nu o operație de rectificare, care nu este indicată din punct de vedere funcțional (nu se practică, ci este chiar contraindicată superfinisarea până la transparență a suprafeței laterale).
- în concluzie se poate spune că prescrierea ajustajului este impusă de mărimea descentrării admise, de gabaritul radial nominal al îmbinării și de tehnologia de prelucrare disponibilă

În ceea ce privește efectul înclinării, acesta se manifestă la nivelul componentelor (lentilă singulară, dublet sau triplet lipit) în raport cu montura. La nivelul de componentă sau subansamblu lipit problema

Înclinării este rezolvată odată cu centrarea, prin poziționarea relativă a lentilelor înainte de lipire, cu ajutorul unor dispozitive optice. În mod semnificativ, înclinarea poate fi introdusă de prelucrarea necorespunzătoare a umărului de sprijin axial al monturii (fig.2.17). Înclinarea subansamblului optic poate fi limitată prin tolerarea corespunzătoare a bătăii frontale a suprafeței de sprijin a monturii.

Din figură rezultă că bătaia frontală maximă admisă depinde de înclinarea maximă admisă pentru sistemul optic și de apertura acestuia:

$$B_f = D_u \operatorname{tg} \alpha_{\max} \cdot \quad (2.1)$$

Tabelul 2.6

| Ajustaj | Caracteristici ajustaj | Φ15 | Φ21 | Φ40 |
|--------------|---|-----------|-----------|-----------|
| H8/f9 | abateri alezaj [μm] | +27/0 | +33/0 | +39/0 |
| | abateri arbore [μm] | -32/-75 | -40/-92 | -50/-112 |
| | joc minim/maxim [μm] | 32/102 | 40/125 | 50/151 |
| | joc mediu [μm] | 67 | 82 | 100 |
| | descentrare medie în sistemul optic [μm] | 33 | 41 | 50 |
| H8/f8 | abateri alezaj [μm] | +27/0 | +33/0 | +39/0 |
| | abateri arbore [μm] | -16/-43 | -20/-53 | -25/-64 |
| | joc minim/maxim [μm] | 16/70 | 20/86 | 25/103 |
| | joc mediu [μm] | 43 | 53 | 64 |
| | descentrare medie în sistemul optic [μm] | 21 | 26 | 32 |
| H7/f6 | abateri alezaj [μm] | +18/0 | +21/0 | +25/0 |
| | abateri arbore [μm] | -16/-27 | -20/-33 | -25/-41 |
| | joc minim/maxim [μm] | 16/45 | 20/54 | 25/66 |
| | joc mediu [μm] | 30 | 37 | 45 |
| | descentrare medie în sistemul optic [μm] | 15 | 18 | 22 |
| H6/e7 | abateri alezaj [μm] | +13/0 | +13/0 | +16/0 |
| | abateri arbore [μm] | -40/-61 | -40/-61 | -20/-33 |
| | joc minim/maxim [μm] | 40/74 | 40/74 | 20/49 |
| | joc mediu [μm] | 57 | 57 | 35 |
| | descentrare medie în sistemul optic [μm] | 28 | 28 | 17 |
| H6/f6 | abateri alezaj [μm] | +13/0 | +13/0 | +16/0 |
| | abateri arbore [μm] | -16/-27 | -20/-33 | -25/-41 |
| | joc minim/maxim [μm] | 16/40 | 20/46 | 25/57 |
| | joc mediu [μm] | 28 | 33 | 41 |
| | descentrare medie în sistemul optic [μm] | 14 | 16 | 20 |

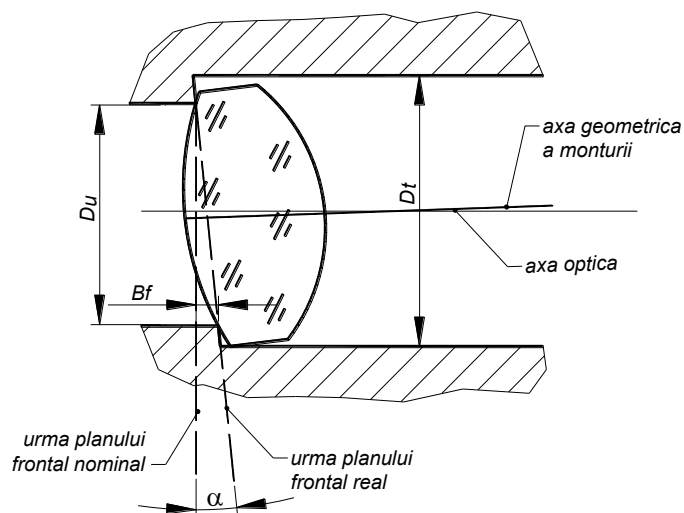


Fig.2.17. Înclinarea componentei optice datorită bătăii frontale a suprafeței de sprijin axial al monturii

Ca ordin de mărime, respectând abaterile maxime admise pentru înclinare, rezultă că bătaia frontală maximă a suprafeței de așezare a lentilei trebuie să fie mai mică decât o sutime de milimetru, [G16].

2.4. CLASE DE CALITATE A SISTEMELOR OPTICE

La nivel internațional, se acceptă clasificarea sistemelor optice, după criteriul calității, în patru categorii, [M1]:

- sisteme optice ideale
- sisteme optice limitate la difracție
- sisteme optice precise
- sisteme optice comerciale

Principalul criteriu de apreciere a calității imaginii sistemelor optice are la bază diferența optică de drum și poartă numele Rayleigh, care a enunțat criteriul (numit și $\lambda/4$).

Conform criteriului Rayleigh, un sistem optic poate fi considerat lipsit de aberații geometrice și cromatice, astfel încât defectele de imagine sunt rezultatul efectelor de difracție introduse de mărimea finită a aperturilor, [S6].

Tabelul 2.7

| OPD | RMS OPD | Raport Strehl | ds' | k_T | z_T, z_s | Calitatea sistemului |
|--------------------------|-----------------|---------------|--|--|---|----------------------|
| 0.0 | 0.0 | 1.00 | | | | ideal |
| $\lambda/16$ RL=0.25 | 0.018 λ | 0.99 | | | | |
| $\lambda/8$ RL=0.5 | 0.036 λ | 0.95 | | | | |
| $\lambda/4$ RL=1.0 | 0.07 λ | 0.80 | $ds'_{Mmax} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$ | $k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'}$ | $\delta = \pm 2\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$ | limitat la difracție |
| $\lambda/2$ RL=2.0 | 0.14 λ | 0.40 | | | | precis |
| 0.75 λ RL=3.0 | 0.21 λ | 0.10 | | | | comercial |
| λ RL=4.0 | 0.29 λ | 0.00 | | | | |

Efectiv, criteriul consideră aberațiile neglijabile pentru o valoare a OPD mai mică decât un sfert din lungimea de undă. Ca urmare, un sistem limitat la difracție corespunde criteriului Rayleigh RL=1, ceea ce este echivalent cu satisfacerea condiției $OPD = \lambda/4$.

Între criteriul Rayleigh și ceilalți parametri de calitate a imaginii există echivalențe, care pot fi urmărite în tabelul 2.7, [S6].

2.5. CONCLUZII SI CONTRIBUTII ORIGINALE

În capitolul 2 al tezei s-a prezentat o sinteză cu un grad ridicat de condensare a informației relativ la parametrii de calitate a sistemelor optice. Prezentarea s-a realizat în formula unei analize critice a semnificației, interdependențelor și echivalenței dintre criteriile de evaluare a sistemelor optice.

Au fost comentate cu ajutorul unui exemplu ilustrativ modalitățile de prezentare și interpretarea de sine stătătoare și în conexiune a unor parametri, printre care: aberația sferică, coma, curburile astigmatice de câmp, distorsiunea, aberația cromatică axială și laterală, curbele de interceptare a razelor, diferența optică de drum, diagrama spot, funcția imagine a punctului, componentele reală și imaginară a funcției optice de

transfer.

S-au făcut referiri la toleranțele admise atât la valorile parametrilor gaussiani, cât și ale criteriilor de calitate a imaginii.

Au fost descriși factori de influență a calității imaginii, vizând erorile de execuție și montaj ai reperelor optice și mecanice, la care s-au conectat comentarii privind abaterile maxime admise, astfel încât calitatea nominală, previzionată în faza de proiect să se regăsească în ansamblul executat și montat.

În final s-a discutat modul de apreciere globală a sistemelor optice, conform clasificării acceptate la nivel mondial și având la bază criteriul Rayleigh.

Analiza materialului expus în prezentul capitol conduce la concluzia că evaluarea calității unui sistem optic reprezintă un demers elaborat, având în vedere complexitatea conceptului de calitate a imaginii și paleta largă de parametri înrudiți sau cu fundamente teoretice separate, care trebuie determinați, interpretați și corelați.

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot menționa:

- sinteza cu un grad ridicat de condensare a informației dintr-un material extrem de vast, eterogen ca metodă de abordare, de largă acoperire bibliografică, vizând școlile de inginerie optică la nivel mondial, privitor la metodele moderne de apreciere a calității sistemelor optice
- asocierea unor elemente vizând execuția și montajul sistemelor optomecanice, în vederea stabilirii influenței acestora asupra calității imaginii

BIBLIOGRAFIE:

[C2], [C3], [C5], [D1], [D2], [G1], [G2], [G4], [G5], [G9], [G11], [G13], [G16], [H2], [K1], [M1], [M3], [M4], [N1], [N2], [N5], [N6], [O1], [O2], [P1], [P6], [S1], [S3], [S4], [S6], [S7], [S9], [S10], [S12], [S13], [W1], [W2], [W5], [W8], [W10], [W13], [W14]

3. PARTICULARITĂȚI ALE STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A PIESELOR DIN STICLĂ OPTICĂ

3.1. MATERIALE OPTICE

3.1.1. Proprietățile optice ale structurilor materiale în interacțiune cu radiația electromagnetică

Lumina sau radiația electromagnetică, în general, incidentă pe suprafața unei structuri materiale interacționează cu aceasta. Principalele fenomene optice prin care se manifestă această interacțiune sunt transmisia, reflexia și absorbția. Măsura în care aceste fenomene se manifestă depinde de natura materialului și are determinare spectrală în ceea ce privește radiația.

Radiația electromagnetică este descrisă prin ecuațiile lui Maxwell, într-o formulare care implică mărimi caracteristice câmpurilor electric și magnetic, definite prin legile lui Faraday, Gauss și Ampere și care demonstrează faptul că, într-un mediu omogen și izotrop, lumina este o undă transversală, caracterizată printr-un vector electric și unul magnetic, cu interacțiune permanentă reciprocă. Vectorii intensitate electrică \vec{E} și intensitate magnetică \vec{H} oscilează în plane perpendiculare între ele și perpendiculare pe direcția de propagare a undei \vec{u} , astfel încât vectorii \vec{E} , \vec{H} și \vec{u} formează un triedru drept.

Proprietățile optice ale radiației electromagnetice, respectiv

procesele care se manifestă la interacțiunea radiație-materie sau radiație-radiație (transmisie, reflexie, absorbție, difuzie, interferență, difracție, polarizare) sunt determinate de caracteristicile vectorului intensitate electrică și frecvența de oscilație.

O undă electromagnetică plană, monocromatică, propagată printr-un mediu omogen și izotrop, este descrisă prin ecuația, [S8]:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}, \quad (3.1)$$

unde \vec{E} reprezintă vectorul intensitate electrică a câmpului electric asociat undei,

\vec{E}_0 - vectorul amplitudine al intensității electrice în vid

\vec{k} - numărul de undă (mărime vectorială care are direcția și sensul direcției de propagare a undei și modulul: $k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi\nu}{v}$, cu ω - pulsația undei, v - viteza de propagare, ν - frecvența)

\vec{r} - vectorul de poziție spațială a undei

t - timpul.

O ecuație formal identică relației (3.1) poate fi scrisă și pentru vectorul oscilant intensitate magnetică, pentru a caracteriza câmpul magnetic asociat undei.

Aplicând ecuațiile lui Maxwell, câmpul electric asociat unei unde electromagnetice care se propagă într-un mediu liniar, omogen și izotrop, verifică ecuația:

$$\Delta \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right), \quad (3.2)$$

unde μ este permeabilitatea magnetică a mediului ($\mu = \mu_0 \mu_r$, μ_0 = permeabilitatea magnetică a vidului, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, μ_r = permeabilitatea relativă a mediului), σ - conductivitatea mediului ($\sigma = 0$ pentru dielectrici), ε - permitivitatea electrică a mediului ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, ε_0 = permitivitatea electrică a vidului, $\varepsilon_0 = 8.854187187 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Condiția (3.2) pentru expresii ale vectorului intensitate electrică a

câmpului de forma (3.1) conduce la soluții de forma:

$$k_o \tilde{n}^2(\vec{k}E) = 0, \quad (3.3)$$

unde: $\tilde{n}^2 = c^2 \left[\mu(\varepsilon + i\sigma\omega^{-1}) \right] = (n + i\chi)^2 = \tilde{\varepsilon}_t = \varepsilon' + i\varepsilon''$.

Mărimea cu simbolul \tilde{n} reprezintă indicele de refracție complex, a cărei parte reală n este indicele de refracție real. În partea imaginară a expresiei indicelui de refracție complex, mărimea χ se numește coeficient de amortizare sau atenuare.

Vectorul de undă în vid k_o are forma:

$$k_o = \frac{\omega}{c}, \text{ unde } c \text{ este viteza luminii în vid:} \quad (3.4)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \mu_o}} = 299792458 \text{ m/s.} \quad (3.5)$$

Simbolurile ε' și ε'' constituie partea reală, respectiv imaginară a permeabilității electrice totale a mediului $\tilde{\varepsilon}_t$ și conform relației (3.3), aceste mărimi se pot exprima funcție de indicele de refracție real și coeficientul de amortizare sub forma:

$$\varepsilon' = n^2 - \chi^2, \quad (3.6)$$

$$\varepsilon'' = 2n\chi. \quad (3.7)$$

Într-un mediu diferit de vid, indicele de refracție și coeficientul de amortizare se definesc funcție de permeabilitatea electrică, după următoarele legi:

$$n = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + \varepsilon' \right]}, \quad (3.8)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} - \varepsilon' \right]}. \quad (3.9)$$

Viteza luminii în mediul cu indice de refracție real n este:

$$v = \frac{c}{n}. \quad (3.10)$$

Ca o concluzie se poate afirma că viteza de propagare și valorile mărimilor caracteristice ale câmpului electric purtat de radiația

electromagnetică depind și sunt influențate de proprietățile mediului în care are loc propagarea.

Reciproc, proprietățile optice ale mediilor pe care este incidentă radiația electromagnetică vor reprezenta efecte ale interacțiunii câmpurilor electrice proprii cu câmpul electric oscilant asociat radiației.

Având în vedere faptul că în construcția aparatelor optice formarea imaginilor se bazează pe refracție sau reflexie, se urmărește utilizarea unor materiale cu transparență (sau transmitanță), respectiv reflectanță cât mai ridicate. Din punct de vedere energetic (fotometric sau radiometric) pierderile prin absorbție trebuie să fie cât mai mici.

La nivel de structură atomică a substanței, caracterul de transparent, opac sau reflectant este determinat de măsura în care radiația electromagnetică incidentă stimulează trei procese fizice de bază: tranziții electronice în banda de valență, vibrații ale rețelei cristaline și efecte ale purtătorilor liberi, [T2]. Procesul dominant depinde de natura materialului și de caracteristica spectrală a radiației. Absorbția este, în principal, determinată de tranzițiile electronice. Saltul electronului de valență pe nivelul energetic superior are loc prin absorbția unei cuante de energie luminoasă, care corespunde unei anumite frecvențe spectrale. Cantitatea de energie absorbită de substanță este proporțională cu concentrația speciei atomice sensibile la frecvența respectivă, astfel încât radianța spectrală în fasciculul emergent va fi mai mică decât în cel incident, ceea ce din punct de vedere optic definește o scădere a transmitanței spectrale. Totuși, transparența (în special a semiconductorilor în infraroșu) este afectată și de absorbția datorată vibrațiilor la nivelul rețelei cristaline (frecvențele din domeniul infraroșu stimulează tranziții de vibrație ale moleculelor, scăzând radianța spectrală emergentă, respectiv transmitanța). Efectul purtătorilor liberi este important pentru semiconductori și metale ale căror proprietăți optice privind transmisia și absorbția depind mai ales de acest efect.

La un nivel mai profund de subtilitate, transparența unui material

optic este influențată și de prezența impurităților care induc efecte locale de absorbție, ca și procesele multifoton care cauzează pierderi energetice radiante în cazul metalelor expuse unor fascicule în domeniul infraroșu.

Transparența – cu precădere în domeniul vizibil - ca proprietate de primă importanță pentru funcționarea lentilelor, prismelor, reticulelor etc. impune alegerea unor materiale dielectrice pentru execuția pieselor. Semiconductoarele pot fi utilizate ca medii refractante numai în domeniul infraroșu.

Transparența este strict legată de poziția benzii interzise pe o scară a energiei (fig.3.1), [H3].

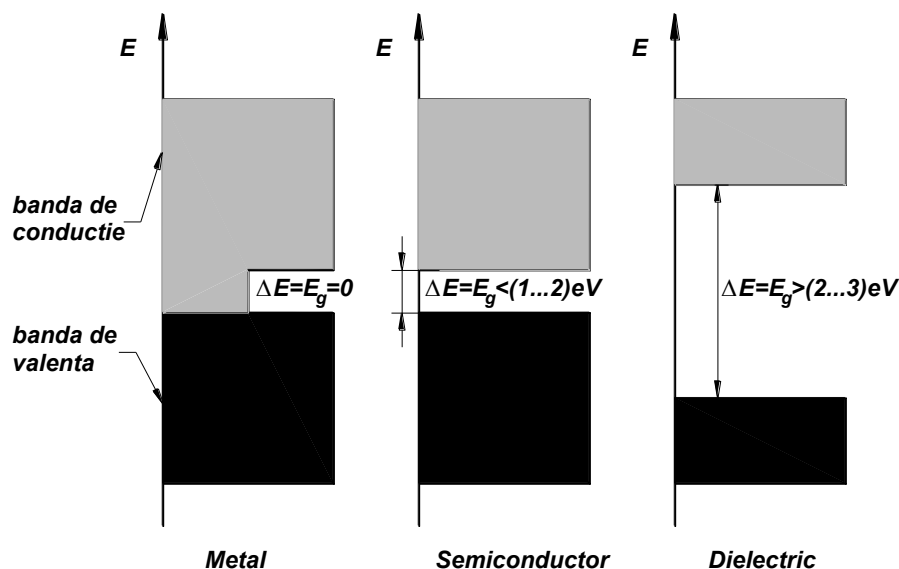


Fig.3.1. Poziția și mărimea benzii interzise la metale, semiconductoare și dielectrice (izolatoare)

Radiația nu este absorbită de material în măsura în care frecvența sa îi asigură o energie care se încadrează în banda interzisă a materialului, astfel încât absorbția la nivel electronic, de vibrație sau prin efect al purtătorilor liberi să nu aibă loc, iar radianța spectrală să se conserve într-o mare măsură.

Pentru frecvențe mai mici decât cele care determină energii din banda interzisă, materialul este - total sau parțial, integral sau selectiv din punct de vedere spectral - absorbant, funcție de caracteristicile concrete

ale atomilor și rețelei de dispunere a acestora. La frecvențe corespunzătoare benzii de conducție, materialele dielectrice sunt preponderent reflectante.

Metalele, în domeniul optic (UV-VIS-IR) sunt opace și pot prezenta reflectanță spectrală selectivă în anumite condiții de finisare a suprafeței de incidență. La metale, benzile de valență și conducție sunt alăturate sau parțial suprapuse, neexistând banda interzisă. Aceasta are o extindere relativ îngustă la materialele semiconductoare, care pot fi transparente pe domenii relativ restrânse.

Ca materiale optice transparente, pentru construcția componentelor bazate pe refracție se utilizează, deci, dielectricii și semiconductoarele (pentru zona IR), iar ca materiale reflectante – metalele.

Având în vedere popularea statistic-probabilistică a nivelurilor energetice ale structurilor materiale, prezența aleatoare ca natură și distribuție a unor impurități, precum și o directă determinare spectrală, rezultă că materialele optice nu vor avea niciodată coeficienți radiometrici ideal unitari, ci valori medii mai mult sau mai puțin apropiate de cele ideale, funcție de structura concretă a materialului, de compoziția spectrală și intensitatea radiației cu care interacționează.

3.1.2. Materiale optice

Materialele utilizate ca medii optice se pot încadra în trei mari categorii: sticle minerale amorfe, mono sau policristale și sticle organice.

Sticlele optice minerale amorfe sunt utilizate datorită transmitanței ridicate în VIS, omogenității, turnării ușoare și prelucrării la costuri relativ reduse, precum și potențialei disponibilități la orice indice de refracție într-o gamă dată. Tehnologia de obținere a semifabricatului sub forma unui bloc, presupune realizarea unui amestec omogen, în stare topită, a compoziției specifice sortului de sticlă și răcirea lentă, pentru solidificarea fără cristalizare.

Sticlele amorfe, care nu prezintă nici un fel de simetrie structurală, sunt considerate, teoretic, izotrope. În acest sens, proprietățile

materialului optic depind de viteza de răcire și distribuția vitezei de răcire în masa semifabricatului. Temperaturile neuniforme conduc la variații locale de densitate, care induc tensiuni remanente ca surse de anizotropie.

Indicii de refracție, caracteristicile de dispersie, proprietățile termice și mecanice diferite rezultă prin adăugarea în proporții controlate de oxizi de litiu, bariu, bor, fosfor, plumb etc. unei mase de bază constituite din bioxid de siliciu (SiO_2).

De exemplu, oxidul de bariu (BaO) determină obținerea unor indici de refracție mari și coeficienți de dispersie mici, în timp ce un oxid al borului (B_2O_3) – indice mic și dispersie foarte redusă. Indicii foarte mici și dispersii foarte reduse rezultă prin adaosuri de fluoruri în locul oxizilor. Pentru indici foarte mari la dispersii relativ mici este specific adaosul de pământuri rare, cu precădere lanthanul. Alți oxizi, cum ar fi ai aluminiului și metalelor alcaline contribuie la stabilitatea chimică, rezistența la umezeală a sticlelor, [T2].

Extinderea domeniului spectral în zona ultravioletă a fost posibilă prin introducerea în masa de bază a fluor-fosfaților și fluorurilor. Sticlele fără oxizi cu adaosuri de sulfură de arseniu (As_2S_3) și fluoruri ale metalelor grele cum ar fi florura de zirconiu (ZrF_4) sunt utilizate pentru infraroșul mediu și îndepărtat.

Densitatea sticlelor minerale variază între $(2.4...5.4)\text{g/cm}^3$, funcție de cantitatea și densitatea elementelor de adaos.

Transmitanța sticlei optice are valori ridicate într-o regiune largă a spectrului electromagnetic, ceea ce o recomandă ca material utilizabil pentru domeniile ultraviolet apropiat, vizibil și infraroșu apropiat ($\lambda=350\text{nm}...2.5\mu\text{m}$).

Cristalele mono sau policristaline, naturale sau artificiale pot fi utilizate pe scară largă pentru execuția componentelor optice. Monocristalele rezultă prin creșterea din topitură a unui cristal prin diverse tehnologii. Policristalele se obțin prin sinterizare sau depunere de vapori,

rezultând conglomerate de microcristale (cca. 50 micrometri), având orientări aleatoare și frontiere bine delimitate prin lipsa de continuitate a rețelelor cristaline. Policristalele sunt mai rezistente mecanic, mai dure, dar introduc pierderi prin difuzie mai mari decât monocristalele. Industria cristalelor optice s-a dezvoltat ca urmare a aplicațiilor tot mai numeroase în domeniul UV și, mai ales, IR, în care sticla optică tradițională are transmitanță scăzută sau este absorbantă, funcție de sort, [N5].

Sticla organică este un material optic neconvențional, inclus în construcția aparatelor optice doar în ultimii ani. Avantajele maselor plastice, între care primează densitatea redusă - $(0.7...1.3) \text{ g/cm}^3$ - și tehnologia ieftină de obținere a piesei optice finite (o singură operație de turnare sau matrițare, fără finisare ulterioară), au determinat o extindere rapidă a utilizării sticlelor organice, [T2].

Sticlele organice au indici de refracție mai mici ($n_d=1.4...1.7$) decât sticla minerală și un domeniu spectral de lucru limitat la vizibil (în UV și IR polimerii bazați pe carbon sunt puternic absorbantți).

Un avantaj al sticlelor organice este faptul că pot fi colorate, practic în orice culoare, fie prin depunerea stratului filtrant spectral pe suprafața lentilei, fie prin colorarea în masă.

Rezistența scăzută la acțiunea factorilor mecanici nu mai reprezintă un dezavantaj datorită tratamentelor de durificare superficială care s-au dezvoltat și care aduc proprietățile mecanice ale componentelor din plastic la nivelul celor din sticlă.

Totuși, din punct de vedere optic, cea mai importantă caracteristică este uniformitatea indicelui de refracție în masa materialului. O ierarhizare pe acest criteriu clasează pe primul loc monocristalele, urmate de sticlele amorfe, policristale și apoi sticlele organice.

3.1.3. Proprietățile materialelor optice

3.1.3.1. Proprietățile optice ale materialelor optice

Caracteristicile mediilor optice se raportează la fenomenele de refracție, transmisie, dispersie, reflexie și absorbție a luminii.

a) Refracția unui sort de sticlă optică este definită prin indicele de refracție, n , al sticlei, în raport cu aerul. Întrucât indicele de refracție este variabil cu lungimea de undă λ a radiației luminoase, în cataloagele firmelor producătoare de sticlă optică se precizează valoarea acestuia pentru diferite lungimi de undă. În cataloagele recente, acești indici sunt specificați pentru lungimile de undă ale mai multor linii spectrale ale unor elemente chimice (23 sunt mai frecvent folosite) și pentru 12 lungimi de undă generate de cei mai utilizați laseri. Cataloagele pe suport electronic, permit determinarea indicelui de refracție pentru orice lungime de undă prin indicarea, la fiecare sort de sticlă, a polinomului de interpolare pentru funcția indice de refracție, având ca variabilă independentă lungimea de undă.

Indicele de refracție n_e corespunzător lungimii de undă $\lambda_e=546.07\text{nm}$, din spectrul mercurului este cunoscut ca indice de refracție de referință (principal), întrucât această linie spectrală se află cel mai aproape de radiația având $\lambda = 555 \text{ nm}$, pentru care ochiul uman prezintă sensibilitatea maximă. Linia de referință e a fost impusă în Europa de cel mai mare și prestigios producător de sticlă optică, firma Schott. În Statele Unite se lucrează și cu linia d ca referință spectrală.

Prima determinare analitică a dependenței indicelui de refracție de lungimea de undă a fost realizată de Sellmeier (și independent de Maxwell) și avea în vedere influența absorbției electronice și a vibrațiilor din nodurile rețelei cristaline. Diverse aproximări sau completări aduse formulei inițiale au condus la îmbogățirea literaturii cu mai multe expresii de polinoame de interpolare, după cum urmează, [T2]:

$$\text{Cauchy} \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \quad (3.11)$$

$$\text{Hartmann} \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{c - \lambda} + \frac{d}{e - \lambda} \quad (3.12)$$

$$\text{Conrady} \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda} + \frac{c}{\lambda^{3.5}} \quad (3.13)$$

$$\text{Kettler-Drude} \quad n^2(\lambda) = a + \frac{b}{c - \kappa^2} + \frac{d}{e - \lambda^2} + \dots \quad (3.14)$$

$$\text{Sellmeier} \quad n^2(\lambda) = a + \frac{b\lambda^2}{c - \lambda^2} + \frac{d\lambda^2}{e - \lambda^2} + \frac{f\lambda^2}{g - \lambda^2} + \dots \quad (3.15)$$

$$\text{Herzberger} \quad n(\lambda) = a + b\lambda^2 + \frac{e}{\lambda^2 - 0.035} + \frac{d}{(\lambda^2 - 0.035)^2} \quad (3.16)$$

$$\text{Old Schott} \quad n^2(\lambda) = a + b\lambda^2 + \frac{c}{\lambda^2} + \frac{d}{\lambda^4} + \frac{e}{\lambda^6} + \frac{f}{\lambda^8}. \quad (3.17)$$

Catalogul Schott nou utilizează ecuația Sellmeier (3.15) și precizează valorile numerice ale coeficienților a...g pentru toate sorturile de sticlă din catalog. Relația (3.17) utilizată de firma Schott pentru datele prezentate în cataloagele mai vechi introducea o eroare de ordinul $3 \cdot 10^{-6}$ în vizibil și $5 \cdot 10^{-6}$ în UV și IR. Expresia putea fi corectată prin introducerea unui termen în λ^4 pentru UV și în λ^{-10} pentru IR. Introducerea în fabricație a sorturilor de sticlă noi, cu transmitanță ridicată pe domenii spectrale largi, care se extind mult în afara vizibilului a impus reconsiderarea alegerii polinomului de interpolare în scopul rigurozității determinării indicelui de refracție și pentru utilizarea corectă, la parametrii potențiali ai materialului optic respectiv.

Binoamele de la numitorii din polinoamele de interpolare evidențiază prin constantele specifice liniile de absorbție caracteristice fiecărui sort de sticlă. Formularea Cauchy și Old Schott plasează benzile de absorbție la lungimi de undă nule, neglijând de fapt efectele de absorbție.

Formula Herzberger aproximează corect până la aproximativ $1 \mu\text{m}$ și în ultimele sale lucrări a înlocuit linia 0.035 cu 0.026.

Apariția sticlelor minerale performante, cu acoperire spectrală largă a impus una dintre interpolările Sellmeier (rel.3.15).

b) Dispersia luminii reprezintă fenomenul de dependență a indicelui de refracție al sticlei optice de lungimea de undă a radiației luminoase și matematic se exprimă prin raportul $dn/d\lambda$.

Reprezentarea grafică a dependenței $n=n(\lambda)$ definește curba de

dispersie a mediului optic respectiv.

Dispersia materialelor optice în domeniul vizibil este monoton descrescătoare (dispersie normală) dar neliniară de la albastru spre roșu și nu poate fi caracterizată printr-un singur parametru. În afara vizibilului dispersia este anormală, curba prezentând extreme locale, corespunzătoare absorbției unor linii sau benzi spectrale.

Caracterul neliniar al dispersiei face imposibilă descrierea proprietăților dispersive ale materialului printr-un singur parametru numeric.

Se definește următorul set de parametri dispersivi:

- dispersia principală (medie):

$$\Delta n \cong dn = n_{F'} - n_{C'} = (6...70) \cdot 10^{-3}, \quad (3.18)$$

unde F' și C' simbolizează liniile albastră, respectiv roșie, care delimitează partea cea mai mare a energiei din spectrul vizibil.

- dispersii parțiale:

$$\Delta n_{\lambda_{1,2}} = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}, \quad (3.19)$$

cum sunt $n_{G'}-n_g$, $n_{D'}-n_d$, n_g-n_h , $n_{F'}-n_g$, $n_e-n_{F'}$, $n_{C'}-n_e$, $n_{A'}-n_{C'}$ etc;

- refringenta optică:

$$n_e - 1 \text{ sau } n_d - 1, \quad (3.20)$$

- coeficienții de dispersie Abbe:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}} \text{ sau } v_d = \frac{n_d - 1}{n_{F'} - n_{C'}}. \quad (3.21)$$

Numărul Abbe se înscrie în intervalul $v_e=(16.5...105)$, majoritatea valorilor încadrându-se în domeniul (40...70). Valori mult mai mari ale coeficientului Abbe pot avea unele cristale destinate utilizării în IR ($v=200...300$).

- dispersia parțială relativă:

$$\frac{\Delta n_{\lambda_{1,2}}}{n_{F'} - n_{C'}} \quad (3.22)$$

care este definită în cataloage pentru mai multe zone spectrale.

Dispersiile parțiale relative $\theta_{g,F}$ și $\theta_{C,s}$

$$\theta_{g,F} = \frac{n_g - n_{F'}}{n_g - n_{C'}}, \quad \theta_{C,s} = \frac{n_C - n_s}{n_g - n_s} \quad (3.23)$$

sunt de interes la corectarea aberațiilor cromatice în spectrele secundare.

-dispersia specifică:

$$-n_H - n_C \quad (3.24)$$

-puterea dispersivă, reprezentând inversul coeficientului de dispersie:

$$C_e = \frac{1}{v_e} = \frac{n_{F'} - n_{C'}}{n_e - 1}. \quad (3.25)$$

c) Transmitanța sticlei optice are o valoare mare în domeniul (450... 1000) nm. Pentru lungimi de undă mai mici de 450 nm, sorturile cu indici de refracție mari prezintă valori superioare ale coeficientului de absorbție.

Pentru a putea caracteriza transmitanța, firmele menționează în cataloage valori ale coeficienților radiometrici spectrali, determinați pentru probe de sticlă prelucrate sub formă de lame plan-paralele, având grosimi precizate în cataloage.

Atenuarea fluxului luminos incident, Φ_i , se datorează pierderilor la trecerea prin mediul optic. Acestea sunt de două categorii: prin reflexie la suprafețele de separație a materialului optic dens cu aerul și prin absorbție în masa materialului (fig.3.2).

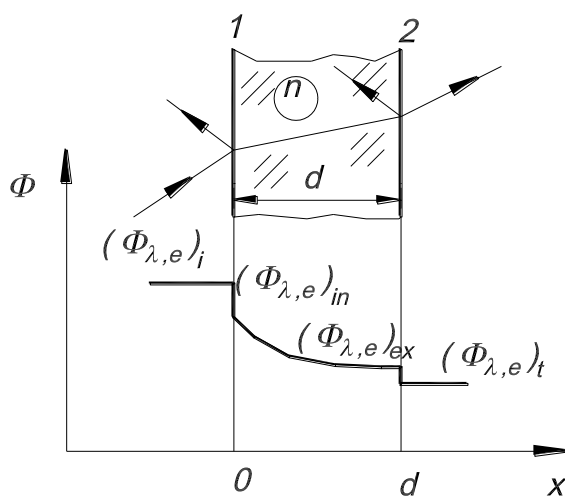


Fig.3.2. Pierderi de lumină prin mediile optice dense

Astfel, considerând o piesă de forma unei lamele plan paralele, pe care este incident fluxul Φ_i , în interiorul piesei, efectiv, pătrunde fluxul $\Phi_{in} < \Phi_i$, datorită reflexiei pe prima față. Pe a doua față ajunge fluxul $\Phi_{ex} < \Phi_{in}$, diminuarea fiind cauzată de absorbția pe parcursul d . Din fața a doua a piesei emerge $\Phi_t < \Phi_{ex}$, pierderea fiind determinată de reflexia pe suprafața 2 a lamei.

Între valorile fluxurilor energetice sau luminoase de la incidența pe prima față până la emergența din a doua suprafață, se pot scrie relații care definesc coeficienții radiometrici (sau fotometrici). În forma cea mai cuprinzătoare, care are în vedere și determinarea spectrală a reflexiei, absorbției și transmisiei, aceștia au următoarele expresii:

- coeficientul spectral de transmisie externă:

$$\tau_{ext}(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_t}{(\Phi_{e,\lambda})_i}, \quad (3.26)$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_t$ este fluxul radiant transmis de probă, iar $(\Phi_{e,\lambda})_i$ reprezintă fluxul radiant incident;

- coeficientul spectral de reflexie:

$$\rho(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_r}{(\Phi_{e,\lambda})_i}, \quad (3.27)$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_r$ este fluxul radiant reflectat de probă;

- coeficientul spectral de absorbție:

$$\alpha(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_a}{(\Phi_{e,\lambda})_i}, \quad (3.28)$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_a$ este fluxul radiant absorbit de probă;

-coeficientul spectral de transmisie internă:

$$\tau_{int}(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_{ex}}{(\Phi_{e,\lambda})_{in}}, \quad (3.29)$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_{ex}$ este fluxul radiant incident pe a doua față a lamelei, iar $(\Phi_{e,\lambda})_{in}$ reprezintă fluxul radiant care intră în probă după pierderea prin reflexie pe prima față a acesteia;

- coeficientul spectral de absorbție internă:

$$\alpha_{\text{int}}(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_{\text{in}} - (\Phi_{e,\lambda})_{\text{ex}}}{(\Phi_{e,\lambda})_{\text{in}}}, \quad (3.30)$$

Între acești coeficienți există relațiile:

$$\tau_{\text{ext}}(\lambda) + \rho(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1, \quad (3.31)$$

$$\tau_{\text{int}}(\lambda) + \alpha_{\text{int}}(\lambda) = 1, \quad (3.32)$$

$$\tau_{\text{int}}(\lambda) = e^{-\alpha_{\text{int}}(\lambda)d}. \quad (3.33)$$

Se observă că:

$$\alpha_{\text{int}}(\lambda) > \alpha_{\text{ext}}(\lambda), \quad (3.34)$$

$$\tau_{\text{int}}(\lambda) > \tau_{\text{ext}}(\lambda). \quad (3.35)$$

Cu aceste considerații privind pierderile prin absorbție în masa materialului piesei optice și prin reflexii pe cele două fețe, fluxul transmis va fi :

$$(\Phi_{e1\lambda})_t = [(\Phi_{e1\lambda})_i - (\Phi_{e1\lambda})_i \rho] e^{-\alpha_i d} (1 - \rho), \quad (3.36)$$

sau:

$$\tau_{\text{ext}}(\lambda) = (1 - \rho) e^{-\alpha_i d} \cdot (1 - \rho) = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha_i d}, \quad (3.37)$$

unde ρ este reflectanța unei suprafețe.

Pentru sticla optică fără protecție antireflex, $\rho \approx 0,04$ și $\alpha_i \approx 0,002$ rezultă un factor de transmisie externă curent $\tau_{\text{ext}} \approx 0,92$, la grosimea de 1mm, în lumină albă.

3.1.3.2. Proprietăți termice ale sticlei optice

Temperatura are o influență hotărâtoare asupra caracteristicilor optice ale sticlei, fiind un factor determinant al tehnologiei de fabricație și al stabilității constantelor optice în exploatare.

Domeniul de temperaturi la care se formează sticla este cuprins, pentru majoritatea sorturilor, între 400°C și 600°C.

Viteza de răcire de la 600°C la temperatura camerei trebuie aleasă adecvat pentru a se asigura o tranziție lentă de la faza lichidă la faza solidă. Viteza lentă de răcire asigură valori scăzute ale tensiunilor interne

(pentru evitarea pericolului spargerii sticlei sau al manifestării fenomenului de birefringență) și o fixare a moleculelor într-o rețea densă (condiție a obținerii unui indice de refracție ridicat).

Indicele de refracție variază cu temperatura atât datorită dilatării sau contracției termice, cât și deplasării limitei de absorbție din domeniul UV al spectrului către domeniul VIS. Pentru sticlele crown este mai semnificativă contracția/dilatația care determină creșterea/scăderea indicelui de refracție decât deplasarea limitei de absorbție, care se află în UV îndepărtat. La sticlele flint este mai importantă creșterea temperaturii, datorită faptului că au limita de absorbție aproape de domeniul VIS.

Datorită deplasării benzii de absorbție spre lungimi de undă mai mari majoritatea sorturilor de sticlă prezintă în timp colorații diferite (la început galben, apoi portocaliu și, în final, roșu).

Din punct de vedere termic, sticlele optice se caracterizează prin următorii parametri:

- temperatura de curgere – temperatura la care sticla devine un fluid vâscos
- temperatura de formare – temperatura la care tensiunile interne din sticlă se elimină în cca. 15 minute
- temperatura de tragere – temperatura la care sticla poate fi deformată
- temperatura de pătrundere – temperatura la care sticla pătrunde în porii unei plăci pe care este așezată
- temperatura de lucru – temperatura de prelucrare a pieselor optice.

Se definește coeficientul de dilatare termică liniară ca alungirea unității de lungime a unui eșantion de sticlă încălzit cu 1°C. Coeficientul de dilatare termică este dependent de temperatură. Din acest motiv cataloagele dau valori medii ale coeficientului de dilatare pentru două domenii de temperatură (de la – 60°C la 20°C și de la 20°C la 120°C).

Pentru a stabili o valoare aproximativă a coeficientului de dilatare în

intervalul de temperaturi [20°C...400°C] se poate utiliza expresia de interpolare:

$$\alpha_{20/t} = \alpha_{20/20} + m(t - 20), \quad (3.38)$$

unde $\alpha_{20/20}$ este coeficientul de dilatare termică la 20°C (dată de catalog)

m – coeficient de temperatură (dată de catalog)

t – temperatura limită a intervalului pentru care se calculează coeficientul de dilatare.

Valoarea $\alpha_{20/t}$ se încadrează între limitele $(33...136) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, dar pentru majoritatea sorturilor se grupează în intervalul $(50...90) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (valorile mai ridicate corespund sorturilor cu conținut mai bogat în metale alcaline). Această mărime prezintă interes deosebit atunci când un aparat lucrează la variații mari de temperatură, precum și în cazul lipirii componentelor optice. Pentru lipire se admite o variație a coeficienților de dilatare $\Delta\alpha = 7 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Conductivitatea termică λ_t reprezintă capacitatea sticlei de a conduce căldură și se definește prin cantitatea de căldură (exprimată în kcal sau J) care traversează o suprafață de 1mp pe unitatea de timp (oră sau secundă), la un gradient de temperatură care inițiază transferul termic egal cu 1°/m.

Conductivitatea termică depinde de temperatură. Cataloagele conțin valori de referință ale parametrului pentru patru temperaturi: - 50°C, 0°C, 20°C, 50°C.

La temperatura standard, conductivitatea termică este de ordinul $\lambda_{20} = (0.5348...1.1045) \text{ J/ms}^\circ\text{C}$, majoritatea valorilor fiind grupate în intervalul $(0.58...0.93) \text{ J/ms}^\circ\text{C}$.

Căldura specifică a sticlelor optice este cvasiconstantă pentru majoritatea sorturilor și are valoarea $c = 920 \text{ J/kgK}$.

3.1.3.3. Proprietăți mecanice ale sticlei optice

Cunoașterea proprietăților mecanice ale sticlei este importantă atât în procesul de prelucrare cât și pentru montarea componentelor optice.

Masa specifică, ρ , este indicată în cataloage pentru condiții standard și are valori în intervalul (2.27...6.97) g/cm³. Acest parametru depinde nu numai de compoziția chimică ci și de temperatura de formare a semifabricatului.

Modulul de elasticitate, E , caracterizează proprietățile elastice ale sticlei. Relația de dependență între modulul de elasticitate longitudinal, E , modulul de elasticitate transversal, G și coeficientul Poisson este de forma:

$$E = 2G(1 + \mu). \quad (3.39)$$

Pentru majoritatea sticlelor optice E are valori în intervalul (5.4...8.34)·10⁴ MPa.

Se definește duritatea la șlefuire, HS și duritatea la zgâriere măsurată în unități Martens (32.5...80.5).

Tensiunea de birefrință se exprimă prin diferența de drum optic dintre fronturile de undă emergente diferite determinate de indicii de refracție corespunzători direcțiilor de polarizare a luminii:

$$\Delta s = 10 \cdot K \cdot d \cdot \sigma, \quad (3.40)$$

unde K este coeficientul tensiunii optice, exprimat în 10⁻⁶ mm²/N,

d – grosimea eșantionului în cm

σ - tensiunea măsurată în N/mm².

Tensiunea de birefrință este indicată în cataloage prin coeficientul tensiunii optice pentru lungimea de undă de 550nm în condiții standard.

K are valori uzuale în domeniul (0.58...3.90)10⁻⁶mm²/N.

Unele sorturi de sticlă, cum ar fi STF3 și STF11 au valori K negative (-1.35, respectiv - 2.30).

Vâscozitatea este definită ca raport dintre tensiunea de forfecare din sticlă în stare fluidă și gradientul de viteză normal pe direcția de curgere a acesteia. Vâscozitatea sticlelor optice, măsurată în Poise, este de 10^{7.6} la temperatura de înmuiere, de 10¹³ la temperatura de formare și de 10^{14.5} la temperatura de deformare.

3.1.3.4. Proprietăți electrice ale sticlei optice

La temperatura camerei, sticla are o rezistivitate electrică foarte ridicată ($10^{14} \dots 10^{16}$) Ωm .

La temperaturi ridicate conductivitatea electrică poate fi ridicată, funcție de sort, datorită mobilității ionilor în special alcalini (la peste $1400^{\circ}C$ rezistivitatea scade la cca. $10^3 \Omega m$).

3.2. STAREA REALĂ DE SOLICITARE COMPLEXĂ A COMPONENTELOR OPTICE

Sistemele optomecanice reale conțin piese optice fixate în monturi mecanice. Erorile de prelucrare a lentilelor și pieselor metalice, precum și erorile de montaj constituie factori importanți de influență asupra calității imaginii formate de sistem.

Principalele probleme de montaj apar datorită soluției de fixare a pieselor optice în monturi, soluție unică, de altfel, care prevede un ajustaj cu joc.

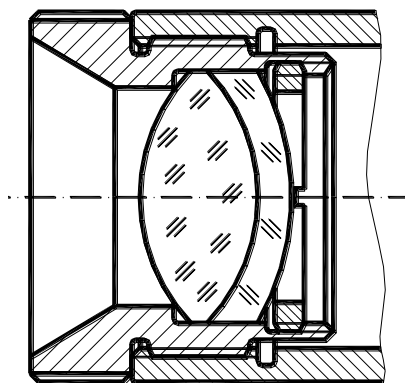


Fig. 3.3. Soluție tradițională de fixare a componentelor optice prin îmbinare filetată

În figura 3.3 este redată o soluție clasică de montare a unui subansamblu optic. În mod ideal, sistemul optic este perfect centrat (axele geometrice ale lentilelor și ale monturii coincid).

În realitate, jocul permite abateri de la centrarea pieselor. Aceste abateri pot fi descentrări liniare (fig. 2.16) sau înclinări unghiulare ale

componentei optice în spațiul permis de alezaj (fig. 2.17).

Forța de apăsare exercitată de inelul filetat (fig. 3.3) determină apariția unei presiuni de contact atât la suprafața lentilă-montură, cât și, direct, la suprafața lentilă-inel.

Chiar în condiții ideale de montare, starea de tensiune și deformație a lentilelor nu poate fi tratată analitic prin nici una dintre teoriile particulare derivate din teoria elasticității generalizate. Lentilele sunt piese volumice, având toate trei dimensiunile comparabile, astfel încât nu pot fi studiate aplicând modelele dezvoltate pentru bare sau membrane.

În cazul luării în considerare a descentrării și mai ales al înclinării, care poate determina împănarea lentilelor în motură, astfel încât se introduc puncte de contact cu montura suplimentare (și, în consecință, constrângeri suplimentare), starea de tensiune și deformație generalizată devine cu atât mai mult cea mai adecvată abordare.

Efectul tensionării mecanice a pieselor optice impune o diferențiere netă în abordarea și interpretarea rezultatelor analizei stării de tensiune și deformație în raport cu aplicațiile care vizează materialele tradiționale utilizate în construcția de mașini sau construcții.

Elementele care particularizează analiza pieselor din sticlă optică vizează două efecte specifice ale tensionării componentelor:

- manifestarea birefrinței
- deformări locale ale suprafeței ideal sferice.

Prezența tensiunilor din material are ca efect birefrința optică, o formă particulară de anizotropie nedorită. Birefrința conduce la manifestarea unor indici de refracție diferinți corespunzători razei ordinare și extraordinare, similar unui fenomen de polarizare a luminii, care introduce pe lângă axa optică principală a materialului și o axă optică secundară. Efectul birefrinței se măsoară în diferență de drum optic [nm] pe unitatea de lungime geometrică de parcurs [cm] și reprezintă o problemă încă din faza de formare a semifabricatului. Standardele ISO impun efecte admisibile ale birefrinței datorate gradientului de răcire

real variabil în masa materialului, la valori cuprinse între 12 și 4 nm/cm, funcție de clasa de calitate a semifabricatului.

În figura 3.4 sunt prezentate valori ale tensiunilor de birefrință pentru trei calități de sticlă și două game de dimensiuni ale probei, conform Catalogului Schott 2006.

Se observă că, funcție de mărimea semifabricatului și calitatea tratamentului de recoacere (fină, specială sau precisă), tensiunile remanente introduc diferențe de drum optic cuprinse între 4 și 12 nm/cm.

| Dimensions | Stress Birefringence | | |
|--------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| | Fine Annealing [nm/cm] | Special Annealing (SK) [nm/cm] | Precision Annealing (SSK) [nm/cm] |
| Ø ≤ 300 mm d ≤ 60 mm | ≤ 10 | ≤ 6 | ≤ 4 |
| Ø > 300–600 mm d > 60–80 mm | ≤ 12 | ≤ 6 | ≤ 4 |

Fig.3.4. Valori ale tensiunilor de birefrință

Presarea sticlei în montură accentuează birefrința reziduală a semifabricatului, introducând diferențe de drum optic suplimentare, care deformează frontul de undă emergent real, afectând calitatea imaginii.

Măsurarea tensiunii de birefrință se face conform ISO 11455 prin metoda Sénarmont-Friedel, care prevede măsurarea diferenței de drum optic la distanță de 5% din diametrul probei în raport cu marginea acesteia sau la 5% din dimensiunea cea mai mare față de o muchie pentru o probă de formă prismatică.

Din punct de vedere optic limitarea tensiunilor se poate impune teoretic cunoscând coeficientul tensiunii optice a sorturilor de sticlă, grosimea componentelor în zona de contact și mărimea aberațiilor echivalată în diferență de drum optic. Pornind de la relația (3.40) și considerând grosimea medie în zona marginală de cca. 2mm, pentru un sistem limitat la difracție, la care OPD este maximum $\lambda/4$ conform

criteriului Rayleigh, rezultă o tensiune maximă admisibilă:

$$\sigma = \frac{OPD}{10 \cdot K \cdot d} = \frac{550}{10 \cdot 3 \cdot 0.2 \cdot 4} \cong 23 \text{ N/mm}^2. \quad (3.41)$$

S-a considerat cazul unei sticle cu $K=3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$, care lucrează în domeniul vizibil ($\lambda_{\text{referință}} = 550 \text{ nm}$).

Unul dintre scopurile analizei stării de tensiuni în materialul lentilelor este deci urmărirea nivelului de manifestare a birefringenței, respectiv mărimea diferenței de drum optic introdusă de aceasta.

Un al doilea element important de urmărit în cazul pieselor optice este caracterul și mărimea efectivă a deformațiilor de suprafață ale componentelor. Dacă în proiectarea organelor de mașini primează starea de tensiune, ca element de referință în proiectare, în cazul pieselor optice aspectul cu semnificație esențială este mărimea și variația tridimensională a deformațiilor. În mod ideal suprafețele lentilelor sunt sferice, plane sau asferice (parabolice, hiperbolice, elipsoidale, torice, cilindrice etc.). În urma prelucrării suprafețelor rezultă abateri dimensionale globale, care, așa cum s-a menționat anterior, sunt măsurabile și controlabile și, ca urmare forma și dimensiunile suprafețelor de refracție sau reflexie pot fi considerate cunoscute. În urma montării, presiunile de contact sticlă-metal determină modificări ale formelor inițiale definite geometric ca sferă, plan etc. Funcție de mărimea efectivă a razei, în cazul unei suprafețe sferice, de deschiderea totală a componentei și de forța axială impusă prin montaj, chiar în cazul unor poziții relative ideale, tensiunile sunt însoțite de deformări locale ale suprafețelor. Forma acestora, inițial sferică, se va schimba prin apariția unor neregularități de mică extindere în zonele adiacente contactului efectiv și prin deformări globale pe zone extinse (centrale și mediane) ale deschiderii. Funcție de caracterul convex sau concav al suprafeței și poziția în raport cu sensul de acțiune al forței de apăsare, suprafața sferică se poate transforma într-o calotă de paraboloid, elipsoid etc. Asferizarea suprafețelor are impact direct asupra formei frontului de undă emergent și, deci, asupra calității imaginii. În cel mai bun caz efectul poate fi compensat prin defocusare. În general, însă,

se poate intui o ușoară modificare a puterii și o scădere a calității imaginii, cu intensitate mai accentuată în zonele marginale.

În cazul luării în considerare a asimetriilor generate de erorile de montaj, presiunile de contact au un caracter variabil, tensiunile își pierd caracterul simetric în plan meridian, iar suprafețele sferice degenerază în suprafețe asferice, care nu mai au caracter de revoluție. Deși tensiunile principale se poate presupune că vor fi preponderent de-a lungul axei optice, celelalte două tensiuni principale vor primi valori semnificativ mai mari decât în cazul simetriei perfecte.

Deformația frontului de undă emergent va rezulta prin însumarea deformațiilor determinate de tensiuni, care, în principal conduc la birefringență, cu deformațiile determinate de asferizarea dioptrilor.

Din punct de vedere al rezistenței materialelor, sticla și aliajele metalice ale monturilor au proprietăți foarte diferite.

Cataloagele de sticle optice nu menționează caracteristicile de rezistență tradiționale, cum ar fi rezistența la rupere la tracțiune sau compresiune, având în vedere valorile foarte ridicate ale acestora în raport cu solicitările la care sunt supuse prin fixarea în monturi. Sunt evidențiate, în general, valorile modului de elasticitate longitudinală și coeficientul Poisson. De asemenea, este specificată duritatea Knoop, utilă în calculul regimurilor de așchiere. Cea mai importantă caracteristică mecanică este, însă, coeficientul tensiunii de birefringență.

Sticla este un material cu un comportament caracterizat printr-o zonă elastică, urmată de rupere fragilă. Zona plastică și de curgere practic lipsește. Deși modulul de elasticitate longitudinal E este relativ scăzut (în medie $8 \cdot 10^4$ MPa) și rezistența de rupere la întindere are valori foarte ridicate (în cazul fibrelor de sticlă $\sim 4 \cdot 10^4$ MPa) deformațiile specifice practice ale pieselor masive sunt mult reduse datorită tenacității scăzute și tensiunii scăzute de amorsare a fracturii ($\sim 0.1 \cdot 10^4$ MPa). O caracteristică deosebit de importantă a sticlei este comportarea diferită la întindere și compresiune, relația dintre rezistențele la tracțiune și compresiune fiind

[H3]:

$$\sigma_{rc} > 10\sigma_{rt}. \quad (3.42)$$

Datorită deformațiilor posibile mici, rezistența la încovoiere este mult redusă în raport cu valorile limită la tracțiune și compresiune.

Metalele pot fi caracterizate de un model elasto-plastic, care permite deformații specifice mult mai ridicate în valoare absolută decât la sticlă, deși modulul de elasticitate E este cu un ordin de mărime mai mare ($\sim 2.1 \cdot 10^6$ MPa) la oțel și comparabil cu al sticlei la aliajele de aluminiu ($\sim 7 \cdot 10^4$ MPa).

Discuția anterioară a vizat exclusiv efectele eforturilor mecanice asupra calității imaginii sistemelor optice. Nu s-a avut în vedere caracterul special al sticlei, care este un material cu comportament elastic, are rezistență la rupere la întindere de valoare foarte ridicată, dar, în același timp, este un material dur și fragil, susceptibil la spargere. S-a presupus că solicitările nu ating limita la care ciobirea sau spargerea componentei are loc, situație în care analiza propusă nu mai are sens.

Determinarea efectelor aplicării unei forțe axiale asupra îmbinării sticlă-metal este imposibilă prin metode analitice. Tehnicile de calcul actuale permit însă, cu succes, abordarea numerică a problemelor de elasticitate generalizate.

3.3. ELEMENTE DE TEORIA ELASTICITĂȚII GENERALIZATE

3.3.1. Ecuțiile de bază ale teoriei elasticității. Ecuțiile constitutive de material

Analiza corectă, cu grad înalt de încredere, a pieselor volumice nu poate apela modelele simplificate asociate barelor, tuburilor sau membranelor, pentru care s-au dezvoltat modele analitice bazate pe ipoteze simplificatoare. Acestea au în vedere atât aspecte privind raporturi ale celor trei dimensiuni ale pieselor, cât și încărcarea, solicitarea și deformația acestora.

Cea mai adecvată abordare în cazul lentilelor sau pieselor optice în general, pentru care se urmărește cu un grad mare de rafinament starea

de tensiune și deformație, este apelarea teoriei elasticității generalizate. Această abordare nu face obiectul unei excesive pedanterii științifice, ci are la bază observația că parametrii de calitate a imaginii, influențați de tensiunile și deformațiile pieselor, se măsoară în lungimi de undă, ceea ce înseamnă că interesează mărimi de ordinul nanometrilor.

Funcțiile tensiune pentru un corp material au valori variabile în raport cu punctul considerat. Acceptând continuitatea acestor funcții și dezvoltând teoria raportat la un sistem de referință triortogonal drept xyz, cu originea în punctul considerat, funcțiile tensiune trebuie să îndeplinească trei tipuri de condiții: ecuațiile de echilibru, condițiile la limită și condițiile de compatibilitate.

Ecuațiile de echilibru (3.43) se obțin prin proiecția pe cele trei axe ale forțelor, deducerea legii dualității (parității) tensiunilor tangențiale – din ecuațiile momentelor în raport cu cele trei axe – și rezultă ca un sistem de trei ecuații diferențiale. Dacă se consideră și forțele masice care acționează în punctul considerat se obține:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

unde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ reprezintă cele șase componente normale și tangențiale care definesc starea de tensiune a unui punct, într-un sistem rectangular de referință,

X, Y, Z – componentele forțelor masice pe direcția celor trei axe.

Condițiile la limită exprimă componentele forțelor exterioare pe unitatea de arie $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$, funcție de componentele de tensiuni și cosinuzii directori l, m și n aferenți axelor x, y și z :

$$\begin{cases} \bar{X} = \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n \\ \bar{Y} = \sigma_y m + \tau_{yz} n + \tau_{xy} l \\ \bar{Z} = \sigma_z n + \tau_{xz} l + \tau_{yz} m \end{cases} \quad (3.44)$$

Condițiile de compatibilitate (3.45, 3.46) conțin relațiile care există între cele șase componente ale deformațiilor specifice, iar satisfacerea lor are semnificația asigurării continuității materialului în urma deformației:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial^2 y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial^2 x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial^2 y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial^2 x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial^2 z^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} \end{cases} \quad (3.45)$$

$$\begin{cases} 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (3.46)$$

unde $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ reprezintă deformațiile specifice liniare și unghiulare, definite în raport cu deplasările u, v și w , de-a lungul axelor x, y și z (3.47):

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{cases} \quad (3.47)$$

Relațiile cuprinse în sistemele (3.43)...(3.47) reprezintă ecuațiile de

bază ale teoriei elasticității generalizate.

Ecuatiile constitutive ale unui material liniar elastic, izotrop și omogen se utilizează ca o formă de legătură între componentele tensorului tensiunilor și componentele tensorului deformațiilor specifice și sunt cunoscute și ca Legea lui Hooke generalizată (3.48):

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases}, \quad (3.48)$$

unde E este modulul de elasticitate longitudinală, iar ν - coeficientul Poisson.

3.3.2. Eforturi unitare și direcții principale. Invarianți

Starea de tensiune din jurul unui punct al unui corp material nu depinde de sistemul de referință și poate fi caracterizată prin tensorul eforturilor unitare, care conține nouă componente (3.49):

$$T = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix}. \quad (3.49)$$

Conform legii dualității numai trei componente tangențiale sunt independente (fiind egale și de semne contrare două câte două).

Tensorul tensiunilor se descompune în tensorul sferic (3.50) și tensorul deviator (3.51):

$$T_0 = \begin{Bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{Bmatrix}, \quad (3.50)$$

unde σ_0 reprezintă eforturi unitare normale, cu valori identice pe planele de coordonate,

$$D = \begin{Bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_0 \end{Bmatrix}. \quad (3.51)$$

Mărimea σ_0 poate fi interpretată ca o valoare medie a eforturilor unitare normale, iar tensorul sferic caracterizează întinderea sau compresiunea tridimensională, respectiv variația volumului, fără variația formei elementului considerat. Tensorul deviator indică abaterea de la întinderea/compresiunea pură, care modifică numai volumul, caracterizând, de fapt și schimbarea formei.

Starea de tensiune sau efortul unitar p într-un punct este o rezultantă a eforturilor normal și tangențial:

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} . \tag{3.52}$$

Într-un plan oarecare, a cărei normală este caracterizată de cosinșii directori l , m și n , cunoscuți în raport cu un sistem de referință global xyz , exprimarea proiecțiilor p_x , p_y și p_z este complicată și irelevantă. Aceleași concluzii rezultă analizând starea de tensiune în orice secțiune, dar, este desigur de preferat o modalitate mai directă și simplă matematic. Pe acest considerent, din infinitatea de plane de analiză posibile, s-au ales planele care prezintă particularitatea că sunt caracterizate numai prin tensiuni normale, cele tangențiale fiind nule. S-au definit astfel planele numite principale. Tensiunile normale corespunzătoare acestor plane reprezintă tensiunile principale.

Cele trei tensiuni principale care caracterizează complet numai prin trei valori starea de tensiune a unui punct sunt soluțiile unei ecuații de forma:

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 , \tag{3.53}$$

unde I_1 , I_2 și I_3 poartă numele de invarianții stării de tensiune și au expresiile (3.54)...(3.56):

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z , \tag{3.54}$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2 , \tag{3.55}$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} . \tag{3.56}$$

Soluțiile ecuației (3.53) sunt reale și, convențional, se notează σ_1 , σ_2 , σ_3 , relația de ordine fiind:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3. \quad (3.57)$$

În funcție de tensiunile normale principale, invarianții stării de tensiune au forme mai simple:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (3.58)$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3, \quad (3.59)$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3. \quad (3.60)$$

Tensiunile normale principale sunt utilizate în exprimarea tensiunilor echivalente conform diverselor criterii de descriere a stărilor limită.

3.3.3. Stări limită. Criterii fenomenologice ale stărilor limită

Starea limită a unui element de rezistență corespunde atingerii unei valori critice a unui parametru caracteristic elementului, valoare la care acesta suferă o degradare sau deteriorare majoră, care impune scoaterea sa din uz.

Pentru calculele de dimensionare sau verificare, în scopul evitării atingerii stării limită, se stabilește natura factorului hotărâtor pentru apariția stării limită și se impune un factor de proporționalitate supraunitar, numit coeficient de siguranță, egal cu raportul dintre valoarea maximă posibilă a factorului hotărâtor și valoarea considerată admisibilă a acestuia.

În general, factorul hotărâtor este o caracteristică de material, cum ar fi rezistența la întindere/compresiune la rupere, limita de curgere etc.

Stabilirea factorului hotărâtor pentru definirea stării limită depinde de tipul de comportament al materialului (elastic, elasto-plastic, ductil, fragil), de condițiile de lucru ale elementului de rezistență (mediu coroziv gazos sau lichid, temperaturi ridicate sau joase, prezența radiațiilor etc.) și de natura și complexitatea solicitărilor la care este supus elementul.

Practic, starea limită se manifestă prin:

- deformații elastice excesive (alungire, scurtare, săgeată,

rotație) însoțite de păstrarea echilibrului sau pierderea stabilității

□ apariția unor deformații plastice, datorate curgerii, care au ca efect modificarea formei constructive a elementului de rezistență, la nivel local sau de ansamblu și determină scoaterea din uz a piesei

□ ruperea într-o secțiune oarecare, fenomen, care, evident este forma cea mai gravă și periculoasă de degradare a unui element mecanic. Ruperea are loc fără deplasări elastice sau plastice de material și se manifestă preponderent la piese confecționate din materiale fragile, care prezintă concentratori de tensiune, sunt supuse la solicitări variabile sau lucrează la temperaturi ridicate.

Pentru fiecare aplicație, asocierea unei stări limită trebuie realizată pe baza unor criterii fenomenologice adecvate privind apariția curgerii sau a ruperii fragile.

În general, materialelor fragile cu comportament liniar-elastic, la care curba $\sigma(\varepsilon)$ are o alură liniară cu pantă mare și semnifică manifestarea unor deformații mici la creșteri mari ale tensiunilor, urmate de ruperea instantanee a piesei, li se asociază ca stare limită tensiunea la rupere σ_r .

Pentru materialele ductile, cu palier sau o curbă oarecare de curgere, starea limită asociată este tensiunea de curgere σ_c .

Pentru stabilirea factorului hotărâtor, care urmează să fie comparat cu starea limită se apelează la determinarea unor tensiuni echivalente, exprimate ca o funcție de tensiunile principale.

Calculul tensiunilor echivalente se poate realiza pe baza unor algoritmi dezvoltați sub numele de teorii de rezistență, care modelează matematic șase criterii fenomenologice. Cele șase teorii de rezistență, respectiv criterii fenomenologice sunt:

- criteriul tensiunii normale maxime (teoria întâi de rezistență)
- criteriul deformației specifice maxime (teoria a doua de rezistență)
- criteriul tensiunii tangențiale maxime (teoria a treia de rezistență)

- criteriul energiei specifice de deformație (teoria a patra de rezistență)
- criteriul energiei specifice modificatoare de formă (teoria a cincea de rezistență)
- criteriul tensiunilor tangențiale octaedrice (teoria a șasea de rezistență).

Tabelul 3.1

| Teoria de rezistență | Tensiunea echivalentă | Observații privind teoria |
|---|---|---|
| Teoria întâi (Rankine) – Criteriul tensiunilor normale maxime | $\sigma_{ech(I)} = \text{Max}(\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3) \leq \sigma_r$ | <ul style="list-style-type: none"> - este aplicabilă în cazul materialelor fragile supuse mai ales la întindere - nu pune în evidență curgerea - justifică ruperea fragilă după un plan înclinat cu 45° prin forfecare pură ($\sigma_{max} = \tau$) - explică rezistența la compresiune mult mai ridicată în raport cu cea la întindere a materialelor fragile |
| Teoria a treia (Tresca) – Criteriul tensiunilor tangențiale maxime | $\sigma_{ech(III)} = \text{Max}(\sigma_1 - \sigma_2 , \sigma_2 - \sigma_3 , \sigma_3 - \sigma_1) \leq \sigma_c$ | <ul style="list-style-type: none"> - este aplicabilă materialelor ductile - se verifică experimental consecința $\sigma_c = 2\tau_c$ |
| Teoria a cincea (von Mises) – Criteriul energiei specifice modificatoare de formă | $\sigma_{ech(V)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq \sigma_c$ | <ul style="list-style-type: none"> - se ia în considerare o parte mai importantă din capacitatea portantă a unui material în raport cu teoria Tresca - implică toate cele trei tensiuni principale, care, cel puțin în cazul stării generale de tensiune sunt în aceeași măsură semnificative - poate fi aplicată materialelor care au limite de rezistență diferite la tracțiune și compresiune |

Dintre acestea teorii cele mai utilizate sunt teoria I, III, V și VI. Ultimele două conduc la expresii ale tensiunilor echivalente identice.

În tabelul 3.1 sunt sintetizate formulele de calcul ale tensiunilor echivalente conform teoriilor I, III și V, precum și observații privind recomandările de utilizare a fiecărei teorii.

3.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Capitolul al treilea al tezei de doctorat este dedicat introducerii elementelor necesare studiului corelației complexe dintre calitatea imaginii și proprietățile materialelor optice, erorile de execuție și montaj, starea de tensiune și deformație rezultată în urma asamblării sistemului optomecanic.

Sunt sintetizate fundamentele fizice ale interacțiunii dintre radiația electromagnetică și structurile materiale, cu punerea în evidență a proceselor care conduc la comportament optic diferit al materialelor, respectiv impun caracterul refractant, reflectant sau absorbant al acestora, insistându-se și pe componenta spectrală de influență.

Sunt prezentate caracteristicile optice, mecanice, termice și electrice ale sticlelor minerale, organice și ale cristalelor naturale sau de sinteză.

În partea a doua a capitolului se face o succintă prezentare a teoriei elasticității generalizate, care urmează să constituie fundamentul teoretic al analizelor ulterioare.

Partea descriptivă este însoțită de analize și discuții referitoare la particularitățile stării de tensiune și deformație a subansamblurilor optomecanice și la caracteristicile specifice sticlelor optice din punct de vedere al rezistenței materialelor. Identificarea și corelarea acestor particularități a condus la următoarele concluzii:

□ sistemele optice sunt evaluate prin parametri care se măsoară în nanometri, astfel încât execuția și montajul pieselor optice și mecanice necesită o abordare diferită în raport cu construcția de mașini în general, atât prin prescrierea toleranțelor, dar mai ales privind aspectele care

trebuie urmărite

□ piesele optice de refracție sunt executate din sticlă optică, a cărei principală caracteristică este transmitanța, ca o funcție izotropă, independentă de punct sau direcție

□ sticla este un material dur și fragil, cu comportament liniar elastic pe un interval foarte îngust de deformații specifice

□ lentilele, ca piese caracteristice pentru construcția sistemelor optice, reprezintă piese volumice, a căror analiză de tensiuni și deformații necesită o abordare tridimensională. Pe baza acestei observații se consideră oportună formularea unei probleme de elasticitate generalizată

□ montajul lentilelor în monturi conduce inevitabil la tensionarea sticlei. Tensiunile volumice prezintă o importanță deosebită datorită efectului de birefringență, care determină în diverse grade anizotropia materialului și induce fronturi de undă parazite, care pot compromite calitatea imaginii. Deformațiile locale din vecinătatea contactului sticlă-metal și deformațiile din zona suprafeței libere a lentilei constituie abateri de la forma nominală a dioptrilor și determină atât modificări ale puterii optice, cât și alterarea calității imaginii

□ cele două efecte ale tensionării și deformării lentilelor se manifestă chiar și pentru poziția nominală a pieselor, dar au un efect cu atât mai accentuat cu cât erorile de montaj sunt mai mari

□ starea de tensiune și deformație a lentilelor este accentuată, în principal, de două tipuri de erori de montaj: descentrarea liniară și inclinarea unghiulară a subansamblului optic în montură. Aceste erori sunt inevitabile datorită soluției de montaj care prevede un ajustaj cu joc

□ starea complexă de tensiune și deformație a lentilelor impune apelarea la analiză prin metode numerice, accesibile prin programe dedicate.

Având în vedere observațiile de mai sus, prezenta teză își propune să analizeze influența stării de tensiune și deformație a subansamblurilor optomecanice și, în acest scop, formulează următoarele obiective concrete:

- *stabilirea toleranțelor de formă și poziție a componentelor optice pentru prezervarea caracterului limitat la difracție al sistemului optic*
- *determinarea tipului și mărimii erorilor de montaj, generate de prescrierea ajustajului cu joc dintre subansamblul optic și montura metalică*
- *modelarea numerică a ansamblului optomecanic lentile-montură și simularea comportamentului ansamblului la aplicarea unor forțe de apăsare de diferite valori, prin metoda elementului finit*
- *analiza evoluției parametrilor de calitate a imaginii sub acțiunea presiunii de contact care determină deformări locale în zona contactului și deformări de suprafață extinse ale dioptrilor în zonele centrală și mediană, ca urmare a stării de tensiune și deformație care afectează componentele optice*
- *studiul manifestării și evoluției fenomenului de birefrință generat de tensiunile din masa lentilelor*
- *elaborarea unor recomandări privind forțele, respectiv momentele de strângere admisibile pentru inelele de fixare a lentilelor, astfel încât caracterul limitat la difracție al sistemului optic să se păstreze, conform proiectului.*

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot enumera următoarele:

- *sinteza unui material cu pronunțat caracter interdisciplinar, care vizează selectarea și corelarea elementelor de interes din domeniul științei materialelor, rezistenței materialelor și ingineriei optice*
- *stabilirea factorilor de influență asupra calității imaginii și a efectelor acestora, din perspectiva corelării procesului de montaj cu starea de tensiune și deformație permanentă a componentelor optomecanice*
- *demonstrarea stării triaxiale de tensiune în cazul lentilelor și desfășurarea unui raționament care conduce la concluzia adecvanței teoriei a cincea de rezistență (criteriul energiei specifice modificatoare de formă) și a tensiunilor von Mises ca cel mai semnificativ element de*

caracterizare globală pentru problema de elasticitate generalizată formulată.

BIBLIOGRAFIE:

[C1], [D2], [D4], [G4], [G7], [G17], [H3], [L1], [L2], [M1], [N1], [N5], [O3], [P6], [S1], [S3], [S6], [S8], [T2]

4. ELEMENTE PRIVIND APLICAREA METODEI ELEMENTULUI FINIT ÎN ANALIZA STĂRII TRIAXIALE DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE PENTRU REZOLVAREA PROBLEMELOR DE ELASTICITATE

4.1. PRINCIPII FUNDAMENTALE

Metoda elementului finit (MEF) s-a impus ca procedeu modern de rezolvare a unei game largi de probleme ingineresti, care prin metode tradiționale, analitice, sunt greu sau chiar imposibil de rezolvat.

În problemele de elasticitate, MEF are ca scop verificarea stării de tensiune și deformație pentru organe de mașini (subansambluri existente sau în fază de proiectare) sau urmărește, prin rulări iterative, optimizarea formelor constructive, criteriul de optimizare fiind utilizarea cât mai rațională a capacității portante a materialului, respectiv uniformizarea, pe cât posibil a stării de tensiune.

MEF are la bază ideea că structura materială continuă a corpului real, având o infinitate de grade de libertate, poate fi divizată într-un număr finit de subdomenii cu statut geometric și fizico-mecanic propriu și având atașate un număr, de asemenea, finit, de grade de libertate. Aceste subdomenii, numite elemente finite, prin reasamblare, reconstituie corpul de la care s-a pornit și redau comportarea acestuia cu un anumit grad de

aproximație.

Din punct de vedere matematic, procesele care definesc comportarea solidului real sunt exprimate prin funcții care rezultă ca soluții ale unor ecuații diferențiale.

Prin MEF, funcția necunoscută este aproximată printr-un set de funcții simple, continue pe elemente și având ca puncte de precizie, valorile din nodurile rețelei de discretizare.

Fundamentul matematic al metodei se bazează pe principiile calculului variațional. În problemele mecanice de elasticitate, acesta implică o mărime scalară, funcționala Π , definită printr-o formulă integrală:

$$\Pi = \int_{\Omega} F\left(u, \frac{\partial}{\partial x} u, \dots\right) d\Omega + \int_{\Gamma} E\left(u, \frac{\partial}{\partial x} u, \dots\right) d\Gamma, \quad (4.1)$$

unde u este funcția necunoscută,

E, F – operatori

Ω, Γ - domenii

x, \dots - variabile independente.

Soluția problemelor de continuitate este o funcție care se bazează pe caracterul staționar al funcționalei Π față de variații mici δu . Ca urmare, pentru o soluție a unei probleme de continuitate expresia principală fenomenologică este:

$$\delta \Pi = 0. \quad (4.2)$$

În general, dacă unei probleme i se poate aplica un principiu variațional, atunci se poate găsi o funcție \underline{u} , care să aproximeze funcția u , sub forma:

$$u \cong \underline{u} = \sum N_i a_i, \quad (4.3)$$

unde N_i reprezintă funcții numite de formă, dependente de variabile independente și de toate sau numai de unele mărimi necunoscute a_i .

Aplicarea relației (4.3) conduce la un sistem de ecuații având necunoscutele a_i .

Metodele găsirii staționarității cu ajutorul funcțiilor care depind de parametrul a_i poartă numele lui Rayleigh și Ritz.

În problemele de elasticitate, funcționala care se minimizează este energia potențială a elementului finit.

Rezolvarea prin MEF a unei aplicații urmărește un traseu care cuprinde următoarele etape:

- discretizarea domeniului de analiză
- constituirea ecuațiilor elementelor și asamblarea lor în sistemul de ecuații al structurii
- rezolvarea sistemului de ecuații
- postprocesarea rezultatelor.

4.2. DISCRETIZAREA DOMENIULUI DE ANALIZĂ

Prin discretizare, solidul real se divide în subdomenii cât mai simple ca formă și care, prin reasamblare, să redea cu un grad ridicat de aproximare, forma de la care s-a pornit. Aceste subdomenii, prin modelare matematică devin elemente finite.

Elementele finite pot fi liniare, bi sau tridimensionale, funcție de cerințele aplicației. Elementele care permit analiza stării generale de tensiune și deformație sunt, desigur, cele tridimensionale.

Cele mai simple forme spațiale, adecvate discretizării unor corpuri cu suprafețe curbe, cum ar fi lentilele, sunt elementele prismatice sau tetraedrice. Din punct de vedere matematic, pentru păstrarea caracterului liniar al elementului, oricum se practică divizarea prisme în elemente tetraedrice. Prisma cu baza triunghi generează trei tetraedre (fig. 4.1), iar prisma cu baza trapez se descompune în cinci tetraedre (fig. 4.2).

Mărimile caracteristice prisme rezultă simplu, prin medierea mărimilor aferente tetraedrelor componente. Astfel, pentru elemente de tip brick, programele de calcul oferă ca rezultate mărimile din noduri și o valoare centrală.

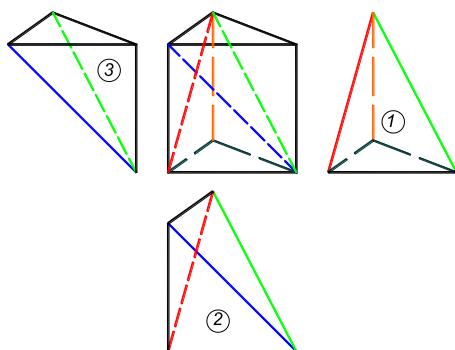


Fig. 4.1. Descopunerea elementelor brick cu baza triunghi în tetraedre

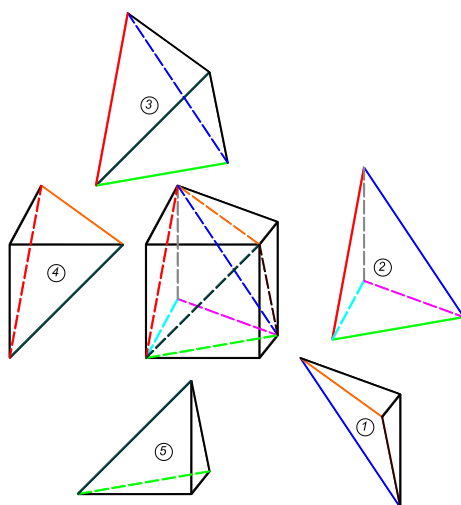


Fig. 4.2. Descopunerea elementelor brick cu baza patrulater în tetraedre

Înainte de discretizarea propriu-zisă, după alegerea tipului de element, se studiază posibilitățile de exploatare a simetriei geometrice și de încărcare, în măsura în care acestea există. În cazul în care simetria sau antisimetria poate fi exploatată, domeniul de analiză se reduce la o jumătate, un sfert sau un sector de deschidere oarecare, dar partea care lipsește trebuie simulată prin efectele sale.

Reducerea domeniului de analiză reprezintă un avantaj, prin micșorarea numărului nodurilor, elementelor, gradelor de libertate, numărului de ecuații din sistemul asociat aplicației și, ca urmare, necesarul de memorie și timpul de calcul se reduc semnificativ (mai ales în cazul structurilor complexe).

4.3. CONSTITUIREA ECUAȚIILOR ELEMENTELOR FINITE ȘI ASAMBLAREA LOR ÎN SISTEMUL DE ECUAȚII AL STRUCTURII

Elementul finit tetraedric cu patru noduri este un element liniar, definit prin coordonatele sale locale raportate la nodurile i, j, p, m sau prin coordonatele globale raportate la un sistem triortogonal xyz , exterior structurii (fig. 4.3).

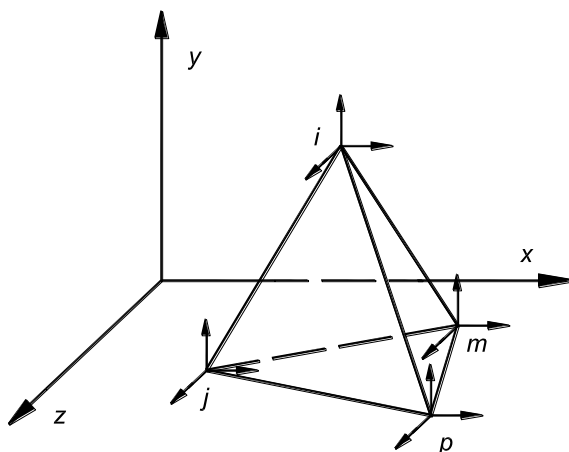


Fig. 4.3. Sistemul de coordonate locale și globale ale elementului tetraedric

În cazul aplicațiilor de analiză a stării de tensiune și deformare funcțiile necunoscute de bază sunt deplasările. Se definește un vector al deplasărilor pe element $\{f\}$ și un vector al deplasărilor nodale $\{d_e\}$ (rel. 4.4 și 4.5):

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (4.4) \quad \{d_e\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_m \\ v_m \\ w_m \\ u_p \\ v_p \\ w_p \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

Funcțiile deplasare u, v, w se aproximează pe element prin funcții de interpolare liniare, având ca puncte de precizie cele patru noduri (valori nodale) – rel. 4.6:

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 X + \alpha_3 Y + \alpha_4 Z \\ v = \alpha_5 + \alpha_6 X + \alpha_7 Y + \alpha_8 Z \\ w = \alpha_9 + \alpha_{10} X + \alpha_{11} Y + \alpha_{12} Z \end{cases} \quad (4.6)$$

În sistemul (4.6) deplasările u, v, w se înlocuiesc cu valorile nodale, iar coordonatele x, y, z cu valorile corespunzătoare nodurilor și rezultă un sistem de 12 ecuații având ca necunoscute coeficienții $\alpha_1 \dots \alpha_{12}$. Aceștia poartă numele de coordonate generalizate, dar nu au semnificație fizică. Pentru determinarea deplasărilor elementale este necesară cunoașterea deplasărilor nodale.

Forma funcțiilor de deplasare pe element, în raport cu deplasările nodale este redată în relațiile (4.7...4.9):

$$u = \frac{1}{6V} \left\{ (a_i + b_i x + c_i y + d_i z)u_i + (a_j + b_j x + c_j y + d_j z)u_j + (a_p + b_p x + c_p y + d_p z)u_p + (a_m + b_m x + c_m y + d_m z)u_m \right\} \quad (4.7)$$

$$v = \frac{1}{6V} \left\{ (a_i + b_i x + c_i y + d_i z)v_i + (a_j + b_j x + c_j y + d_j z)v_j + (a_p + b_p x + c_p y + d_p z)v_p + (a_m + b_m x + c_m y + d_m z)v_m \right\} \quad (4.8)$$

$$w = \frac{1}{6V} \left\{ (a_i + b_i x + c_i y + d_i z)w_i + (a_j + b_j x + c_j y + d_j z)w_j + (a_p + b_p x + c_p y + d_p z)w_p + (a_m + b_m x + c_m y + d_m z)w_m \right\} \quad (4.9)$$

unde V este volumul tetraedrului,

$a_i \dots a_m, b_i \dots b_m, c_i \dots c_m, d_i \dots d_m$ – coeficienți care se calculează în funcție de coordonatele nodurilor.

Funcțiile deplasare pe element se pot scrie sub forma (4.10):

$$\begin{cases} u = N_i u_i + N_j u_j + N_p u_p + N_m u_m \\ v = N_i v_i + N_j v_j + N_p v_p + N_m v_m \\ w = N_i w_i + N_j w_j + N_p w_p + N_m w_m \end{cases} \quad (4.10)$$

unde

$$\begin{cases} N_i = a_i + b_i x + c_i y + d_i z \\ N_j = a_j + b_j x + c_j y + d_j z \\ N_p = a_p + b_p x + c_p y + d_p z \\ N_m = a_m + b_m x + c_m y + d_m z \end{cases} \quad (4.11)$$

Funcțiile N_i , N_j , N_p , N_m se numesc funcții de interpolare și au proprietatea că în nodurile cu același indice au valoarea 1, iar în celelalte noduri sunt nule (de exemplu în nodul i , $N_i=1$, iar în nodurile j , p , și m $N_i=0$).

Elementul finit tetraedric se numește liniar datorită faptului că funcțiile de interpolare sunt de tip Pascal (polinoame complete de gradul I).

În plus, elementul finit tetraedric este și izoparametric, ceea ce înseamnă că, funcțiile de aproximare care descriu variația deplasărilor elementale în raport cu deplasările nodale, sunt formal identice cu funcțiile de interpolare (sau de formă), care descriu variația deplasărilor nodale în raport cu coordonatele nodurilor.

Pentru determinarea deplasărilor nodale, în problemele de elasticitate se utilizează o formulare variațională aplicată unor metode energetice. Aceste metode, prin utilizarea principiilor calculului variațional, permit determinarea ecuațiilor integrale caracteristice echilibrului structurii, prin minimizarea unei funcționale. În general, se utilizează teorema energiei potențiale minime, funcționala minimizată fiind energia potențială a elementului finit. Într-o formulare generală, teorema energiei potențiale minime arată că dintre toate configurațiile posibile de deplasări, care satisfac condițiile de compatibilitate internă și condițiile la limită, numai cele pentru care energia potențială este staționară, corespund poziției de echilibru. În acest sens, se definește funcționala Π :

$$\Pi = U - W, \quad (4.12)$$

unde U este energia de deformație,

W – lucrul mecanic al forțelor exterioare.

Pentru un element se poate scrie:

$$U_e = \int_{V_e} \left(\frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T [E] \{\varepsilon\} + \{\varepsilon\}^T \{\sigma_0\} \right) dV, \quad (4.13)$$

$$W_e = \int_{V_e} \{f\}^T \{F\} dV + \int_{S_e} \{f\}^T \{Q\} dS + \{d_e\}^T \{p_n\}, \quad (4.14)$$

unde $\{\varepsilon\}$ este vectorul deplasărilor specifice,

$[E]$ – matricea de elasticitate,

$\{\sigma_0\}$ – vectorul tensiunilor inițiale,

$\{f\}$ – vectorul deplasărilor elementale,

$\{F\}$ – vectorul forțelor volumice care acționează pe element,

$\{Q\}$ – vectorul forțelor de suprafață care acționează pe element,

$\{p_n\}$ – vectorul forțelor concentrate care acționează pe element,

$\{d_e\}$ – vectorul deplasărilor nodale ale elementului.

Deformațiile specifice și deplasările elementale se exprimă funcție de deplasările nodale:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{d_e\}, \quad (4.15)$$

$$\{f\} = [N] \{d_e\}. \quad (4.16)$$

Pentru o structură care conține M elemente, energia potențială va fi:

$$\Pi = \sum_1^M \Pi_e. \quad (4.17)$$

Minimizarea funcționalei Π este echivalentă, din punct de vedere matematic, cu impunerea condiției de anulare a derivatelor parțiale ale funcționalei în raport cu deplasările d_i ale elementelor:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_i} = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.18)$$

unde n reprezintă numărul gradelor de libertate ale sistemului și este egal cu produsul dintre numărul nodurilor și numărul gradelor de libertate pe nod.

Rezultă un sistem de M ecuații de forma:

$$\left(\sum_1^M \int_{V_e} [B]^T [E][B] dV \right) \{d\} = \sum_1^M \left(- \int_{V_e} [B]^T \{\sigma_0\} dV + \int_{V_e} [N]^T \{F\} dV + \right. \\ \left. + \int_{S_e} [N]^T [Q] dS \right) + \{P\} \quad , \quad (4.19)$$

unde $\{d\}$ este vectorul deplasărilor nodale ale structurii:

$$\{d\} = \sum_1^M \{d_e\}, \quad (4.20)$$

$\{P\}$ – vectorul forțelor nodale ale structurii:

$$\{P\} = \sum_1^M \{p_n\}. \quad (4.21)$$

Se definesc matricea de rigiditate a elementului, $[k]$ și a sistemului, $[K]$:

$$[k] = \int_{V_e} [B]^T [E][B] dV, \quad (4.22)$$

$$[K] = \sum_1^M \int_{V_e} [B]^T [E][B] dV. \quad (4.23)$$

În final se obține forma canonică a ecuației matriceale a elementelor finite (ecuația fundamentală):

$$[K]\{d\} = \{R\}, \quad (4.24)$$

unde $\{R\}$ reprezintă în forma cea mai concisă vectorul solicitărilor volumice, de suprafață și concentrate.

Pentru elementul finit tetraedric, considerațiile generale anterioare se particularizează după cum urmează.

Se pornește de la vectorul deplasărilor elementale, (4.25), exprimate funcție de deplasările nodale, utilizând funcțiile de formă N , determinate anterior:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = [N]\{d_e\} = [N] \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_p \\ v_p \\ w_p \\ u_m \\ v_m \\ w_m \end{Bmatrix}, \quad (4.25)$$

unde matricea $[N]$ a funcțiilor de formă este:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_p & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_p & 0 & 0 & N_m & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_p & 0 & 0 & N_m \end{bmatrix}. \quad (4.26)$$

Matricea deformațiilor specifice se scrie matriceal sub forma:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B]\{d_e\}. \quad (4.27)$$

$[B]$ se numește matrice de transformare a deplasărilor în deformații specifice și are forma:

$$[B] = \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & \dots \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & \dots \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & \dots \\ c_i + b_i & 0 & 0 & c_j + b_j & 0 & 0 & \dots \\ 0 & d_i + c_i & 0 & 0 & d_j + c_j & 0 & \dots \\ 0 & 0 & d_i + b_i & 0 & 0 & d_j + b_j & \dots \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Matricea de elasticitate $[E]$ are forma:

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Vectorul tensiunilor se scrie cu ajutorul legii lui Hooke generalizate, matriceal:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [E]\{\varepsilon\}. \quad (4.30)$$

Matricea de rigiditate a elementului finit devine:

$$[k] = \int_{V_e} [B]^T [E][B] dV. \quad (4.31)$$

Vectorul forțelor care acționează pe element poate fi:

□ $\{f_0\}_e$ – vectorul forțelor datorate tensiunilor inițiale:

$$\{f_0\}_e = - \int_{V_e} [B]^T \{\sigma_0\} dV, \quad (4.32)$$

□ $\{f_m\}_e$ – vectorul forțelor volumice (masice):

$$\{f_m\}_e = \int_{V_e} [N]^T \{F\} dV = \int_{V_e} [N]^T \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} dV \quad (4.33)$$

În expresiile de mai sus apar integrale de forma:

$$I = \int_{V_e} L_1^\alpha L_2^\beta L_3^\gamma L_4^\delta dV, \quad (4.34)$$

a căror valoare este numeric egală cu:

$$I = \frac{\alpha! \beta! \gamma! \delta!}{(\alpha + \beta + \gamma + \delta)} 6V, \quad (4.35)$$

□ $\{f_s\}_e$ – vectorul forțelor de suprafață:

$$\{f_s\}_e = \int_{S_e} [N]^T [Q] dS = \int_{S_e} [N]^T \begin{Bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{Bmatrix} dS, \quad (4.36)$$

□ $\{r\}_e$ – vectorul forțelor concentrate:

$$\{r\}_e = \begin{Bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{Bmatrix}. \quad (4.37)$$

Se scrie astfel un sistem conținând ecuațiile tuturor elementelor finite, în forma canonică:

$$[k]\{d\}_e = \{f\}_e. \quad (4.38)$$

Matricea, respectiv vectorii elementelor din ecuația (4.38) au următoarele dimensiuni:

$[k]$ – 4x3 (număr de noduri x număr de grade de libertate pe nod)

$\{d\}_e$ – 1x12 (12 = numărul componentelor de deplasare x număr de noduri)

$\{f\}_e$ – 1x12 (12 = numărul componentelor de forțe x numărul nodurilor elementului).

Având determinate ecuațiile elementelor finite ale structurii, urmează asamblarea acestora, ca proces invers discretizării. Geometric, se reface structura solidului de la care s-a pornit, iar matematic, rezultă un model global al sistemului.

Asamblarea se face separat, pe matrici de rigiditate, deplasări și forțe, urmărind două operații:

- expandarea matricilor elementale
- însumarea matricilor expandate.

Matricea de rigiditate a sistemului este o matrice pătrată de dimensiuni nxn (n – numărul nodurilor rețelei x numărul gradelor de libertate pe nod).

Matricile expandate, de dimensiuni nxn, se obțin introducând submatricile k_{ij} (3x3) în locurile pe care urmează să le ocupe în matricea sistemului, pe baza unei matrici de conexiuni. Celelalte elemente ale

matricilor expandate sunt nule.

Matricea de rigiditate a sistemului rezultă prin însumarea matricilor expandate.

Vectorul deplasărilor sistemului, U ($1 \times 3M$), cuprinde toate componentele deplasărilor nodale:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_M \\ v_M \\ w_M \end{Bmatrix}. \quad (4.39)$$

De aceeași manieră se construiește vectorul forțelor nodale:

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R_{x1} \\ R_{y1} \\ R_{z1} \\ \vdots \\ R_{xM} \\ R_{yM} \\ R_{zM} \end{Bmatrix}. \quad (4.40)$$

Rezultă ecuația matriceală:

$$[K]\{U\} = \{R\}. \quad (4.41)$$

În această ecuație se introduc condițiile la limită (condiții de rezemare). Acestea implică, în general, valori nule ale unor deplasări sau rotații. În matricea de rigiditate a sistemului, liniile și coloanele aferente deplasărilor cunoscute se anulează. Spre exemplu dacă valoarea deplasării u_i este cunoscută, ecuația (4.41) se scrie sub forma:

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,i-1} & k_{1,i+1} & \dots & k_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i-1,1} & \dots & k_{i-1,i-1} & k_{i-1,i+1} & \dots & k_{i-1,n} \\ k_{i+1,1} & \dots & k_{i+1,i-1} & k_{i+1,i+1} & \dots & k_{i+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n,1} & \dots & k_{n,i-1} & k_{n,i+1} & \dots & k_{n,n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_{i-1} \\ u_{i+1} \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_{i-1} \\ R_{i+1} \\ \vdots \\ R_n \end{Bmatrix} - u_i \begin{Bmatrix} k_{1,i} \\ \vdots \\ k_{i-1,i} \\ k_{i+1,i} \\ \vdots \\ k_{n,i} \end{Bmatrix}. \quad (4.42)$$

În acest mod dimensiunile matricii de rigiditate a sistemului și lungimea vectorilor se reduc. Formal, ecuația structurii în forma redusă se

scrie:

$$[K_r]\{U_r\} = \{R_r\}. \quad (4.43)$$

4.4. REZOLVAREA SISTEMULUI DE ECUAȚII ȘI POSTPROCESAREA REZULTATELOR

Rezolvarea sistemului liniar de ecuații se poate face prin diferite metode directe, exacte sau iterative.

Prin metoda de factorizare Cholesky, de exemplu, matricea coeficient a sistemului se transformă în produsul a două matrici triunghiulare, ceea ce permite determinarea facilă, secvențială și directă a câte unei necunoscute, pe rând.

Prin rezolvarea sistemului se obțin valorile deplasărilor nodale.

Prin postprocesare se pot determina toate elementele care definesc starea de tensiune și deformație a structurii analizate.

Prezentarea rezultatelor postprocesării, funcție de programul de calcul utilizat, permite stocarea datelor sub forma listingului de valori numerice sau în multiple forme grafice, având atașate scări cromatice, care au un caracter mult mai intuitiv.

Rezolvarea problemelor de elasticitate prin metoda elementului finit necesită utilizarea unui soft specializat. Calculul automat este indispensabil, având în vedere că numărul elementelor variază între câteva sute și câteva mii, generând sisteme care conține zeci sau sute de mii de ecuații.

4.5. UTILIZAREA PROGRAMULUI ABAQUS ÎN REZOLVAREA PROBLEMELOR DE ELASTICITATE

Programul Abaqus/cae, creat de Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., versiunea 6.3 este destinat rezolvării prin metoda elementului finit a unor probleme diverse, care acoperă o gamă foarte largă de aplicații vizând structuri mecanice elastice, elasto-plastice, hiperelastice – liniare sau neliniare - , în regim static sau dinamic, cu posibilitatea extinderii studiului privind efectele termice. De asemenea, programul oferă soluții pentru

probleme de transfer termic, mecanica fluidelor, domeniul electric.

În continuare, exemplificările se vor referi la rezolvarea unei aplicații mecanice, privind starea de tensiune și deformație a unui ansamblu constituit din două piese, ale căror materiale au comportament elastic.

Crearea modelului, rezolvarea sistemului de ecuații și postprocesarea rezultatelor necesită apelarea succesivă a mai multe module.

Primul modul, "Part", permite schițarea unei piese sau importarea desenului acesteia dintr-un program de grafică vectorială cum ar fi AUTOCAD, în formate specifice (*.dxf pentru schițe plane ale secțiunilor sau *.sat pentru corpuri tridimensionale) sau din alte programe de element finit. Programul Abaqus este compatibil cu modele generate în versiuni ale softurilor MSC Nastran, Cosmos, Catia etc., care pot converti propriile modele în fișiere de date accesabile prin Abaqus.

Toate modelele create au avut la bază fișiere *.sat realizate în AUTOCAD și importate în Abaqus.

În figura 4.3 este redată o captură de ecran din modulul "Part", după importarea desenului 3D al unei lentile convergente.

În acest modul se importă sau se desenează toate piesele care urmează să formeze ansamblul analizat.

În modulul "Property", fiecărei piese i se asociază un material și o caracteristică a secțiunii.

În figura 4.4 este redată fereastra prin care s-a ales tipul de model pentru lentila convergentă și s-au introdus caracteristicile de material specifice sortului de sticlă optică BK7.

În fereastra "Section manager" din figura 4.5 se observă că celor două lentile le-au fost atribuite secțiuni solide și omogene.

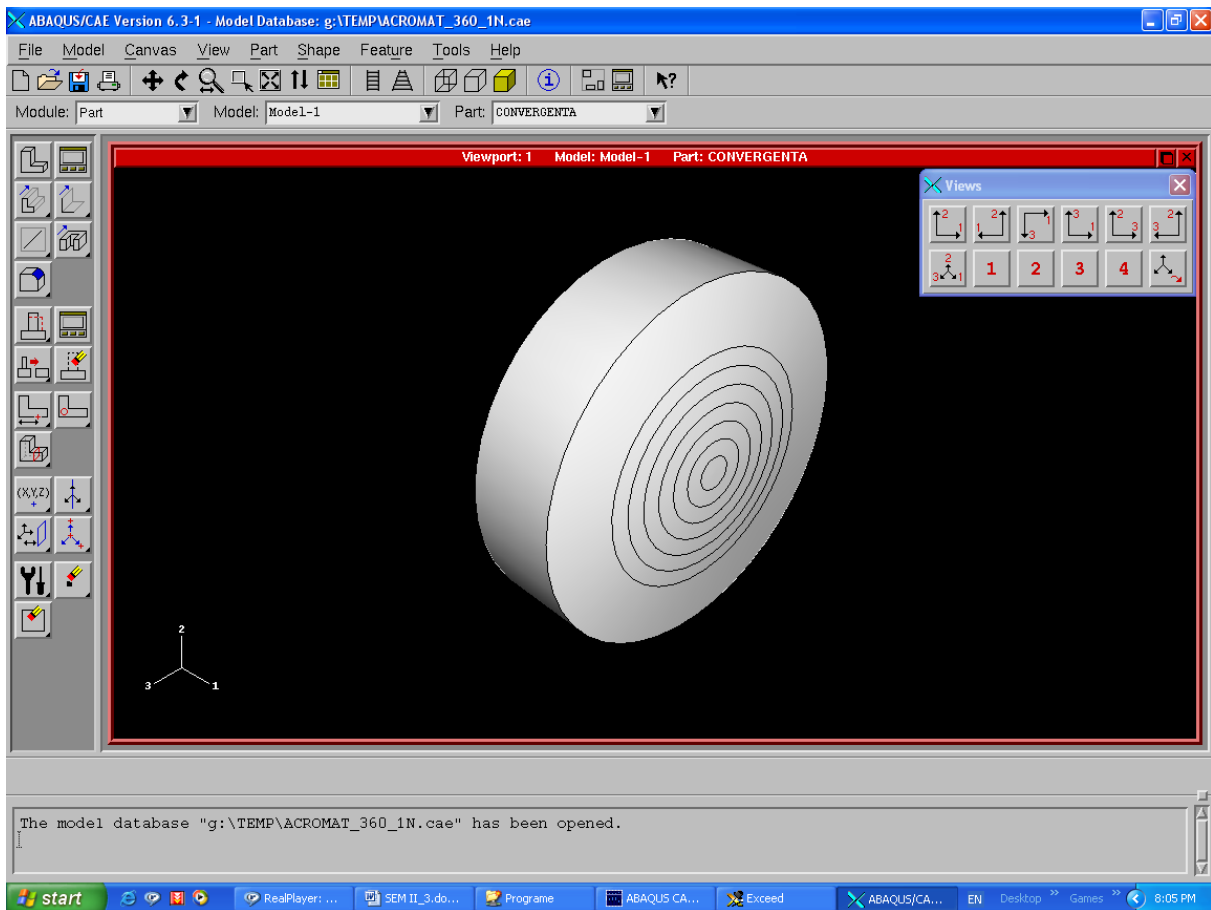


Fig. 4.3. Generarea piesei în modulul "Part"

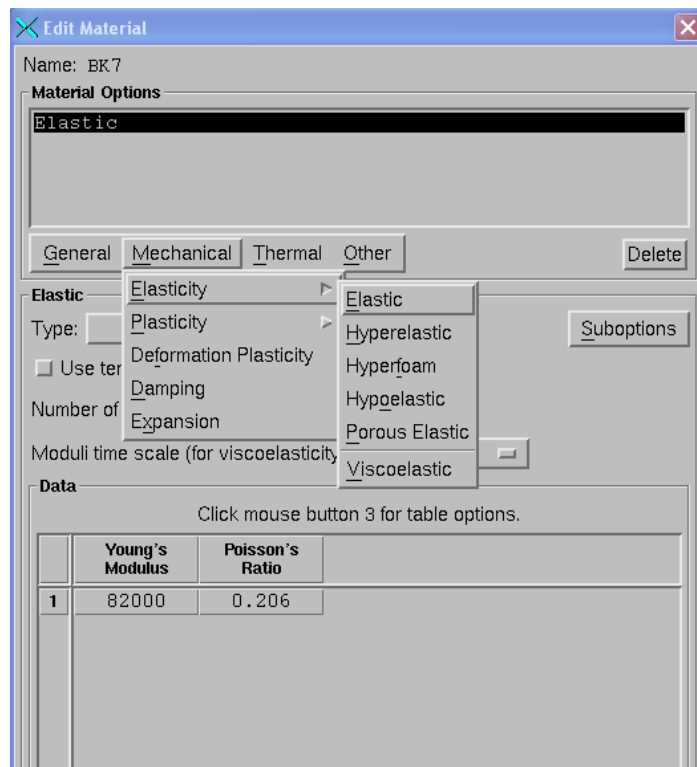


Fig. 4.4. Atribuirea constantelor de material în modulul "Property"

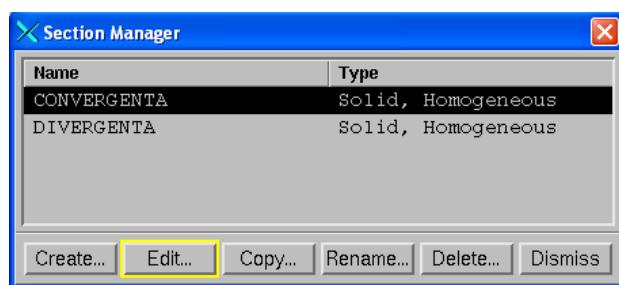


Fig. 4.5. Atribuirea secțiunii în modulul "Property"

În modulul "Assembly" se crează instanțe ale pieselor definite în modulul "Part" și rezultă, geometric, ansamblul de analizat. În figura 4.6 este prezentat un ecran în care pentru lentilele convergentă și divergentă care formează un dublet au fost create instanțele și s-a format ansamblul.

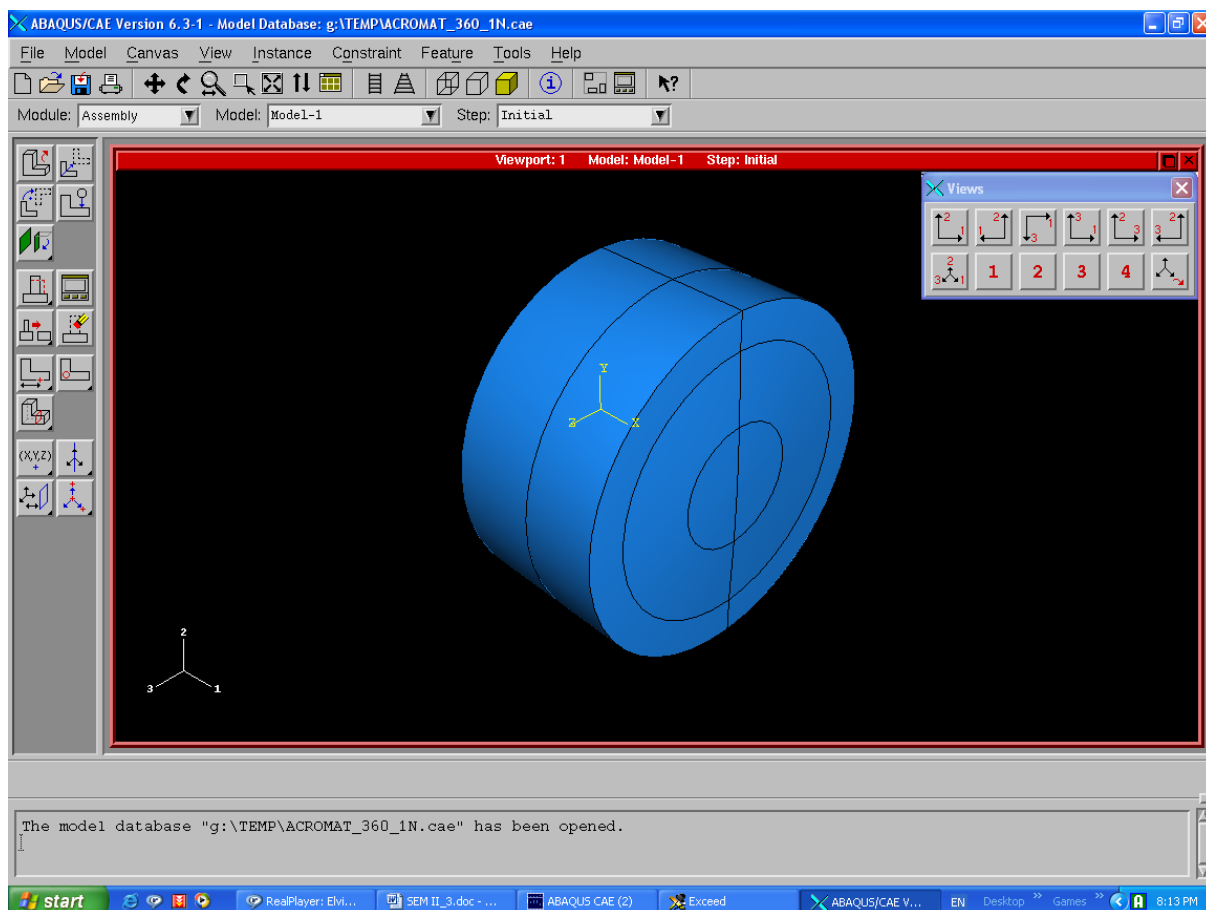


Fig. 4.6. Generarea structurii prin crearea instanțelor în modulul "Assembly" și partiționarea pentru punerea în evidență a generatoarei în plan meridian

În plus, s-a practicat o partiționare a ambelor piese, în plan meridian (urma acestui plan este vizibilă pe suprafețele sferice și cea laterală, cilindrică). Partiționarea este necesară pentru a obliga secvența de program care generează rețeaua de discretizare să dividă piesele astfel încât pe liniile din plan meridian (care din punct de vedere geometric au rol de curbă generatoare a suprafeței dioptrelui) să existe noduri ale rețelei. Analiza urmărește, de fapt deformarea dioptrelui, respectiv deplasările nodurilor aflate pe suprafața sa. Prin partiționare, ansamblul a fost virtual separat în două jumătăți, care sunt discretizate separat, dar care respectă condiția ca elementele adiacente să aibă fețe și noduri comune.

În modulul "Step" se impune momentul inițial al aplicării forțelor exterioare, al condițiilor la limită și de rezemare. Aplicarea forțelor se face sub forma unui semnal rampă, discretizat în incremente de valoare impusă de utilizator.

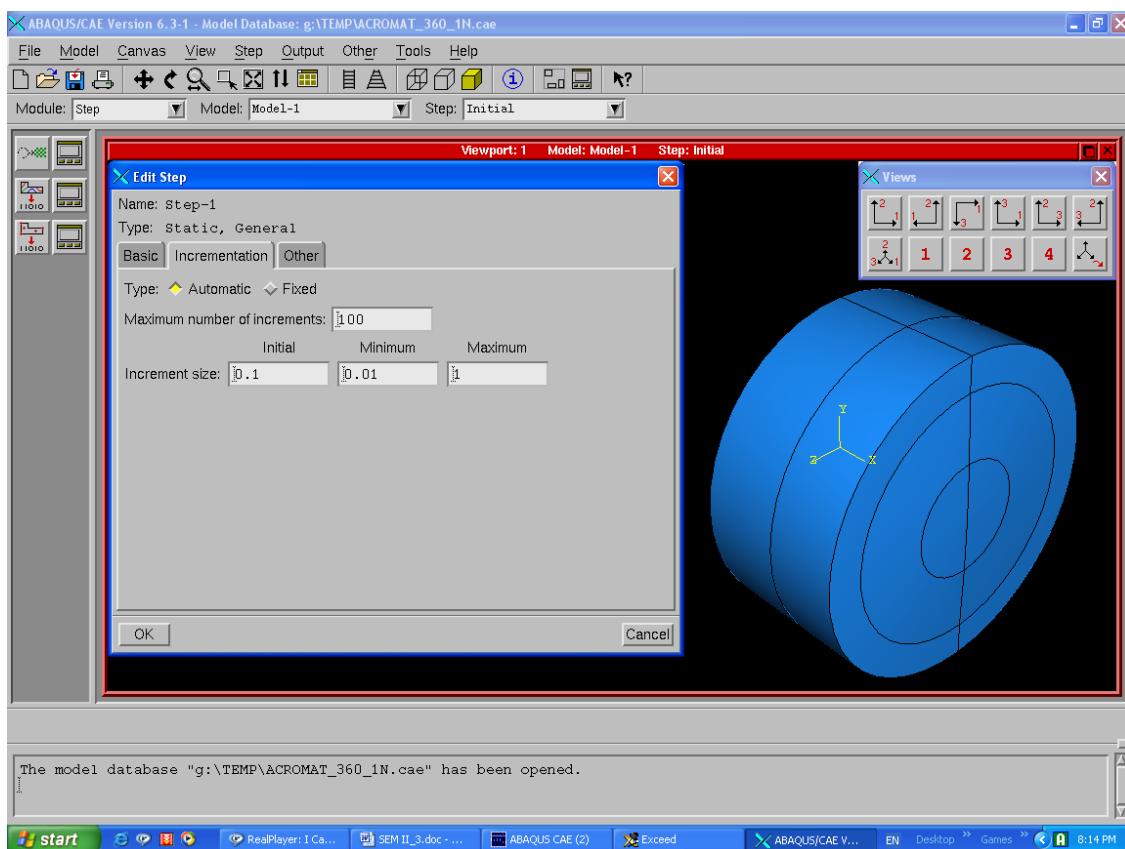


Fig. 4.7. Impunerea numărului și valorilor extreme admise de operator în modulul "Step"

În figura 4.7 incrementul de creștere a forțelor este de 0.1 din valoarea maximă (1). Având în vedere că întregul calcul are loc iterativ, există posibilitatea micșorării incrementului, a cărei valoare minimă o poate indica utilizatorul (0.01 în figura 4.7), pentru cazul în care apar discontinuități sau incompatibilități care nu pot fi depășite din punct de vedere matematic. Se observă, de asemenea, că poate fi impus numărul maxim de iterații (100 în figura 4.7) pentru cazul în care soluția nu se dovedește de la început divergentă și se inițiază procedura de calcul, dar se manifestă probleme de incompatibilitate pe parcurs. În acest caz, numărul iterațiilor pe pas este tot mai mare (cu limita 10), incrementul tot mai mic (până la 0.00001), dar soluția nu este convergentă și consumul de timp și memorie devine inutil.

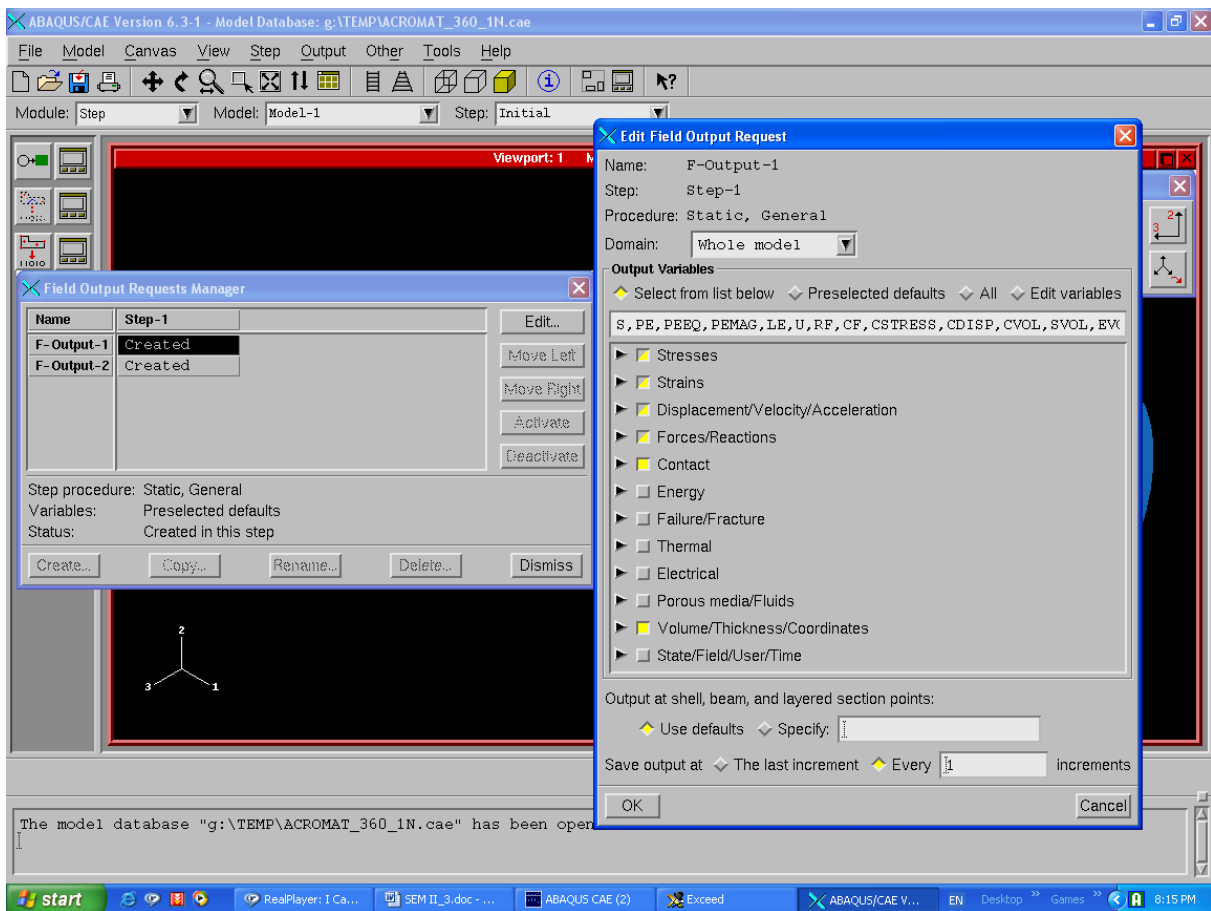


Fig. 4.8. Crearea fișierelor pentru baza de date cu rezultate, conform opțiunilor utilizatorului în modulul "Step"

Tot în modulul "Step" se crează un câmp al variabilelor de ieșire și o

“istorie” a acestora, pe incremente. În figura 4.8 este prezentată o fereastră în care utilizatorul a optat pentru determinarea tensiunilor, deformațiilor specifice, deplasărilor, reacțiilor, presiunii de contact și variației volumului, grosimii și coordonatelor pentru întregul model.

“F-Output-1” se referă la câmpul variabilelor de ieșire de interes, în timp ce “F-Output-2” deschide un fișier de memorare a istoriei evoluției acestor variabile, cu puncte valorice la fiecare increment (pas) finalizat.

În modulul “Interaction” a fost impusă condiția de lipire a lentilelor, prin alegerea unei constrângeri de tip “tie”.

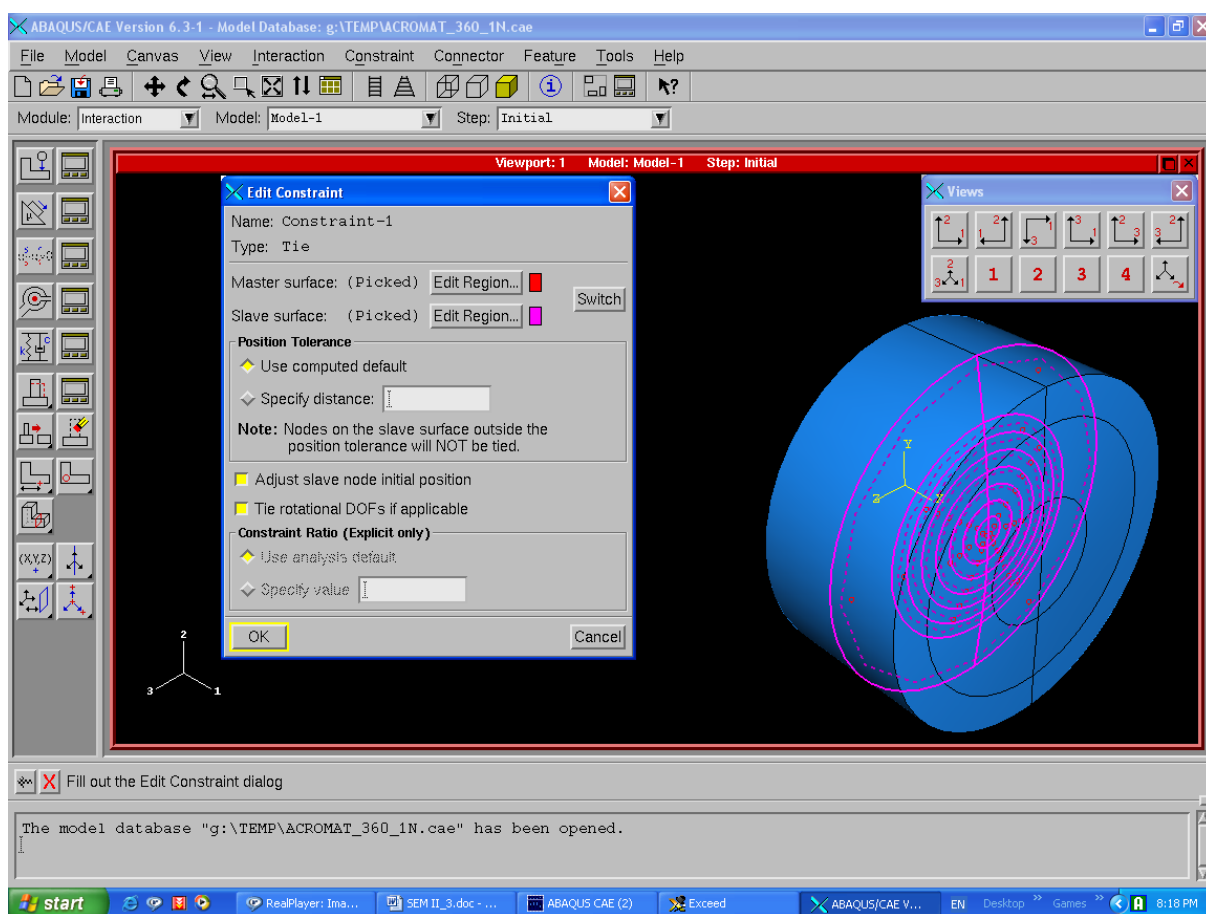


Fig. 4.9. Simularea lipirii lentilelor în modulul “Interaction”

În figura 4.9 este pusă în evidență suprafața comună a lentilelor lipite și fereastra în care operatorul impune unele condiții referitoare la modul în care este modelată legătura dintre suprafețe. Se observă bifarea opțiunii “Adjust slave node initial position”, care obligă modulul de creare

a rețelei de discretizare să genereze elemente ale căror noduri să fie comune pe cele două suprafețe în faza inițială, iar după aplicarea solicitărilor, aceste legături să se păstreze, astfel încât să nu apară goluri între lentile.

În modulul "Load" sunt indicate solicitările exterioare și condițiile de rezemare. În figura 4.10 este redat ecranul care surprinde momentul creerii elemntului fix al structurii. Acesta a fost asociat cu suprafața de sprijin axial al lentilei convergente pe umărul monturii metalice (suprafața este marcată cu culoare roșie). Fixarea corespunde opțiunii "Encastre" care impune valori nule ale deplasărilor liniare și rotațiilor în nodurile aflate de suprafața indicată.

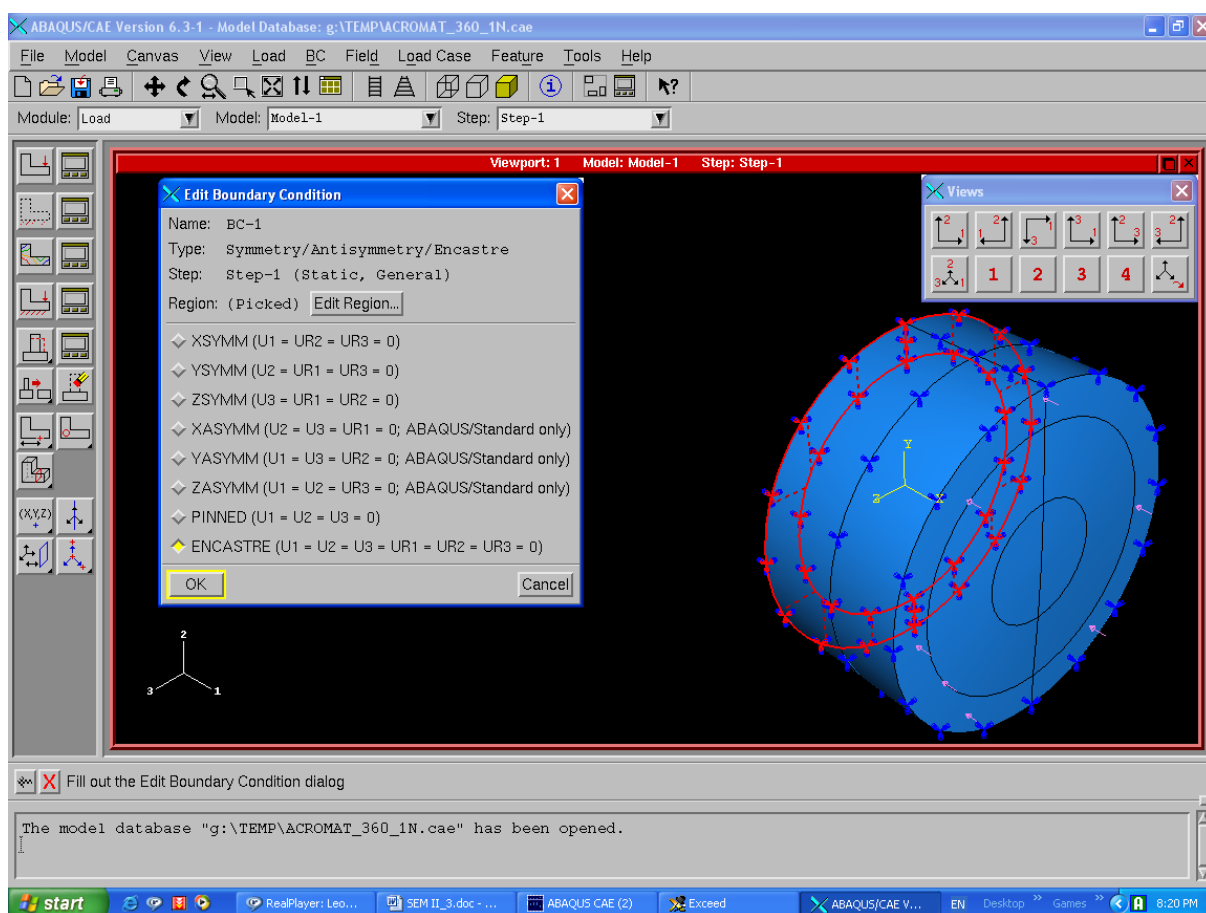


Fig. 4.10. Impunerea condițiilor limită în modulul "Load"

A fost creat și un al doilea set de condiții la limită prin care suprafeței exterioare cilindrice i-au fost interzise rotațiile (sunt permise numai deplasări liniare de-a lungul celor trei axe). Valoarea acestor

deplasări liniare nu a fost impusă, având în vedere că de-a lungul axei optice extinderea nu este împiedicată de nimic, iar după axa y și z, valorile previzibile ale deplasărilor sunt inferioare jocului permis de ajustaj.

Pe suprafața de contact dintre lentila divergentă și inelul filetat, efectul strângerii acestuia a fost modelat prin aplicarea unei presiuni de contact pe suprafața aferentă, marcată cu culoare roșie în figura 4.11.

Fereastra de dialog care se deschide operatorului permite introducerea unei valori numerice a presiunii, în MPa.

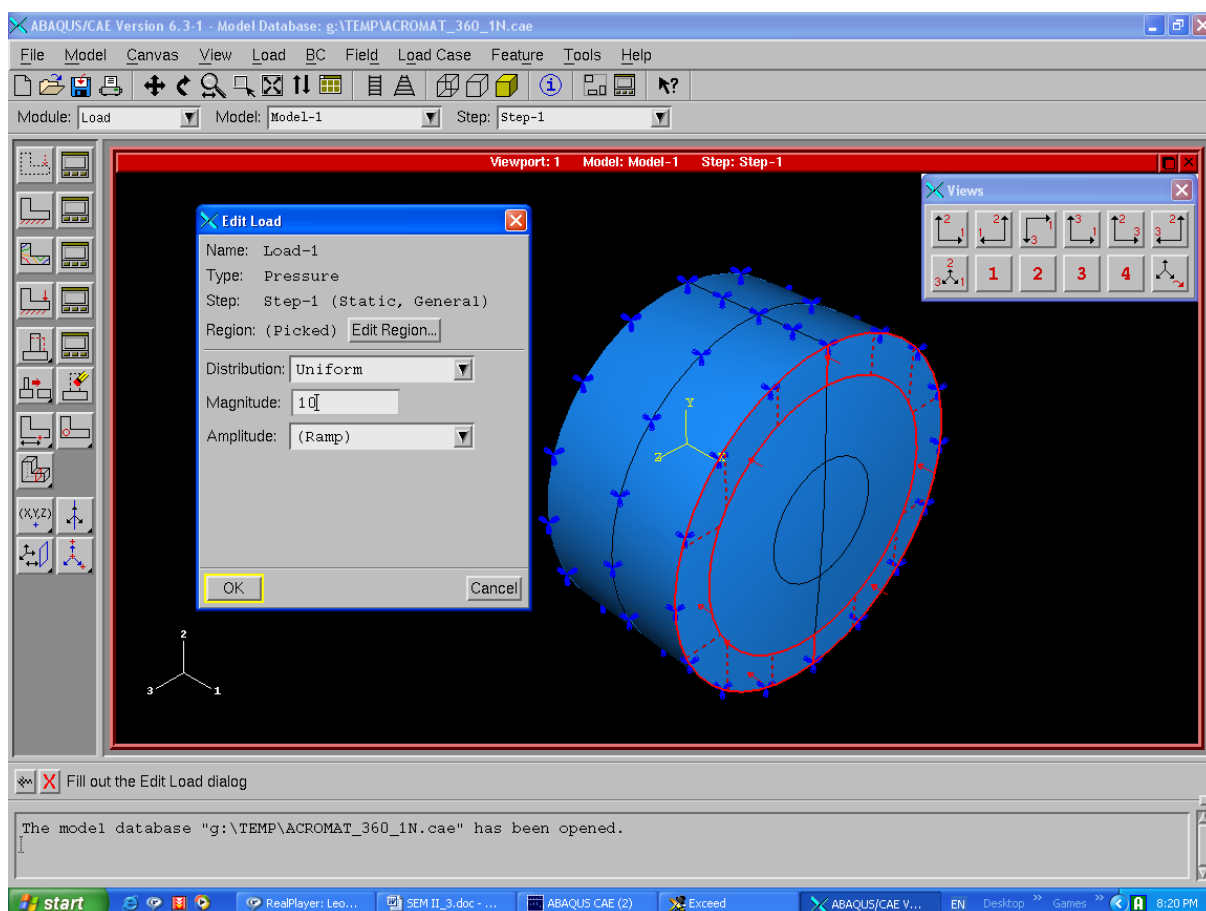


Fig. 4.11. Stabilirea încărcării distribuite în modul "Load"

În modul "Mesh", prima operație este constituită de alegerea tipului de element finit, pe care operatorul îl propune pentru discretizarea fiecărei instanțe create a pieselor. În figura 4.12 se observă exprimarea opțiunii pentru element de tip tetraedric ("tet") liniar, standard, destinat analizei 3D.

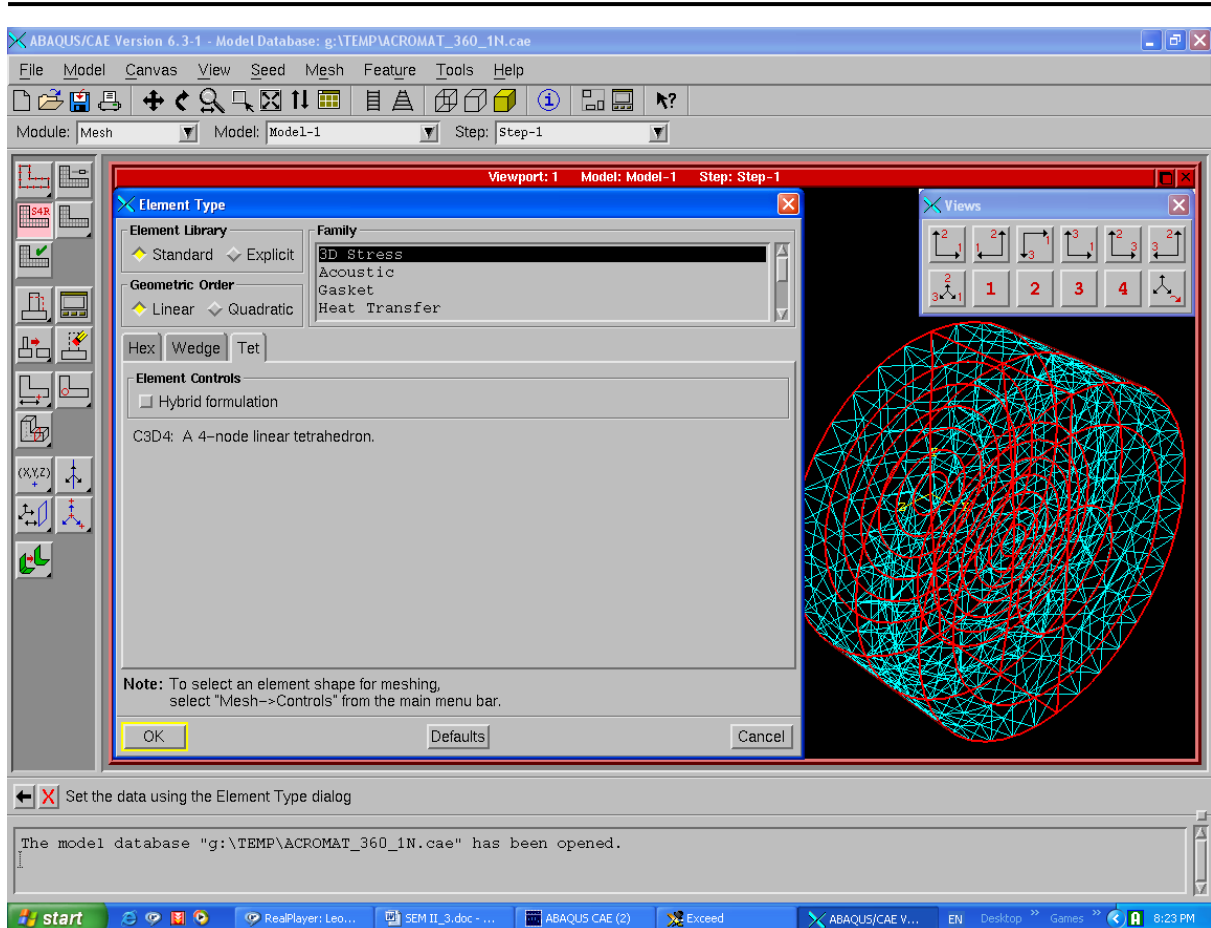


Fig. 4.12. Impunerea tipului de element finit care urmează să fie utilizat pentru discretizare în modulul “Mesh”

Rețeaua de discretizare este generată automat. Operatorul poate verifica aspectul acesteia prin vizualizare directă sau teste matematice de tip “Verify mesh”, care indică prezența elementelor necorespunzătoare din punct de vedere matematic (tetraedre concave, cu unghiuri diedre obtuze mai mari de 120° sau unghiuri diedre ascuțite mai mici de 30°). Printr-un meniu de tip “Query” și selectare directă cu mouse-ul a elementelor se pot vizualiza, în secțiunea “Text” din subsolul ferestrei, tipul elementului, numărul de ordine atribuit automat și numerele nodurilor din rețea (fig. 4.13). Opțional, pot fi afișate numerele tuturor elementelor și nodurilor acestora.

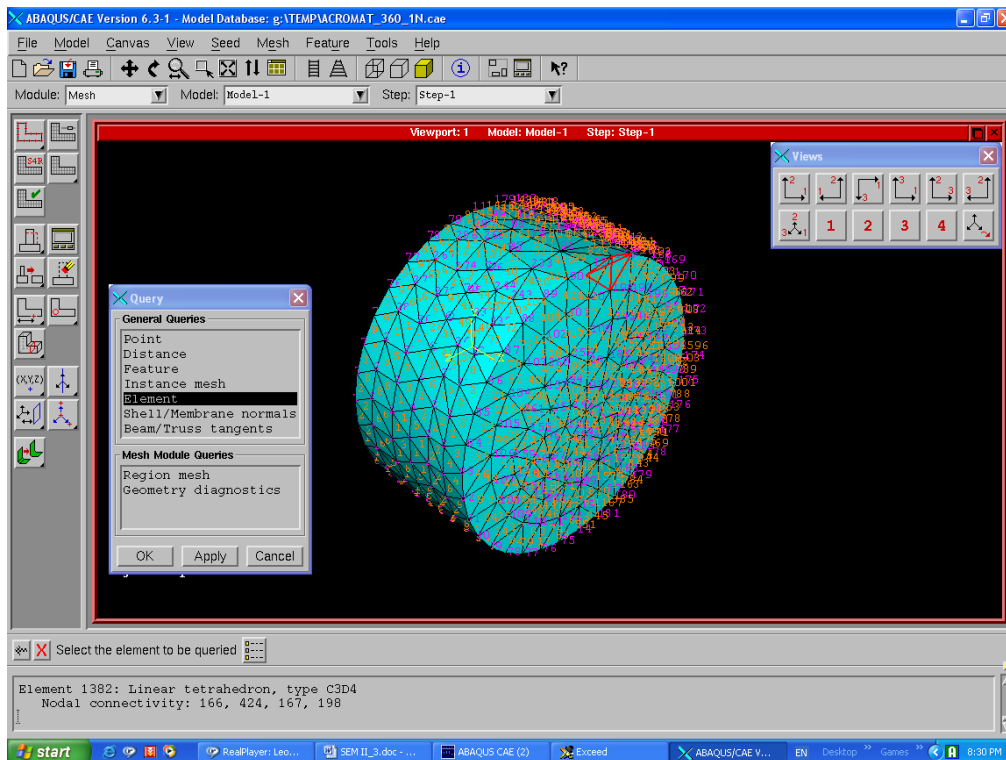


Fig. 4.13. Operații opționale privind vizualizarea individuală a elementelor, afișarea numărului de ordine al elementelor și nodurilor în modulul “Mesh”

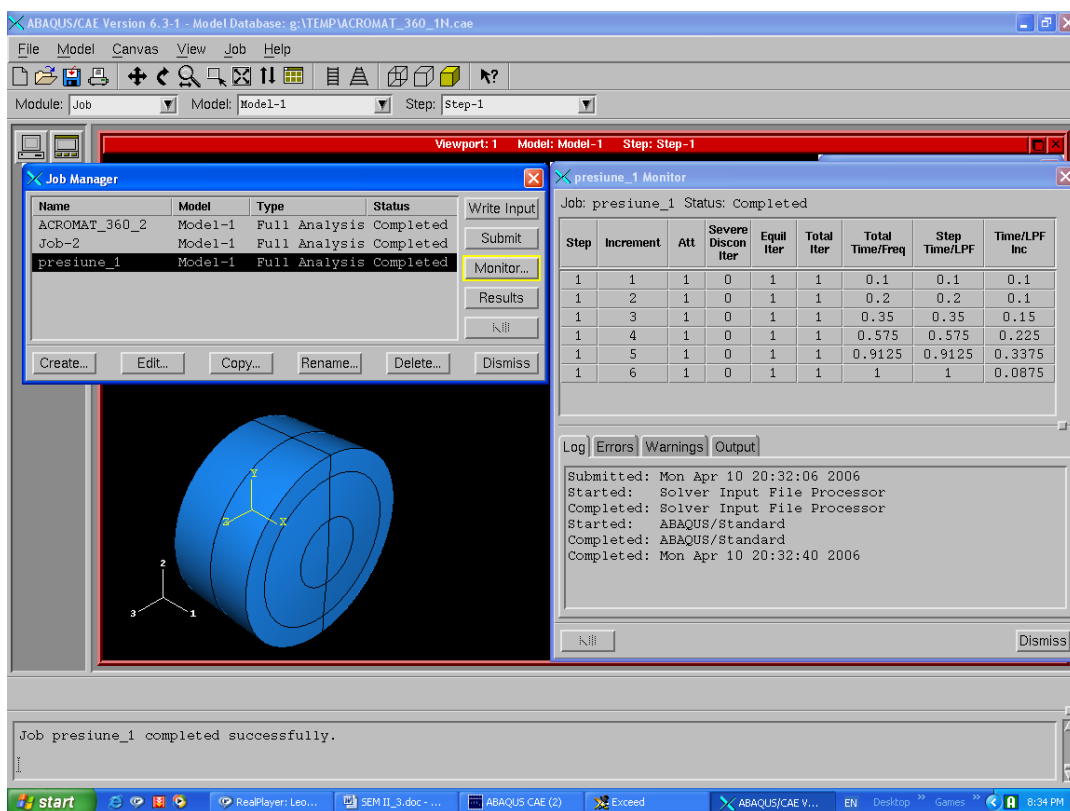


Fig. 4.14. Inițializarea și monitorizarea evoluției calculului în modulul “Job”

În modulul "Job" se inițiază analiza sistemului definit. Monitorizarea evoluției rezolvării sistemului de ecuații poate fi urmărită într-o fereastră specială, în care sunt precizate în timp real incrementul, numărul de iterații/increment și echivalentul în "timp" al realizării pasului (fig. 4.14).

În subsolul ferestrei-monitor, operatorului i se comunică date privind evoluția și problemele rezolvării sistemului, prin apelarea mesajelor care apar pe "Tab"-urile "Log", "Errors", "Warnings" și "Output".

Butonul "Results" din fereastra "Job Manager" permite trecerea la postprocesarea rezultatelor, după încheierea cu succes a rezolvării sistemului de ecuații al structurii supuse analizei.

Pe lângă vizualizarea prin intermediul interfețelor grafice, programul Abaqus permite accesarea unui fișier informativ care conține descrierea completă a tuturor operațiilor efectuate în modulele programului.

Este redată, în continuare, o secvență a secțiunii de listing aferente definirii elementelor (ELEMENT DEFINITIONS), prin: număr de ordine, tip, proprietăți de referință și numere de ordine pentru noduri.

E L E M E N T D E F I N I T I O N S

| NUMBER | TYPE | PROPERTY | NODES FORMING ELEMENT REFERENCE | | | |
|--------|------|----------|---------------------------------|------|------|-----|
| 1 | C3D4 | 1 | 66 | 65 | 53 | 258 |
| 2 | C3D4 | 1 | 66 | 67 | 285 | 54 |
| 3 | C3D4 | 1 | 274 | 300 | 96 | 95 |
| 4 | C3D4 | 1 | 65 | 258 | 52 | 53 |
| 5 | C3D4 | 1 | 65 | 52 | 258 | 257 |
| 6 | C3D4 | 1 | 65 | 257 | 64 | 52 |
| 7 | C3D4 | 1 | 273 | 297 | 93 | 92 |
| 8 | C3D4 | 1 | 271 | 294 | 89 | 88 |
| 9 | C3D4 | 1 | 271 | 295 | 89 | 294 |
| 10 | C3D4 | 1 | 271 | 89 | 295 | 263 |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| 4385 | C3D4 | 2 | 1076 | 1062 | 1103 | 846 |
| 4386 | C3D4 | 2 | 1070 | 994 | 844 | 845 |
| 4387 | C3D4 | 2 | 1070 | 1103 | 994 | 845 |
| 4388 | C3D4 | 2 | 967 | 968 | 1109 | 985 |
| 4389 | C3D4 | 2 | 967 | 1087 | 1109 | 968 |
| 4390 | C3D4 | 2 | 969 | 1109 | 968 | 985 |
| 4391 | C3D4 | 2 | 969 | 1109 | 1106 | 968 |

Urmează o secțiune dedicată caracterizării complete a nodurilor

prin: număr de ordine, coordonate și tip de condiții la limită, dacă este cazul.

N O D E D E F I N I T I O N S

| NODE NUMBER | COORDINATES | | | SINGLE POINT CONSTRAINTS | | |
|----------------|-------------|-----------|----------|--------------------------|------|-----|
| | | | | TYPE | PLUS | DOF |
| 1 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | | | |
| 2 | 1.18649E-02 | -1.2129 | 0.0000 | | | |
| 3 | 1.18649E-02 | 1.2129 | 0.0000 | | | |
| 4 | 0.19011 | -4.8516 | 0.0000 | | | |
| 5 | 0.29731 | -6.0645 | 0.0000 | | | |
| 6 | 0.29731 | 6.0645 | 0.0000 | | | |
| 7 | 0.19011 | 4.8516 | 0.0000 | | | |
| 8 | 0.42858 | -7.2774 | 0.0000 | ENCASTRE | | |
| 9 | 0.42858 | 7.2774 | 0.0000 | ENCASTRE | | |
| 10 | 0.42858 | -9.2774 | 0.0000 | ENCASTRE | | |
| 11 | 0.42858 | 9.2774 | 0.0000 | ENCASTRE | | |
| 12 | 5.1308 | -9.2774 | 0.0000 | | | |
| 13 | 5.1308 | 9.2774 | 0.0000 | | | |
| 14 | 5.9919 | -0.8580 | 0.0000 | | | |
| 15 | 6.0000 | 0.0000 | 0.0000 | | | |
| 16 | 5.9919 | 0.8580 | 0.0000 | | | |
| 17 | 5.9675 | -1.7162 | 0.0000 | | | |
| 18 | 5.9675 | 1.7162 | 0.0000 | | | |
| 19 | 5.9268 | -2.5743 | 0.0000 | | | |
| 20 | 5.9268 | 2.5743 | 0.0000 | | | |
| 21 | 5.8698 | -3.4323 | 0.0000 | | | |
| 22 | 5.8698 | 3.4323 | 0.0000 | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| . | | | | | | |
| 1099 | 7.0391 | 2.6375 | -1.1579 | | | |
| 1100 | 7.0391 | -2.6375 | -1.1579 | | | |
| 1101 | 8.2122 | 2.0207 | -4.1120 | | | |
| 1102 | 6.4347 | -8.1494 | -1.0267 | | | |
| 1103 | 8.0323 | -4.2654 | -4.5595 | | | |
| 1104 | 8.2829 | 3.8197 | -1.8064 | | | |
| 1105 | 7.0923 | -5.7869 | -1.1388 | | | |
| 1106 | 6.5633 | 0.71320 | -7.8010 | | | |
| 1107 | 6.1383 | -6.0186 | -0.86534 | | | |
| 1108 | 8.1598 | -5.9861 | -2.1121 | | | |
| 1109 | 7.9154 | 2.789E-02 | -7.7644 | | | |

În final, problema este sintetizată prin: numărul de elemente, de noduri și de variabile ale sistemului de ecuații.

P R O B L E M S I Z E

| | |
|--|------|
| NUMBER OF ELEMENTS IS | 4391 |
| NUMBER OF NODES IS | 1109 |
| NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER | 1109 |
| TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL | 3327 |

Postprocesarea rezultatelor presupune determinarea parametrilor specifici, ceruți de operator. În mod automat este calculată energia de deformație a elementelor și tensiunile von Mises (fig. 4.15).

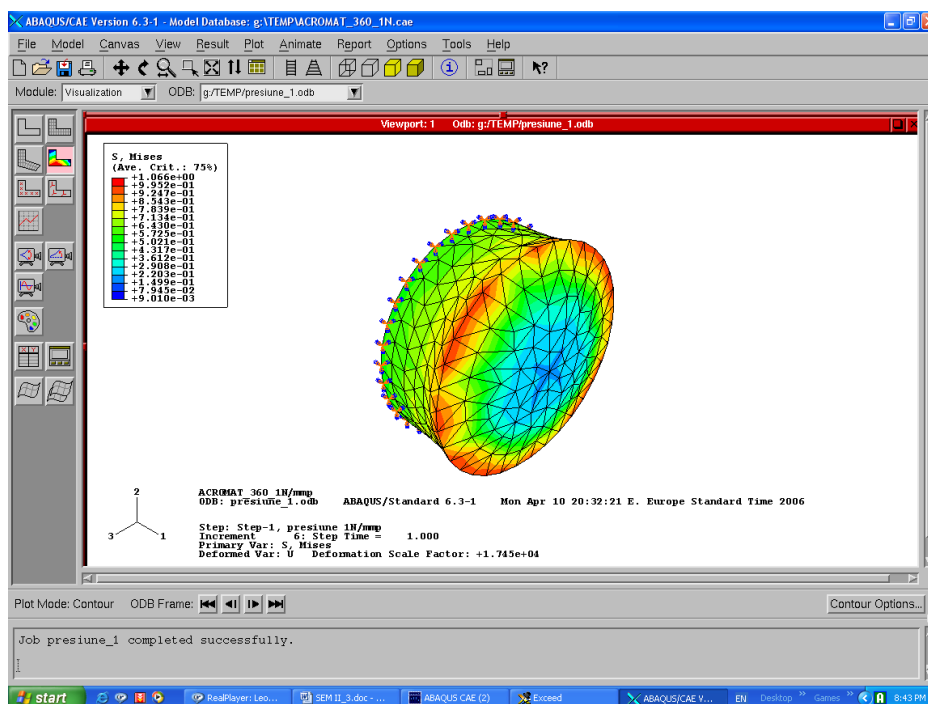


Fig. 4.15. Vizualizarea tensiunilor von Mises în modul “Vizualization”

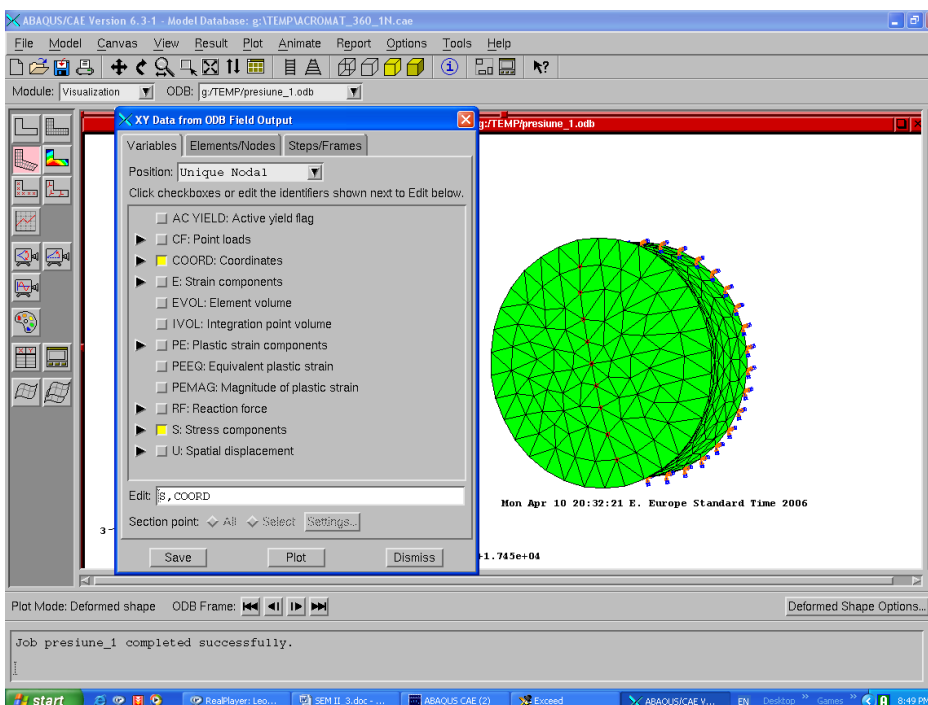


Fig. 4.16. Exemplu de postprocesare prin impunerea calculului coordonatelor nodale globale și a componentelor de tensiune în modul “Vizualization”

Pentru alte date se apelează subrutine dedicate, care cer specificarea elementelor sau nodurilor de interes și mărimile de determinat. În figura 4.16, de exemplu se impune calculul componentelor de tensiune și al coordonatelor în stare deformată.

În figura 4.17 este detaliată cerința prin indicarea tensiunilor von Mises.

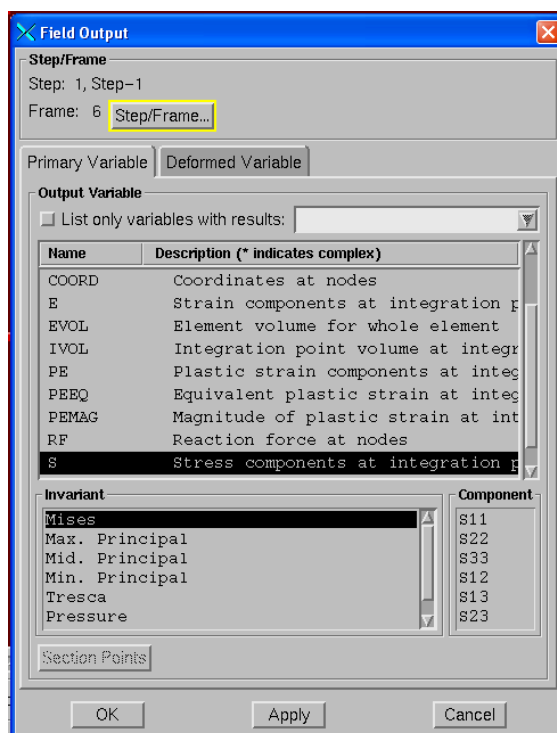


Fig. 4.17. Fereastră de detaliere a cerinței privind componentele de tensiuni

În figurile 4.18 și 4.19 sunt prezentate figurile aferente ferestrelor prin care se impune calculul coordonatei x , corespunzătoare axei optice și deplasărilor nodale pe aceeași direcție.

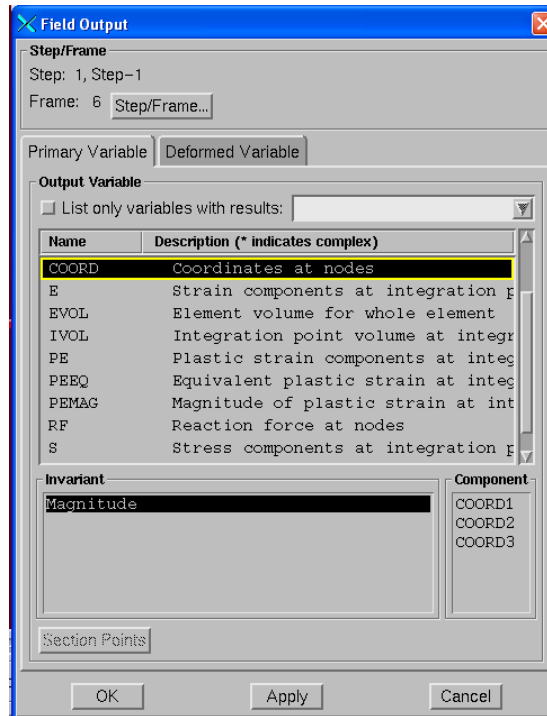


Fig. 4.18. Detalierea cerinței privind afișarea coordonatelor nodale

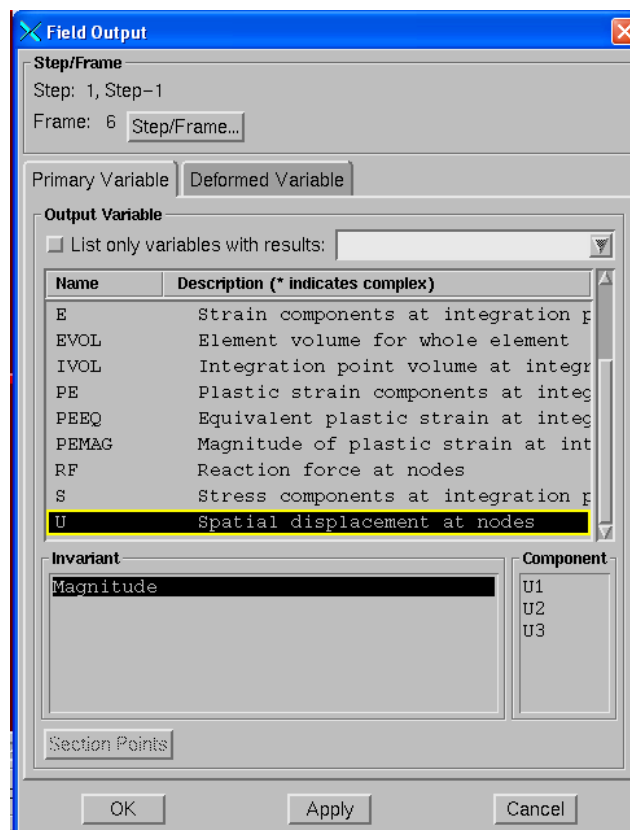


Fig. 4.19. Detalierea cerintelor privind afișarea deplasărilor nodale

Ca rezultat imediat al acestor cerințe se obțin rezultate grafice,

contituite de reprezentări ale sistemului deformat (fig. 4.20), având atașată o scară cromatică sau valori numerice, pe noduri sau seturi predefinite de noduri, în secțiunea "Text" din subsolul ferestrei.

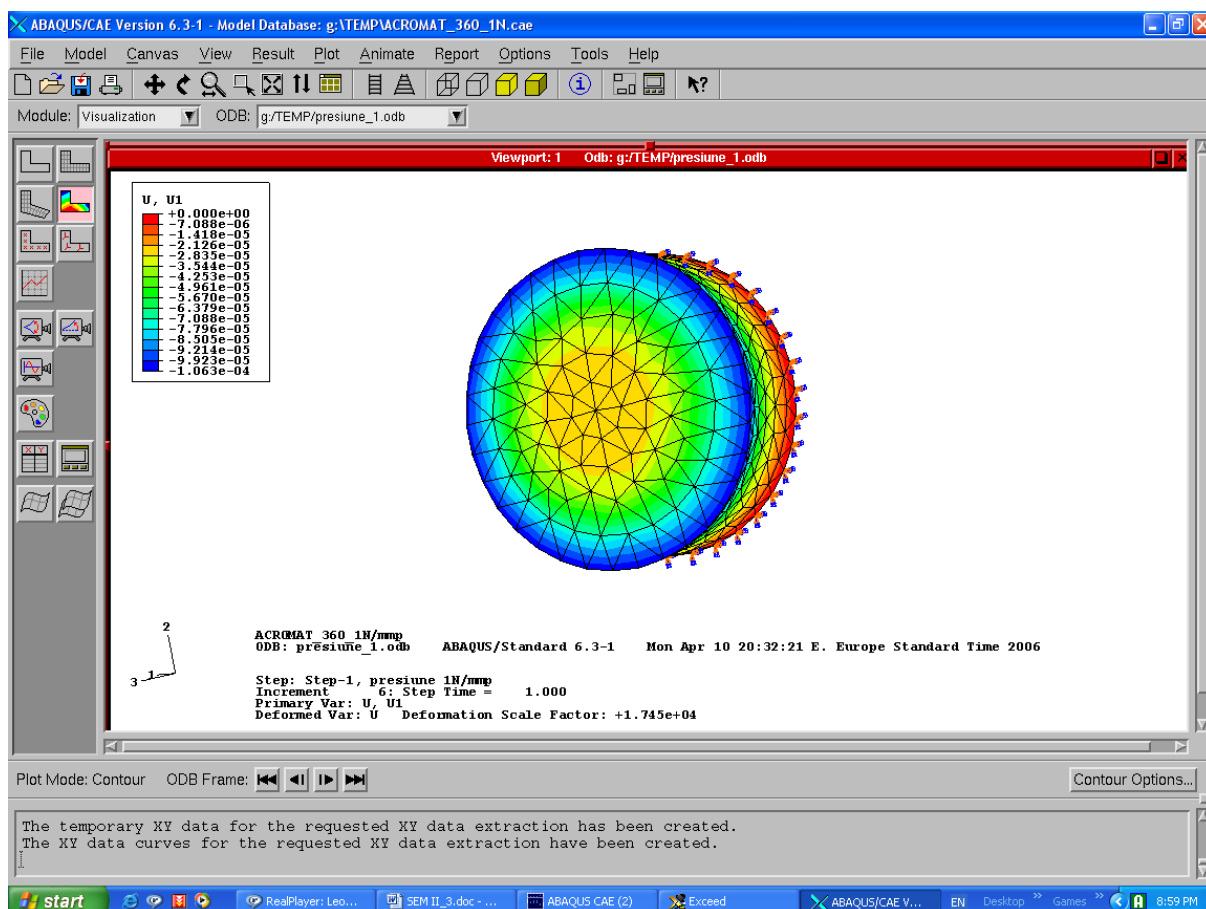


Fig. 4.20. Rezultate grafice obținute în urma postprocesării ca urmare a cerințelor formulate de operator

4.6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

În capitolul al patrulea al tezei sunt rezumate fundamentele teoretice ale metodei elementului finit și particularitățile metodei aplicate problemelor de elasticitate specifice structurilor mecanice.

Partea fundamentală care urmează a fi utilizată în analiza sunansamblurilor optomecanice este dezvoltată numai pe direcția formulată în capitolele anterioare, respectiv se referă la analiza stării triaxiale de tensiune și deformație și, având în vedere formele particulare ale componentelor de tip lentilă, conduce demersul descriptiv al rezolvării unei probleme de elasticitate cu ajutorul elementelor finite liniare

tetraedrice.

Pentru problema analizei lentilelor fixate în monturi, care face obiectul tezei, se propune utilizarea programului specializat Abaqus, a cărei descriere este concepută ca prezentare pe etape, a unui exemplu concret.

Printre contribuțiile originale prezente în capitol se pot enumera:

- identificarea algoritmilor de calcul, care se încadrează, în general, în clasa de largă cuprindere a metodei elementului finit, adecvați rezolvării problemelor de elasticitate aplicate structurilor mecanice
- alegerea elementului finit tetraedric, ca fiind cel mai potrivit din punct de vedere al formei geometrice și modelării matematice pentru discretizarea componentelor tridimensionale de tipul lentilelor
- rularea programului Abaqus pe un exemplu ilustrativ pentru evidențierea modului de lucru și a facilităților privind modelarea structurii și postprocesarea rezultatelor.

BIBLIOGRAFIE

[D4], [D5], [G18], [G19], [H3], [J2], [L2], [O3], [O4], [P10], [S2], [T2], [T5], [Z2], [W14], [W22]

5. ANALIZA NUMERICĂ A STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A SUBANSAMBLURILOR OPTOMECHANICE IDEALE (FĂRĂ ERORI DE MONTAJ)

5.1. SINTEZA UNUI DUBLET ACROMAT LIMITAT LA DIFRAȚIE

Pentru a realiza o analiză relevantă a stării de tensiune și deformație a componentelor optice montate într-un tub mecanic, în scopul punerii în evidență a influenței solicitărilor mecanice asupra calității imaginii, se pune problema stabilirii subansamblului optic care să fie supus analizei. S-au luat în considerare următoarele aspecte:

- sistemul optic trebuie să fie de cea mai bună calitate (limitat la difracție)
- analiza influenței stării de tensiune și deformație urmărește să ofere posibilitatea elaborării unor recomandări privind forțele admisibile de apăsare a pieselor optice, în condițiile prezervării caracterului limitat la difracție al sistemului optic
- subansamblul optic analizat trebuie să fie suficient de complex pentru a asigura reprezentativitate pentru o gamă cât mai largă de sisteme optice; în același timp este de preferat alegerea unei structuri cât mai simple, astfel încât să se evite consumul excesiv de timp de calcul și de memorie a sistemului de calcul.

Având în vedere cele de mai sus se pune în discuție alegerea ca model de subansamblu optic reprezentativ a uneia dintre entitățile de bază din structura sistemelor optice – lentila singulară, dubletul lipit, tripletul lipit – sau o combinație a acestora.

Lentila singulară este exclusă ca element adecvat de analiză având în vedere faptul că nu poate constitui o componentă limitată la difracție. Prima structură, în ordinea complexității, care îndeplinește această condiție este dubletul lipit. Din punct de vedere al răspunsului la solicitări mecanice, dubletul lipit și tripletul lipit pot fi considerate la același nivel de relevanță, având în vedere faptul că legătura dintre lentilele cu suprafețe conforme se modelează similar, printr-o interacțiune de tip "tie", care conservă coincidența inițială a nodurilor aparținând suprafețelor lipite. Despre sistemele mai complexe, alcătuite din combinații de lentile singulare, dublete sau/și triplete, se poate spune că reprezintă structuri cu caracter redundant din punct de vedere mecanic. Construcția tubului mecanic prevede sprijinirea axială a primei componente din sistem, distanțiere metalice între elementele din interiorul acestuia și exercitarea forței de apăsare pentru fixarea șirului de componente prin inelul filetat care vine în contact cu ultimul element al acestui șir.

În aceste condiții, se consideră necesară și suficientă abordarea analizei unui sistem optomecanic la care partea optică este constituită dintr-un dublet lipit. Acesta, din punct de vedere optic, poate fi limitat la difracție, iar din punct de vedere mecanic, pune în evidență atât legătura prin lipire a lentilelor, cât și efectele fixării în montură la contactul lentilă-montură și lentilă-inel filetat.

S-a procedat la proiectarea unui dublet acromat, [G3], [G15], [K1], reprezentativ pentru construcția sistemelor optice. S-a ales o pereche de materiale compatibile frecvent utilizată (BK7-SF5, catalog Schott), o soluție constructivă Fraunhofer (lentila convergentă, respectiv sticla crown în față) și caracteristici de referință standard ($f'=100$ mm, apertură caracterizată prin numărul de deschidere $f/7$, câmp unghiular obiect 5°).

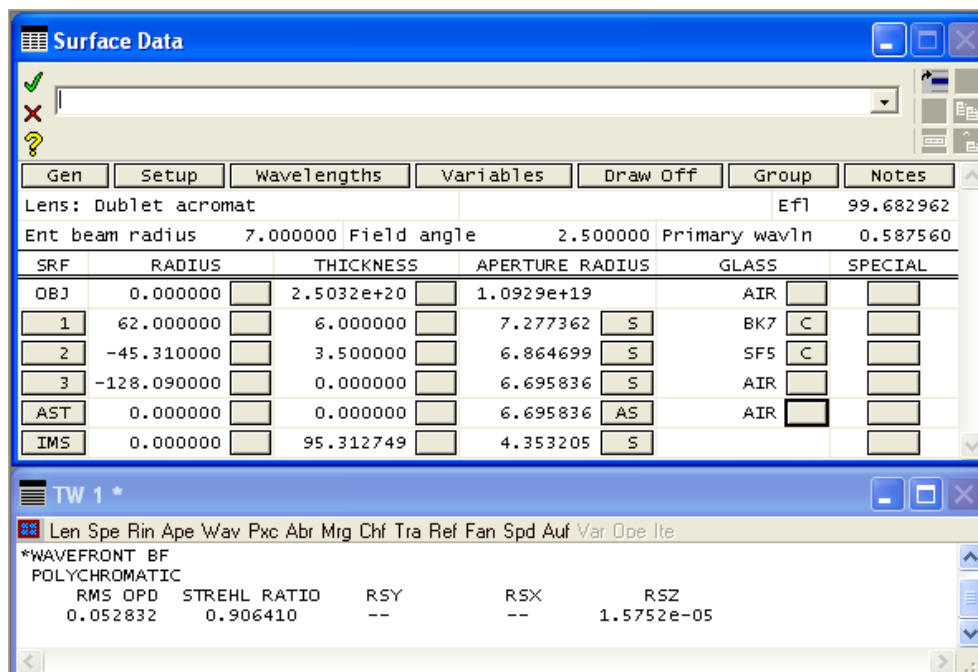


Fig. 5.1. Fereastra Surface Data a dubletului proiectat

Dubletul acromat rezultat în urma aplicării algoritmilor de sinteză a fost analizat cu ajutorul programului OSLO LT. În figura 5.1 este redată fereastra Surface Data, care conține caracteristicile geometrice ale subsansamblului (raze și grosimi la centru), sorturile de sticlă, distanța focală ($Efl = 99.68 \text{ mm}$), frontifocala imagine optimizată prin defocusare ($s'_F = 95.31 \text{ mm}$). În fereastra adiacentă TW1* sunt redați parametrii sintetici rezultați din analiza statistică a frontului de undă. Se observă că $RMS \text{ OPD} = 0.052\lambda$ și raportul Strehl = 0.906, astfel încât sistemul se încadrează în cea mai bună categorie de calitate a imaginii.

Rezultatele analizei sunt sintetizate în figurile 5.2...5.4, care conțin aberațiile reziduale (fig.5.2), PSF (fig. 5.3), MTF și PTF (fig. 5.4) și confirmă clar caracterul limitat la difracție al sistemului.

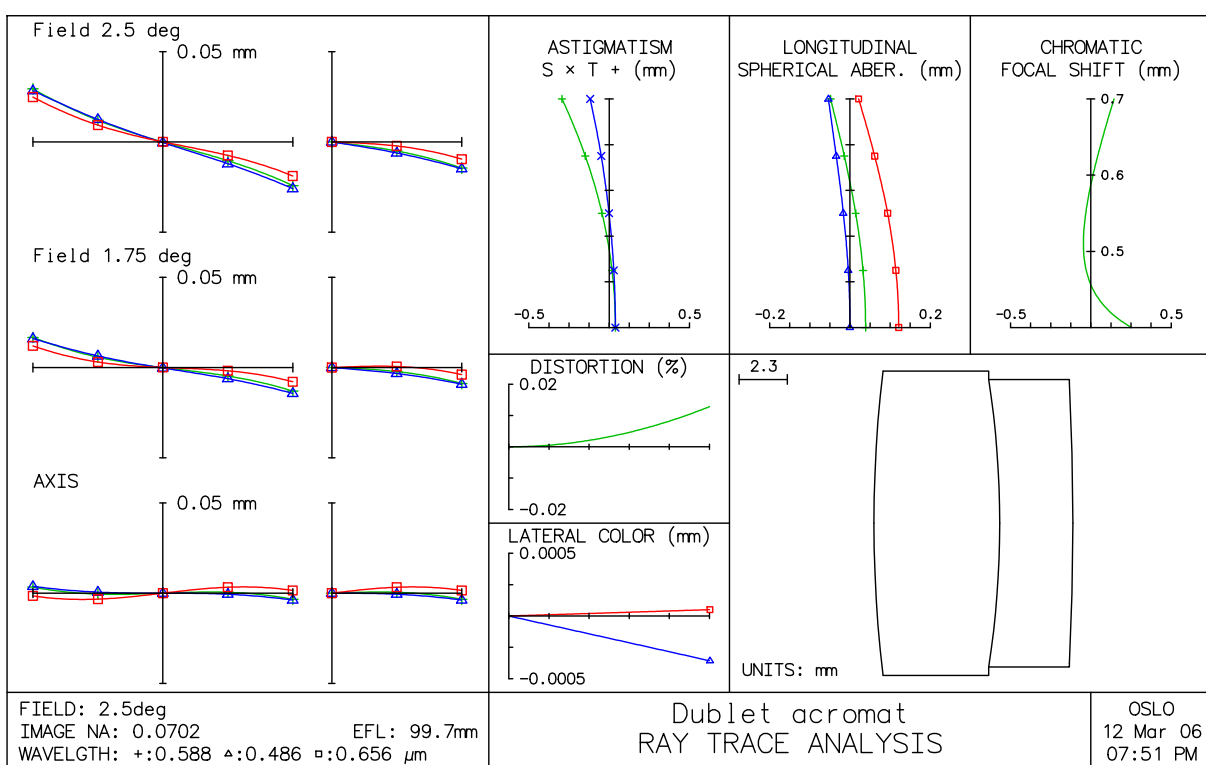


Fig. 5.2. Aberațiile reziduale ale dubletului acromat

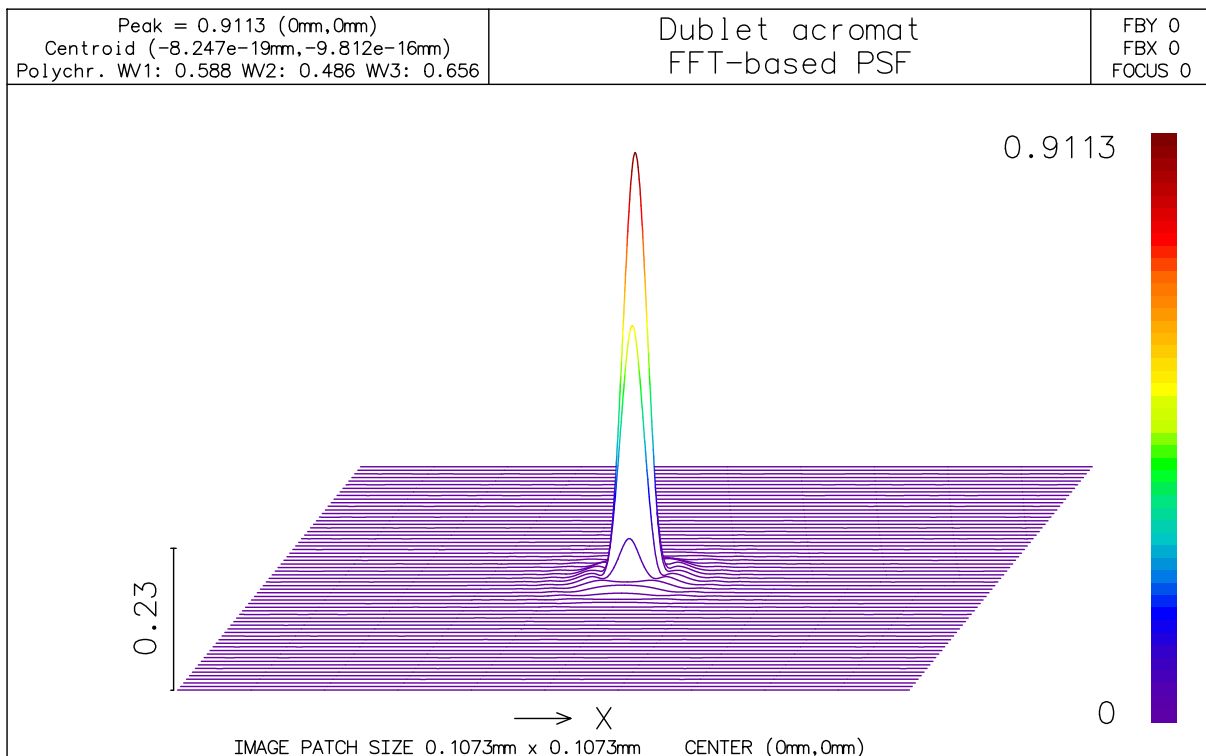


Fig. 5.3. Funcția imagine a punctului (PSF) a dubletului acromat

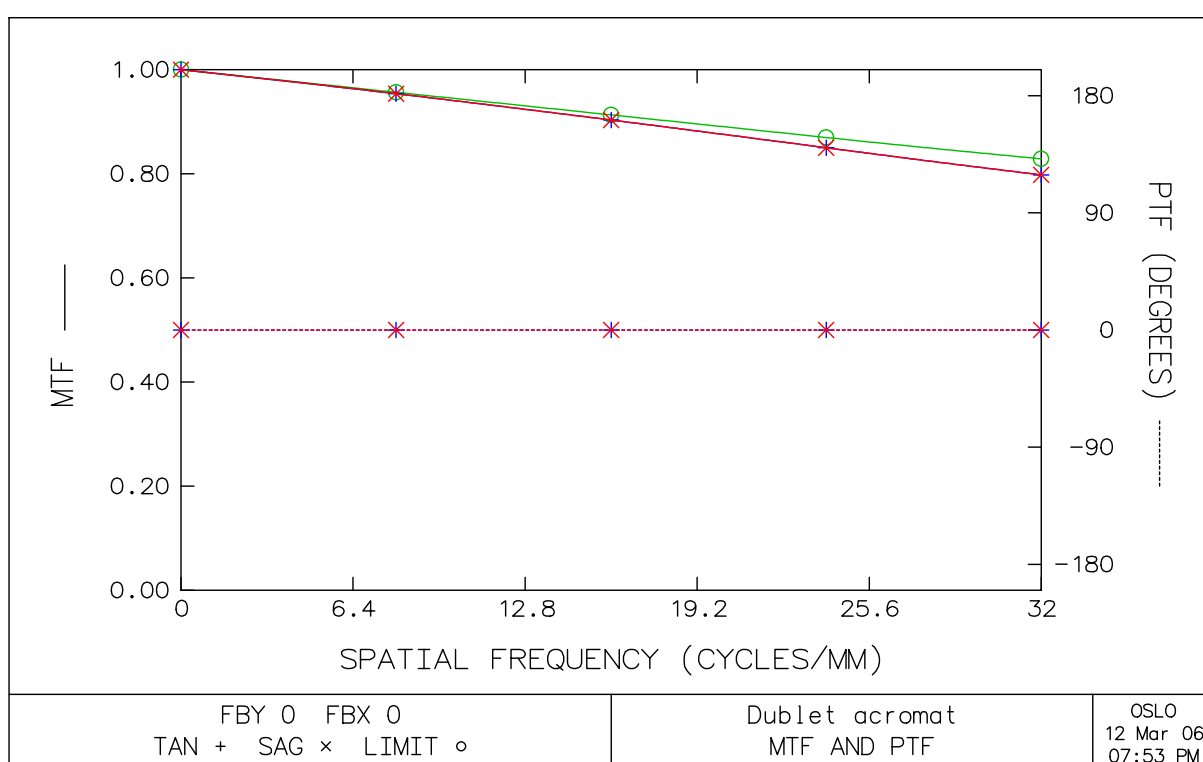


Fig. 5.4. Funcția optică de transfer de modulație (MTF) și de fază (PTF) a dubletului acromat

5.2. MODELAREA ȘI SIMULAREA ANSAMBLULUI OPTOMECANIC PRIN MEF. BIREFRINGENȚA ȘI VARIAȚIA MĂRIMII CÂMPULUI VIZUAL CARACTERIZAT PRIN LINIARITATE

5.2.1. Analiza modelului sistemului optomecanic în programul Abaqus pe baza structurii generate în AutoCAD

Geometria dubletului, obținută prin sinteză bazată pe algoritmi optici, a fost convertită într-un model numeric, stocat într-un fișier de grafică vectorială. Schița subansamblului conține reprezentările 3D ale pieselor componente. O secțiune meridiană (plană și axonometrică), conținând lentila convergentă (roșu), lentila divergentă (albastru), inelul filetat (verde) și corpul monturii (gri) este reprezentată în figura 5.5.

Întrucât starea de tensiune și deformație a componentelor mecanice este irelevantă pentru studiul propus – strict legat de calitatea imaginii – s-a procedat la modelarea subansamblului optic și înlocuirea pieselor mecanice prin interacțiunile cu acesta.

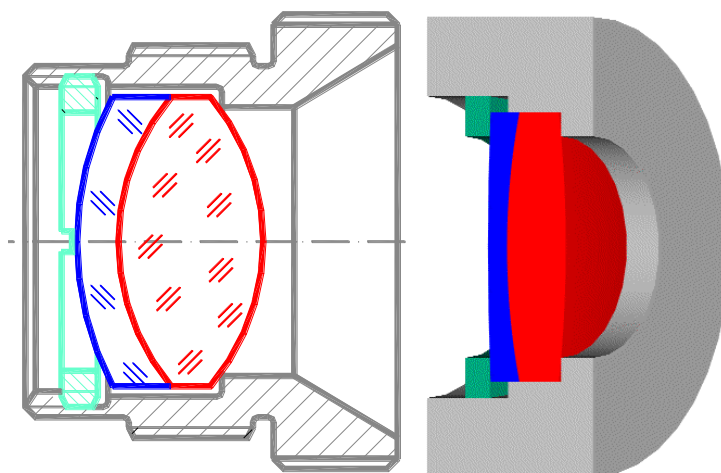


Fig. 5.5. Secțiune meridiană CAD a subansamblului optomecanic format din dublet, inel filetat și corpul monturii

Cele două lentile au fost salvate ca modele solide generate în AutoCAD, cu extensia *.sat, care este compatibilă cu filtrele modulului de import al graficii în Abaqus. Cele două lentile, convergentă și divergentă au fost declarate ca părți distincte, cărora li s-au atribuit proprietăți inițiale de omogenitate și izotropie, comportament elastic caracterizat prin constantele: $E=8.2 \cdot 10^7$ MPa, $\nu=0.206$ (pentru sortul BK7) și $E=5.6 \cdot 10^7$ MPa, $\nu=0.233$ (pentru sortul SF5). Coeficienții tensiunii optice au valorile $k=2.77 \cdot 10^{-6}$ mm²/N, respectiv $k=2.99 \cdot 10^{-6}$ mm²/N.

Modelul 3D solid în reprezentare axonometrică, respectiv o vedere laterală în stilul wireframe al dubletului discretizat cu elemente tetraedrice, sunt prezentate în figura 5.6.

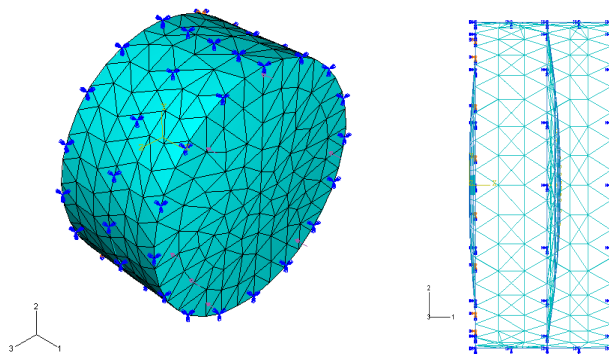


Fig. 5.6. Modelul 3D solid și wireframe al dubletului cu evidențierea rețelei de discretizare în elemente tetraedrice

Pe figură se pot observa și condițiile la limită impuse structurii. Lipirea lentilelor a fost modelată printr-o legătură de tip "tie", care obligă modulul "Mesh" să genereze o rețea de discretizare astfel încât nodurile elementelor aparținând celor două lentile, noduri aflate pe suprafața comună, să fie coincidente atât faza inițială, cât și pe tot parcursul evoluției modelului. Acest tip de legătură simulează de fapt nu numai lipirea inițială, ci și păstrarea acesteia sub acțiunea solicitărilor exterioare (lentilele sunt împiedicate să se comporte ca entități separate, ca urmare a acceptării ipotezei că stratul de adeziv nu se foarfecă).

Rezemarea lentilei convergente pe umărul monturii este modelată prin suprimarea tuturor gradelor de libertate ale nodurilor aflate pe suprafața de contact sticlă-metal. Deplasările nodurilor aparținând suprafeței cilindrice exterioare nu au fost nici impuse, nici interzise, acceptând ipoteza că valorile lor sunt mai mici sau mult mai mici decât jumătatea jocului, care este de ordinul sutimilor de milimetru, astfel încât, pe direcție radială s-a admis caracterul liber al deplasărilor.

Forța de apăsare a inelului filetat a fost modelată prin aplicarea unei presiuni constante pe suprafața de contact lentilă divergentă - inel filetat (fig. 5.7). Ca valoare numerică s-a considerat relevantă presiunea de contact și nu forța de apăsare normală sau momentul de strângere al inelului filetat. Forța normală depinde de mărimea ariei de contact și de dimensiunile de gabarit radial al ansamblului. De asemenea, momentul de strângere a inelului filetat, este proporțional cu diametrul acestuia. În acest sens, valorile absolute ale forței sau momentului ca solicitări aplicate componentelor optice sunt variabile și irelevante pentru concluzii generale privind starea de tensiune și deformație admisă.

Aplicarea încărcării sub forma presiunii are la bază și ipoteza suplimentară că aria de contact este suficient de extinsă pentru a considera contactul nehertzian. Deși teoretic contactul inel-lentilă este liniar, practic se consideră că prelucrarea teșiturii piesei metalice și suprafața curbă a lentilei asigură o suprafață inelară de contact finită. În acest caz, efectul de concentrator local de tensiune nu a constituit obiect

de studiu. Omiterea acestui aspect are acoperire cel puțin prin faptul că presiunile de contact au valori foarte reduse și având în vedere interesul orientat, cu precădere, spre zona activă, liberă a lentilei.

S-au realizat rulări ale programului pentru valori ale presiunii $p=2\text{MPa}$, 5MPa și 10MPa .

Se prezintă, în continuare, rezultatele simulărilor pentru cele trei valori ale presiunii de contact.

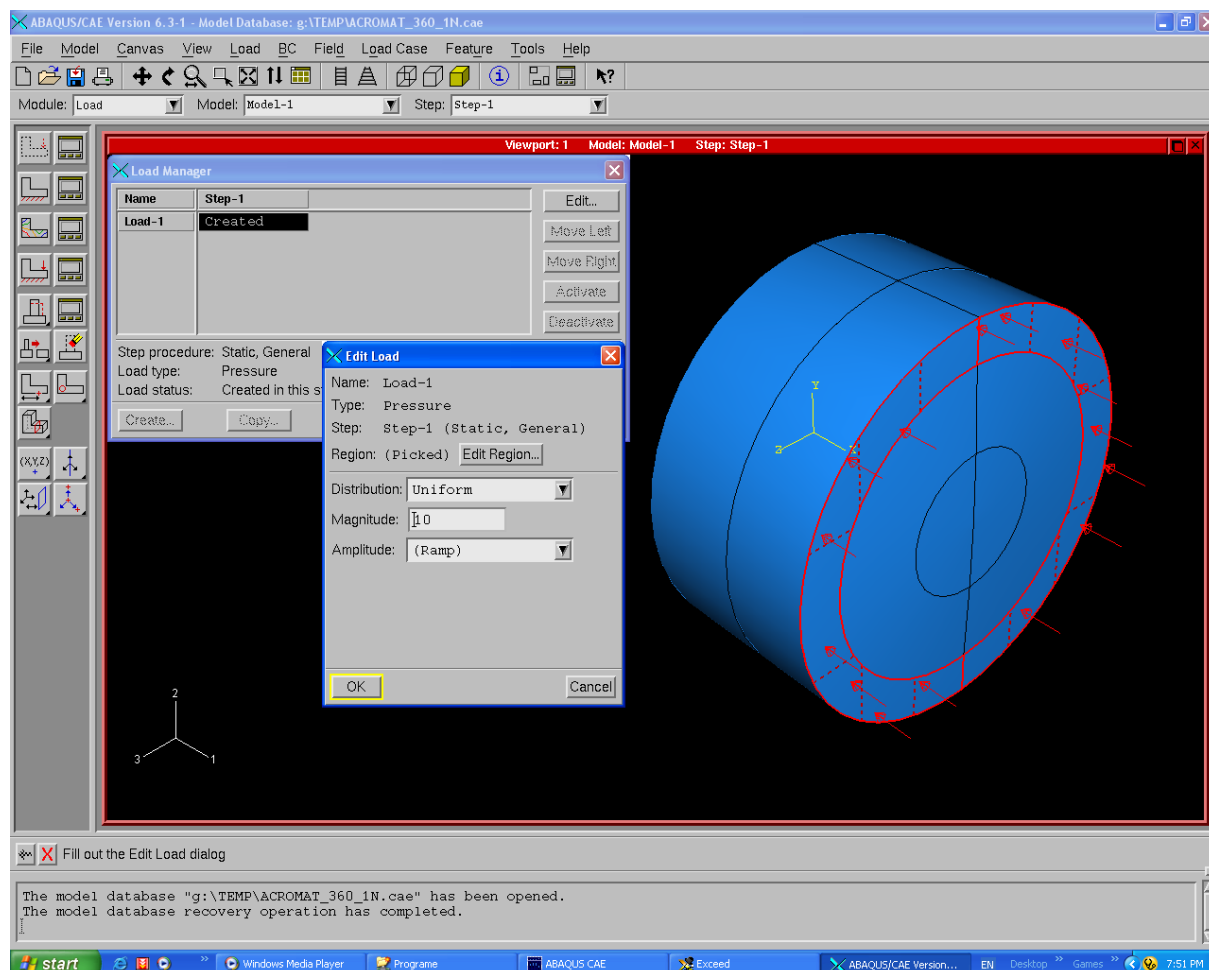


Fig. 5.7. Simularea încărcării prin aplicarea unei presiuni pe suprafața de contact lentilă divergentă – inel filetat

□ presiunea de contact $p = 2 \text{ MPa}$

În figurile 5.8 și 5.9 este redată variația tensiunilor von Mises în reprezentări care conțin structura deformată și astfel încât să fie pusă în evidență lentila convergentă (fig. 5.8), respectiv lentila divergentă (fig.

5.9). Fișierele grafice importate conțin scări cromatice, care, convențional, de la roșu spre albastru, indică tensiuni în ordine descrescătoare.

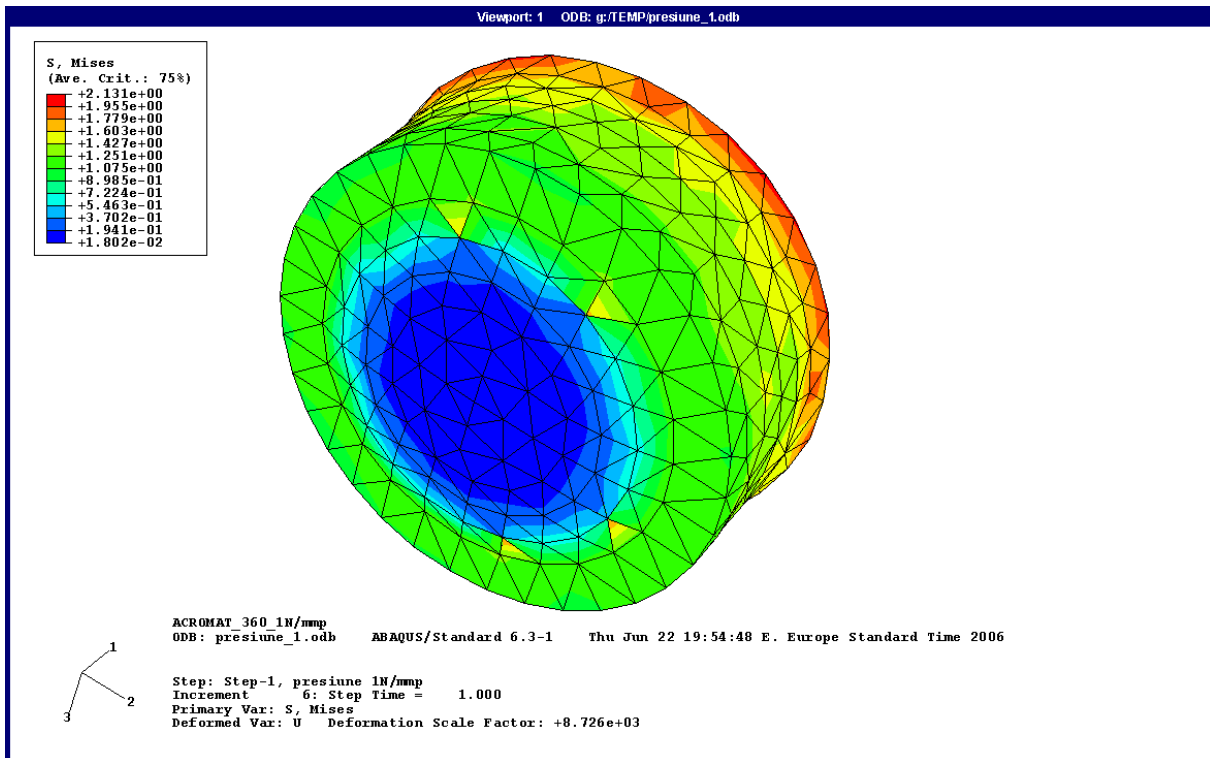


Fig. 5.8. Variația tensiunilor von Mises pentru lentila convergentă

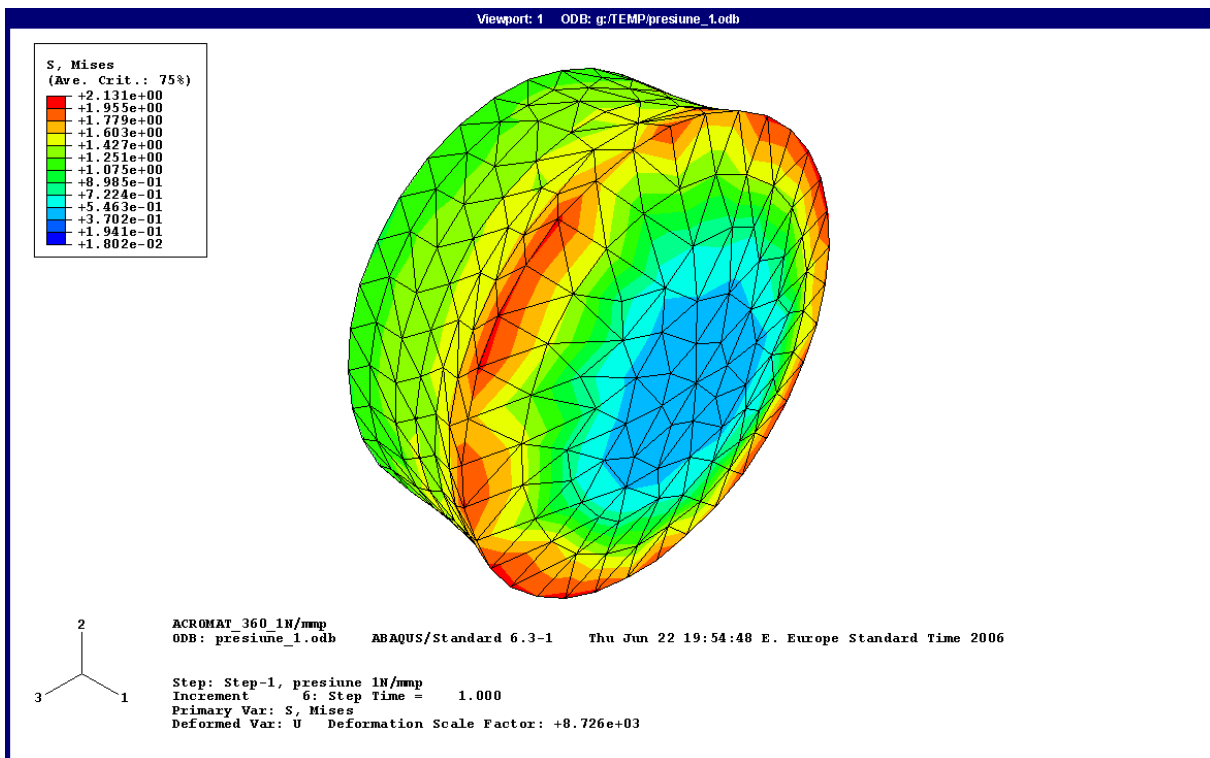


Fig. 5.9. Variația tensiunilor von Mises pentru lentila divergentă

Se observă că tensiunile maxime se înregistrează în vecinătatea zonei de contact a lentilei divergente. Până la axa optică, acestea scad cu un ordin de mărime. Variația tensiunilor pentru lentila convergentă are aceeași alură, cu observația că valorile maxime, aferente contactului cu montura reprezintă doar jumătate din cele ale lentilei divergente.

În figura 5.10 se poate urmări mai clar modul în care are loc deformația componentelor optice. Reprezentarea are un caracter pur calitativ. Factorul de scară al deplasărilor este mult mai mare (8726:1 în figura 5.10) decât scara la care sunt trasate liniile de gabarit. Disproporția scărilor are ca scop exclusiv punerea în evidență a modului în care se deformează diverse zone ale ansamblului.

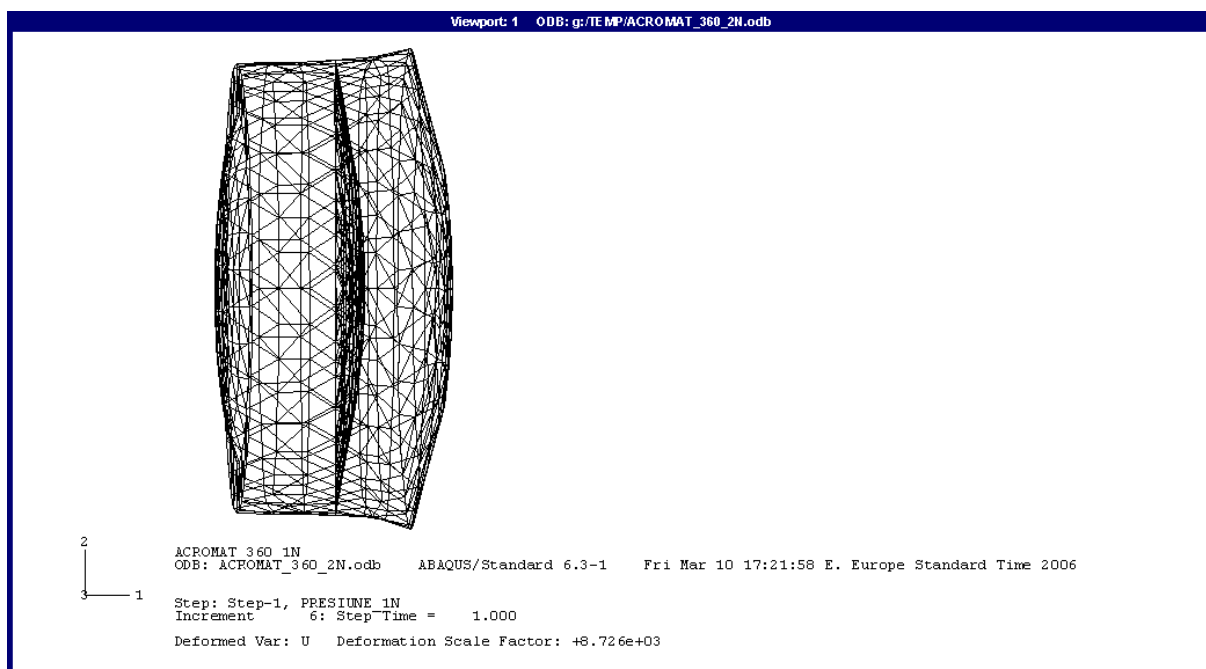


Fig. 5.10. Deplasările totale ale lentilelor dubletului

Studiul structurii deformate sugerează faptul că operația de montaj a condus la o comprimare în zona marginală și o întindere în zona centrală pentru ambele lentile, preponderent pe direcții paralele cu axa optică. Această observație este confirmată de variația componentei σ_x ilustrată în figura 5.11 pentru lentila convergentă și în figura 5.12 pentru lentila divergentă. Aceste tensiuni au valori maxime aproximativ egale cu presiunea aplicată.

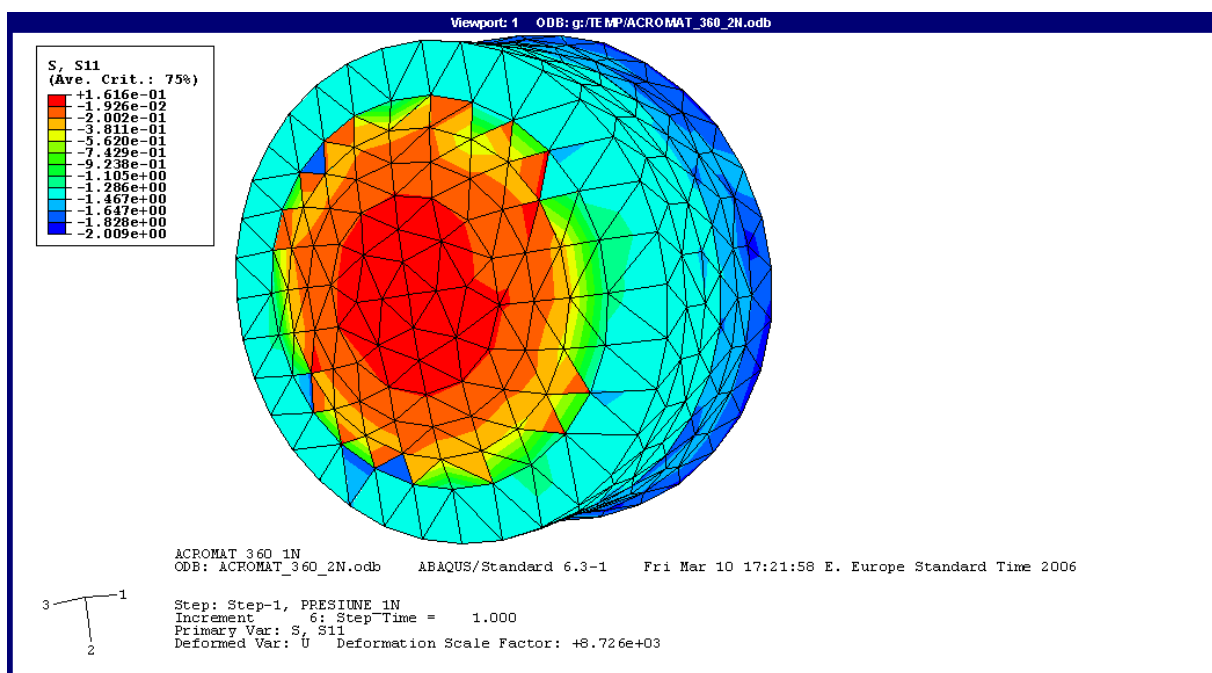


Fig. 5.11. Variația tensiunii σ_x pentru lentila convergentă

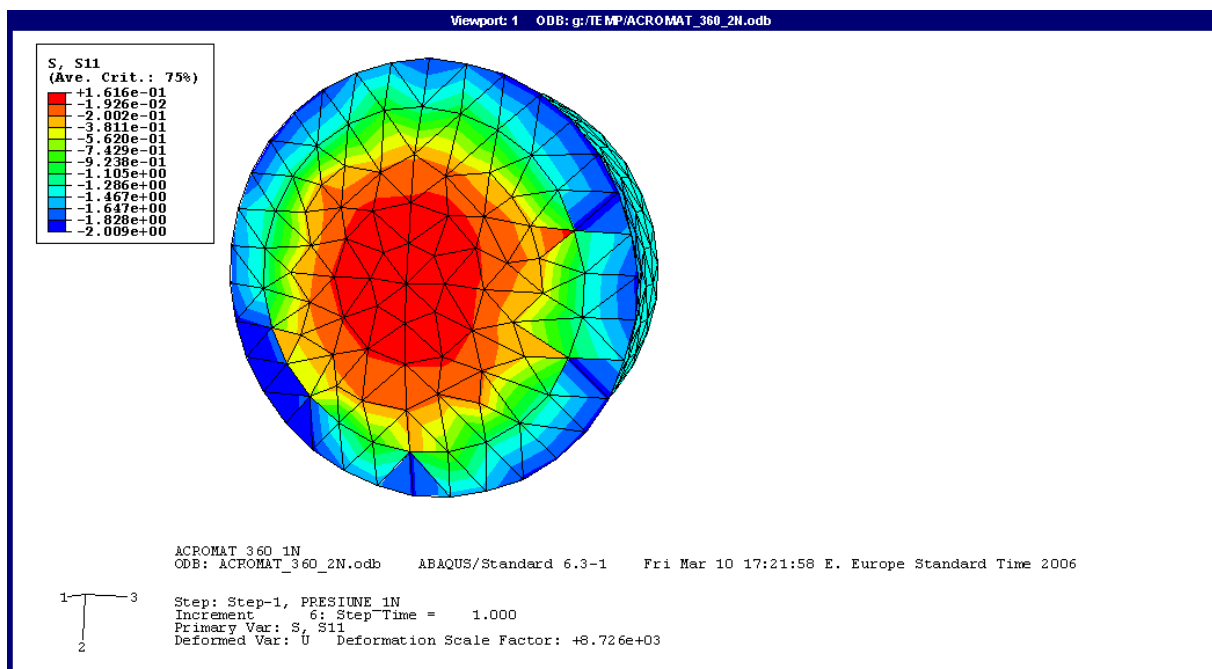


Fig. 5.12. Variația tensiunii σ_x pentru lentila divergentă

Pentru a pune în evidență deformația suprafeței sferice a lentilei convergente s-a creat un set de noduri aparținând unui plan de partiționare meridian (nodurile de interes sunt marcate cu roșu în figura 5.13.)

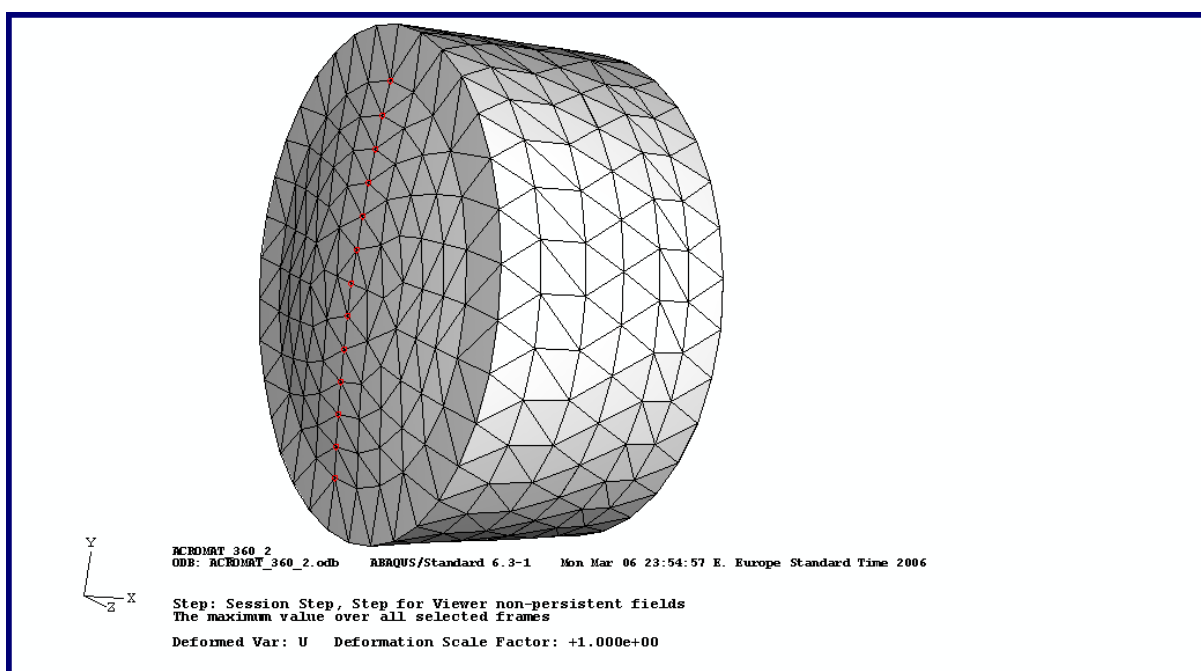


Fig. 5.13. Setul de noduri care definesc generatoarea suprafeței deformate a lentilei convergente

Pentru aceste noduri s-au extras datele numerice prezentate în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

| ID NOD | X₀ | ΔX_{2MPa} | X_{2MPa} | ΓCERC |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 9 | 4.28578E-01 | 0.00000E+00 | 4.28578E-01 | 62.00 |
| 6 | 2.97308E-01 | -3.26300E-05 | 2.97275E-01 | 62.00 |
| 7 | 1.90112E-01 | -4.35500E-05 | 1.90068E-01 | 62.00 |
| 32 | 1.06866E-01 | -4.79900E-05 | 1.06818E-01 | 62.00 |
| 30 | 4.74734E-02 | -4.98700E-05 | 4.74235E-02 | 62.00 |
| 3 | 1.18649E-02 | -5.01800E-05 | 1.18147E-02 | 62.00 |
| 1 | 0.00000E+00 | -5.04750E-05 | -5.04750E-05 | 62.00 |
| 2 | 1.18649E-02 | -5.01500E-05 | 1.18148E-02 | 62.00 |
| 29 | 4.74734E-02 | -4.95600E-05 | 4.74238E-02 | 62.00 |
| 31 | 1.06866E-01 | -4.76300E-05 | 1.06818E-01 | 62.00 |
| 4 | 1.90112E-01 | -4.32800E-05 | 1.90069E-01 | 62.00 |
| 5 | 2.97308E-01 | -3.23300E-05 | 2.97276E-01 | 62.00 |
| 8 | 4.28578E-01 | 0.00000E+00 | 4.28578E-01 | 62.00 |

Numerele de ordine ale nodurilor sunt cele aferente generării automate a structurii. În coloanele 1, 2 și 3 sunt indicate valorile

coordonatei inițiale a nodului (pe direcția x, paralelă cu axa optică), a deplasării pe direcția x și coordonata nodului pe generatoarea deformată. Pe ultima coloană, este trecută, ca element de verificare a gradului de rafinare a rețelei de discretizare, raza cercului inițial, corespunzător suprafeței sferice nominale. Urmărind această coloană se constată că mărimea elementelor a fost aleasă suficient de mică, pentru ca raza cercului reconstruit având ca puncte de precizie nodurile rețelei să coincidă cu cea nominală cel puțin până la a doua zecimală. În aceste condiții, rezultatele simulării primesc confirmarea credibilității.

În tabelul 5.2 sunt redate coordonatele y ale suprafeței inițiale și respectiv deformate.

Tabelul 5.2

| ID NOD | Y₀ | ΔY_{2MPa} | Y_{2MPa} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 9 | 7.27736E+00 | 0.00000E+00 | 7.27736E+00 |
| 6 | 6.06477E+00 | 5.72200E-06 | 6.06478E+00 |
| 7 | 4.85157E+00 | -4.29100E-06 | 4.85157E+00 |
| 32 | 3.63868E+00 | -1.90700E-06 | 3.63868E+00 |
| 30 | 2.42579E+00 | 7.15200E-07 | 2.42579E+00 |
| 3 | 1.21289E+00 | 1.19200E-07 | 1.21289E+00 |
| 1 | 0.00000E+00 | -8.68400E-08 | -8.68400E-08 |
| 2 | -1.21289E+00 | -3.57600E-07 | -1.21289E+00 |
| 29 | -2.42579E+00 | -7.15200E-07 | -2.42579E+00 |
| 31 | -3.63868E+00 | -2.14500E-06 | -3.63868E+00 |
| 4 | -4.85157E+00 | -4.76800E-06 | -4.85157E+00 |
| 5 | -6.06447E+00 | -7.15200E-06 | -6.06448E+00 |
| 8 | -7.27736E+00 | 0.00000E+00 | -7.27736E+00 |

Se observă faptul că deplasările pe y au valori suficient de mici ca să poată fi considerate nesemnificative. Pe direcția x însă, deplasările sunt cu două ordine de mărime mai mari, au valori simetrice în raport cu axa optică și sunt negative. Rezultă că simetria de rotație se păstrează, dar forma curbei generatoare, având în vedere caracterul convex al dioptrului, este ușor alungită față de arcul de cerc inițial.

Determinarea constantei conice de aproximare a generatoareii asferice s-a realizat utilizând ecuația generală a conicelor:

$$x = \frac{y^2 cv}{1 + \sqrt{1 - y^2 cv^2 (k + 1)}}, \quad (5.1)$$

unde cv este curbura cercului osculator în vârful dioptrului (inversul razei nominale a dioptrului),

k – constanta conice.

Tabelul 5.3

| X_{2MPa} | Y_{2MPa} | k |
|-------------|-------------|-------|
| -5.0475E-05 | -8.6840E-08 | -0.69 |
| 1.1815E-02 | -1.2129E+00 | |
| 4.7424E-02 | -2.4258E+00 | |
| 1.0682E-01 | -3.6387E+00 | |
| 1.9007E-01 | -4.8516E+00 | |
| 2.9728E-01 | -6.0645E+00 | |
| 4.2858E-01 | -7.2774E+00 | |

Cu ajutorul valorilor numerice s-au calculat constante k pentru fiecare pereche de coordonate. În tabelul 5.3 sunt prezentate perechile de coordonate și valoarea medie a constantei conice.

Valoarea negativă și mai mică decât unitatea în valoare absolută indică o conică de tip elipsă.

Ecuția analitică a elipsei generatoare a dioptrului deformat, scrisă în raport cu un sistem de referință ortogonal având originea în vârful dioptrului nominal, este:

$$x = \frac{y^2}{62 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{0.31y^2}{62^2}} \right)}. \quad (5.2)$$

Într-o formă grafică (fig. 5.14) este reprezentat arcul de elipsă al suprafeței deformate.

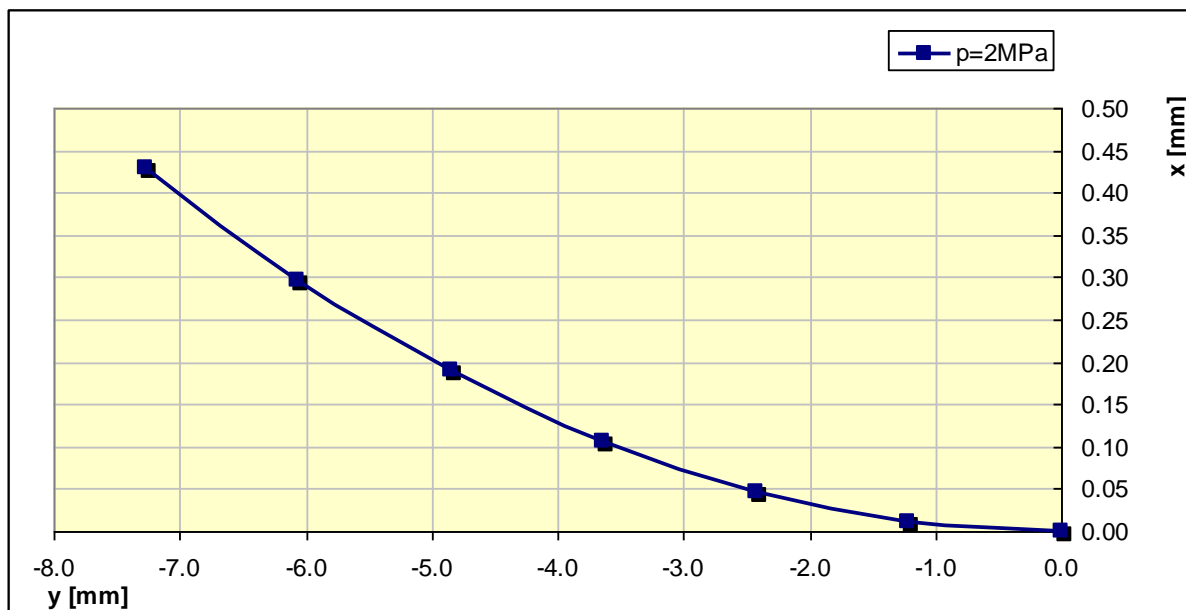


Fig. 5.14. Curba generatoare a suprafeței deformate pentru dioptrul exterior al lentilei convergente

Datorită simetriei geometrice și de încărcare deplasările pe direcția axei z sunt ne semnificative (de ordinul $10^{-8} \dots 10^{-9}$). Arcul generator își păstrează poziția în plan meridian și după deformare.

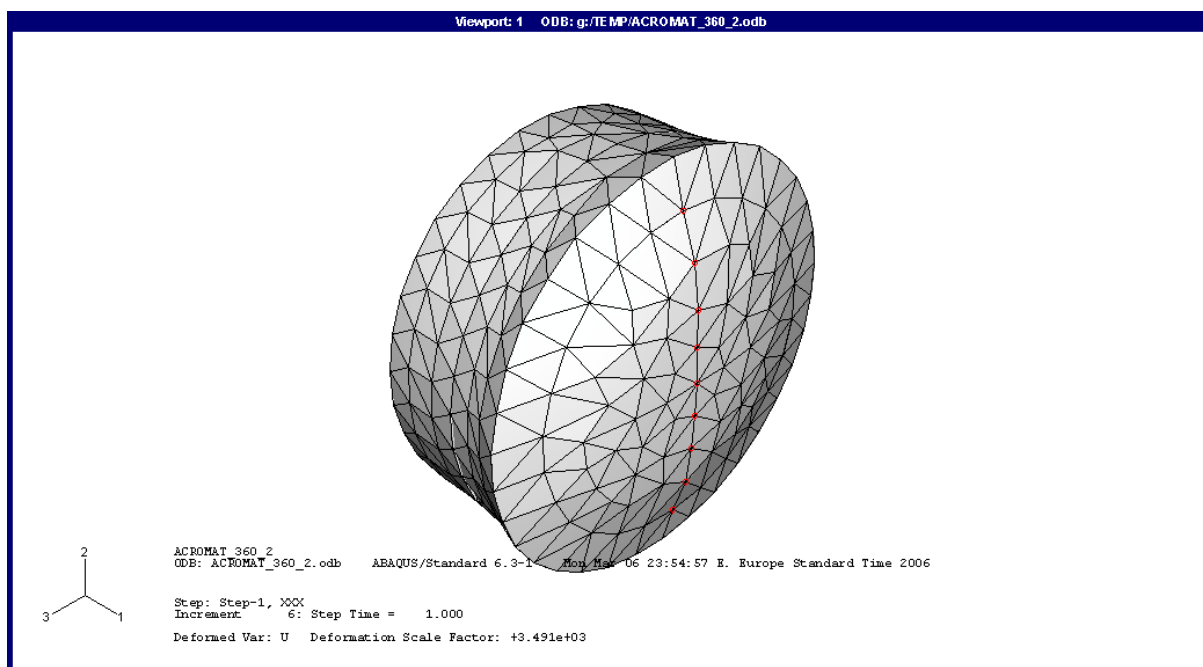


Fig. 5.15. Setul de noduri care definesc generatoarea suprafeței deformate a lentilei divergente

În mod similar, s-a creat un set de noduri pe generatoarea dioptrului liber al lentilei divergente (fig. 5.15) și s-a procedat la analiza evoluției acesteia.

Tabelele 5.4 și 5.5 conțin datele referitoare la coordonatele inițiale și finale ale dioptrului liber al lentilei divergente.

Tabelul 5.4

| ID NOD | X₀ | ΔX_{2MPa} | X_{2MPa} | r_{CERC} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 | 0 |
| 19 | 9.30205E+00 | -1.46800E-04 | 9.30190E+00 | 128.10 |
| 99 | 9.39000E+00 | -7.62900E-05 | 9.38992E+00 | 128.09 |
| 16 | 9.45620E+00 | -5.14900E-05 | 9.45615E+00 | 128.09 |
| 92 | 9.48800E+00 | -4.67300E-05 | 9.48795E+00 | 128.09 |
| 17 | 9.50000E+00 | -4.38600E-05 | 9.49996E+00 | 128.09 |
| 93 | 9.47812E+00 | -4.67300E-05 | 9.47807E+00 | 128.08 |
| 18 | 9.45624E+00 | -5.24500E-05 | 9.45619E+00 | 128.09 |
| 100 | 9.37915E+00 | -7.43800E-05 | 9.37908E+00 | 128.08 |
| 20 | 9.30205E+00 | -1.49700E-04 | 9.30190E+00 | 128.10 |

Tabelul 5.5

| ID NOD | Y₀ | ΔY_{2MPa} | Y_{2MPa} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 7.27736E+00 | 5.43500E-05 | 7.27741E+00 |
| 99 | 5.31264E+00 | 4.43400E-05 | 5.31268E+00 |
| 16 | 3.34792E+00 | 2.52700E-05 | 3.34795E+00 |
| 92 | 1.67396E+00 | 1.12000E-05 | 1.67397E+00 |
| 17 | 0.00000E+00 | 1.92300E-07 | 1.92300E-07 |
| 93 | -1.67396E+00 | -1.04900E-05 | -1.67397E+00 |
| 18 | -3.34792E+00 | -2.38400E-05 | -3.34794E+00 |
| 100 | -5.31264E+00 | -4.19600E-05 | -5.31268E+00 |
| 20 | -7.27735E+00 | -5.53100E-05 | -7.27741E+00 |

Analizând cele două tabele de mai sus rezultă că sunt valabile aceleași observații ca și în cazul lentilei convergente.

În figura 5.16 este redată generatoarea asferică a dioptrului liber al lentilei divergente.

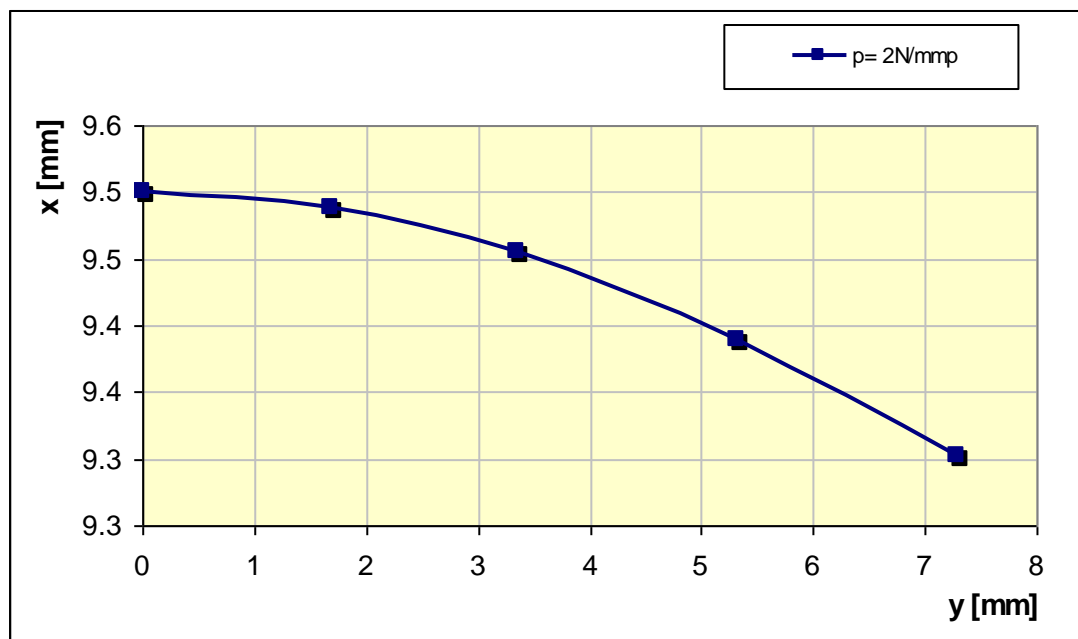


Fig. 5.16. Curba generatoare a suprafeței deformate pentru suprafața exterioară a lentilei divergente

În tabelul 5.6 sunt înscrise valorile perechilor de coordonate aparținând generatoarei asferice și valoarea medie a constantei conice, determinată pe baza ecuației generale (5.1).

Tabelul 5.6

| X_{2MPa} | Y_{2MPa} | k |
|------------|------------|-------|
| 9.3019E+00 | 7.2774E+00 | -0.43 |
| 9.3899E+00 | 5.3127E+00 | |
| 9.4561E+00 | 3.3479E+00 | |
| 9.4880E+00 | 1.6740E+00 | |
| 9.5000E+00 | 1.9230E-07 | |

Constanta conice în valoare de -0.43 indică, de asemenea o deformare a cercului inițial, care se transformă într-o elipsă.

Ecuația generatoarei suprafeței deformate în raport cu un sistem ortogonal de referință având originea în vârful dioptrului nominal este:

$$x = \frac{1}{-128.1} \cdot \frac{y^2}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{0.57y^2}{128.1^2}}\right)} \quad (5.3)$$

□ presiunea de contact 5 Mpa

În figurile 5.17 și 5.18 sunt redate variația tensiunilor von Mises și, respectiv deformația totală a dubletului.

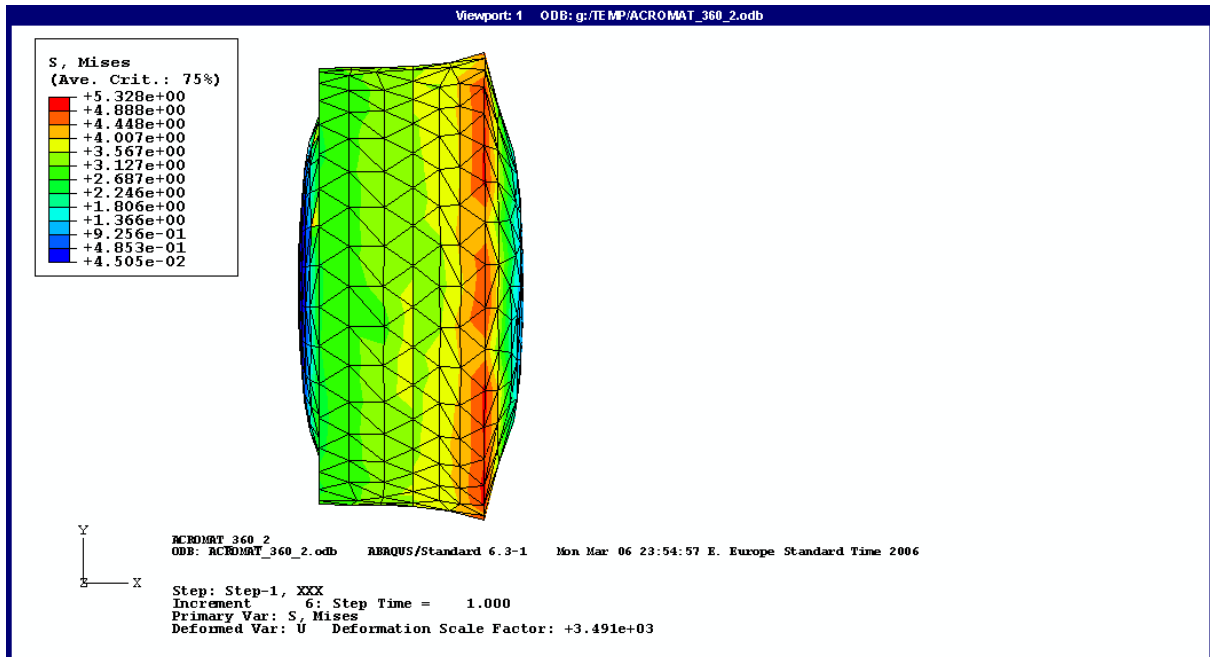


Fig. 5.17. Variația tensiunilor von Mises pentru $p=5$ MPa

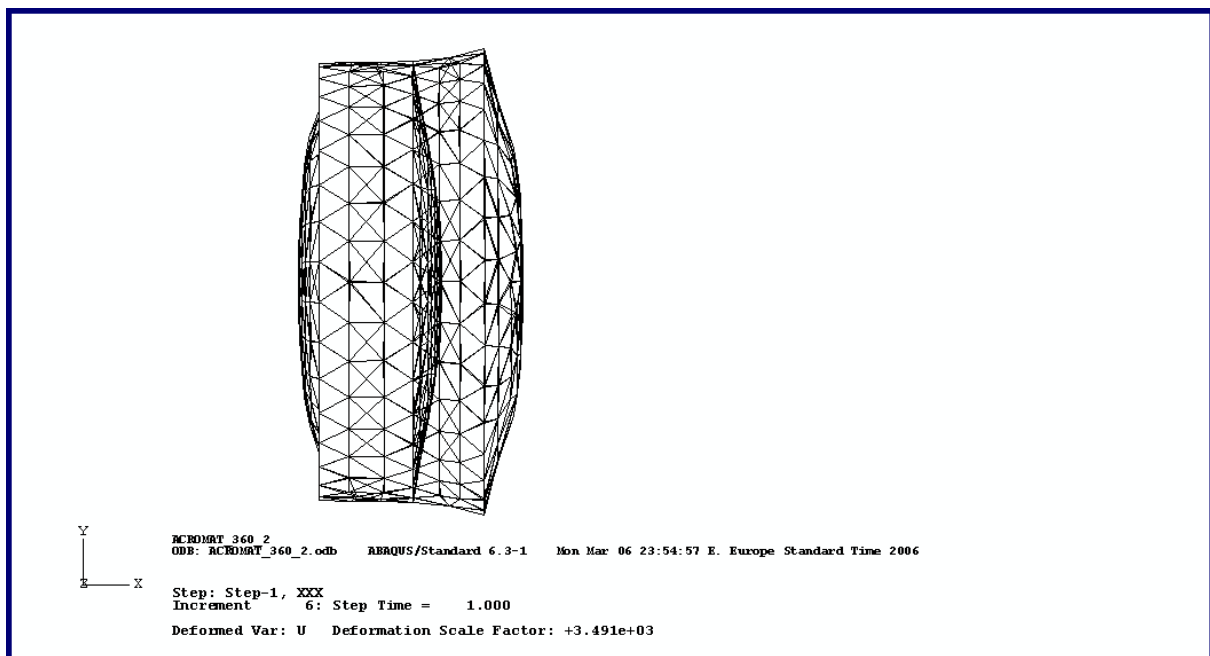


Fig. 5.18. Deplasările totale ale lentilelor dubletului pentru $p=5$ MPa

Se observă faptul că tensiunile echivalente sunt practic egale cu

presiunea aplicată și au o alură de variație similară celei descrise pentru cazul anterior. Deformațiile sunt, de asemenea, calitativ similare.

Cea mai importantă componentă a tensiunilor normale este cea orientată după axa x. Pentru lentila divergentă, valoarea maximă $\sigma_x \approx p$, iar pentru lentila convergentă $\sigma_x \approx p/2$, așa cum rezultă din figurile 5.19, respectiv 5.20.

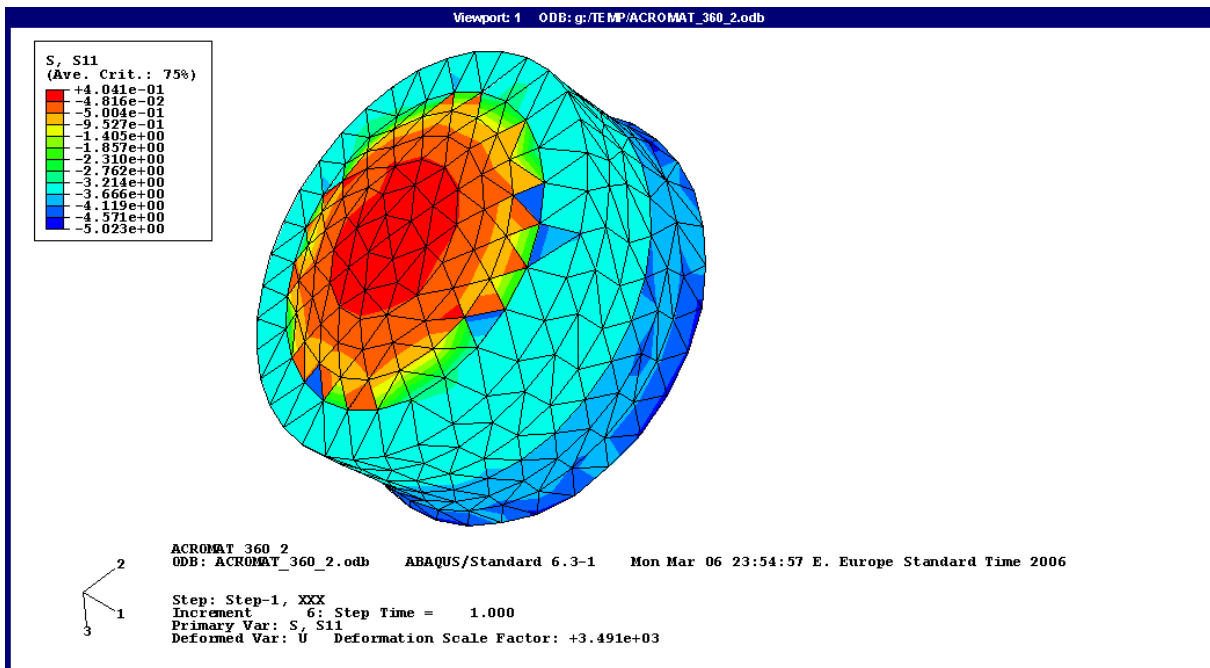


Fig. 5.19. Variația tensiunii σ_x pentru lentila convergentă

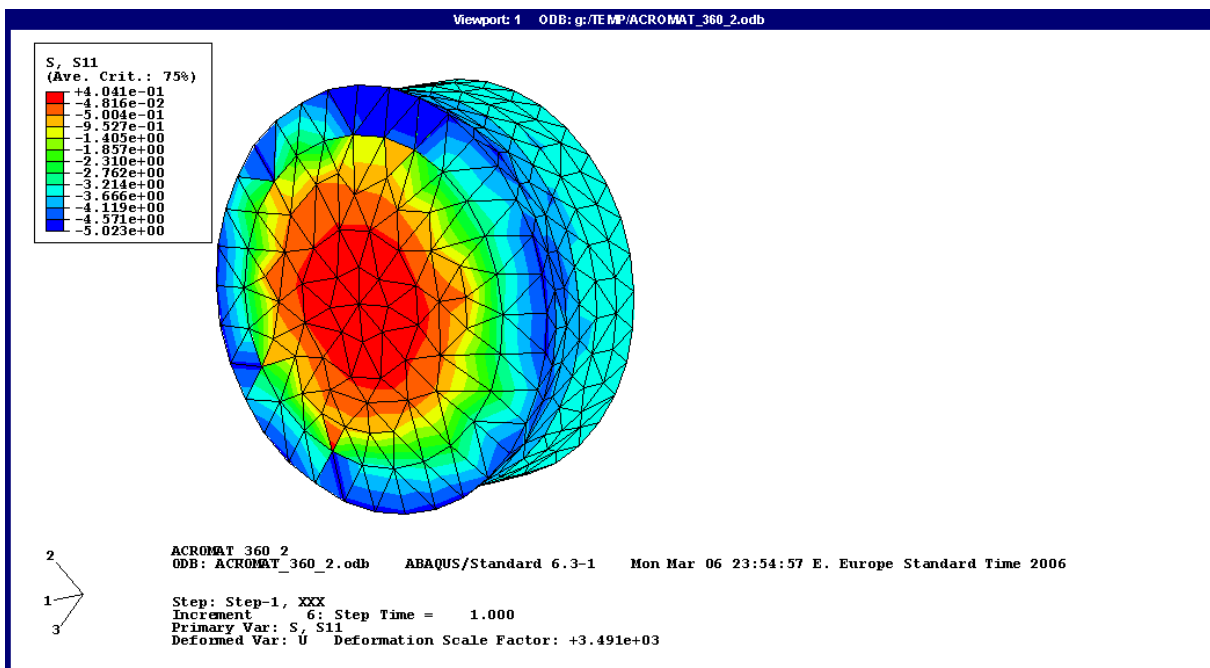


Fig. 5.20. Variația tensiunii σ_x pentru lentila divergentă

Coordonate x , y – inițiale și finale – ale nodurilor aparținând generatoarelor dioptrilor liberi ai lentilelor sunt înscrise în tabelele 5.7...5.12 (tabelele 5.7...5.9 sunt aferente lentilei convergente, iar tabelele 5.10...5.12 – lentilei divergente).

Tabelul 5.7

| ID NOD | X₀ | ΔX_{5MPa} | X_{5MPa} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 9 | 4.28578E-01 | 0.00000E+00 | 4.28578E-01 |
| 6 | 2.97308E-01 | -8.15600E-05 | 2.97226E-01 |
| 7 | 1.90112E-01 | -1.08880E-04 | 1.90003E-01 |
| 32 | 1.06866E-01 | -1.19900E-04 | 1.06746E-01 |
| 30 | 4.74734E-02 | -1.24600E-04 | 4.73488E-02 |
| 3 | 1.18649E-02 | -1.25400E-04 | 1.17395E-02 |
| 1 | 0.00000E+00 | -1.26490E-04 | -1.26490E-04 |
| 2 | 1.18649E-02 | -1.25400E-04 | 1.17395E-02 |
| 29 | 4.74734E-02 | -1.23900E-04 | 4.73495E-02 |
| 31 | 1.06866E-01 | -1.19000E-04 | 1.06747E-01 |
| 4 | 1.90112E-01 | -1.08100E-04 | 1.90004E-01 |
| 5 | 2.97308E-01 | -8.08200E-05 | 2.97227E-01 |
| 8 | 4.28578E-01 | 0.00000E+00 | 4.28578E-01 |

Tabelul 5.8

| ID NOD | Y₀ | ΔY_{5MPa} | Y_{5MPa} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 9 | 7.27736E+00 | 0.00000E+00 | 7.27736E+00 |
| 6 | 6.06477E+00 | 1.43000E-05 | 6.06478E+00 |
| 7 | 4.85157E+00 | 1.00130E-05 | 4.85158E+00 |
| 32 | 3.63868E+00 | 4.76800E-06 | 3.63868E+00 |
| 30 | 2.42579E+00 | 1.66800E-06 | 2.42579E+00 |
| 3 | 1.21289E+00 | 3.57600E-07 | 1.21289E+00 |
| 1 | 0.00000E+00 | -2.17100E-07 | -2.17100E-07 |
| 2 | -1.21289E+00 | -8.34400E-07 | -1.21289E+00 |
| 29 | -2.42579E+00 | -1.90700E-06 | -2.42579E+00 |
| 31 | -3.63868E+00 | -5.24500E-06 | -3.63869E+00 |
| 4 | -4.85157E+00 | -1.23900E-05 | -4.85158E+00 |
| 5 | -6.06447E+00 | -1.81100E-05 | -6.06449E+00 |
| 8 | -7.27736E+00 | 0.00000E+00 | -7.27736E+00 |

Figura 5.21 redă generatoarea suprafeței libere deformate a lentilei convergente.

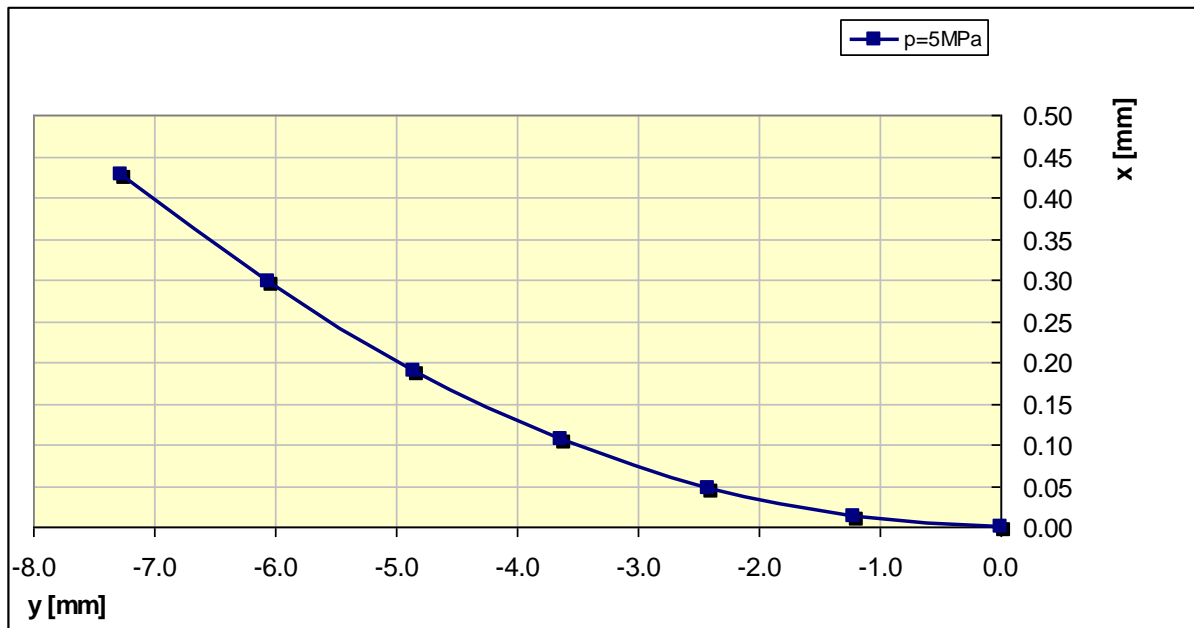


Fig. 5.21. Generatoarea eliptică a suprafeței libere a lentilei convergente

Conform datelor din tabelul 5.9 se găsește o valoare a constantei conice $k = -1.73$. Constanta conice negativă și mai mică decât unitatea în modul indică o hiperbolă.

Tabelul 5.9

| X_{5MPa} | Y_{5MPa} | k |
|-------------|-------------|-------|
| -1.2649E-04 | -2.1710E-07 | -1.73 |
| 1.1740E-02 | -1.2129E+00 | |
| 4.7350E-02 | -2.4258E+00 | |
| 1.0675E-01 | -3.6387E+00 | |
| 1.9000E-01 | -4.8516E+00 | |
| 2.9723E-01 | -6.0645E+00 | |
| 4.2858E-01 | -7.2774E+00 | |

Ecuția hiperbolei generatoare este:

$$x = \frac{y^2}{62 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{0.73y^2}{62^2}} \right)}. \quad (5.4)$$

Cu ajutorul datelor din tabelele 5.10...5.12 s-a trasat curba din figura 5.22, în scopul analizei evoluției suprafeței libere a lentilei divergente.

Tabelul 5.10

| ID NOD | X₀ | ΔX_{5MPa} | X_{2MPa} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 9.30205E+00 | -3.38100E-04 | 9.30171E+00 |
| 99 | 9.39000E+00 | -1.90700E-04 | 9.38981E+00 |
| 16 | 9.45620E+00 | -1.29700E-04 | 9.45607E+00 |
| 92 | 9.48800E+00 | -1.15400E-04 | 9.48788E+00 |
| 17 | 9.50000E+00 | -1.09600E-04 | 9.49989E+00 |
| 93 | 9.47812E+00 | -1.15300E-04 | 9.47800E+00 |
| 18 | 9.45624E+00 | -1.31600E-04 | 9.45611E+00 |
| 100 | 9.37915E+00 | -1.85000E-04 | 9.37897E+00 |
| 20 | 9.30205E+00 | -3.73800E-04 | 9.30168E+00 |

Tabelul 5.11

| ID NOD | Y₀ | ΔY_{5MPa} | Y_{2MPa} |
|---------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 7.27736E+00 | 1.35800E-04 | 7.27750E+00 |
| 99 | 5.31264E+00 | 1.11100E-04 | 5.31275E+00 |
| 16 | 3.34792E+00 | 6.29400E-05 | 3.34798E+00 |
| 92 | 1.67396E+00 | 2.78900E-05 | 1.67399E+00 |
| 17 | 0.00000E+00 | 4.80900E-07 | 4.80900E-07 |
| 93 | -1.67396E+00 | -2.62200E-05 | -1.67399E+00 |
| 18 | -3.34792E+00 | -5.93600E-05 | -3.34798E+00 |
| 100 | -5.31264E+00 | -1.04900E-04 | -5.31274E+00 |
| 20 | -7.27735E+00 | -1.38700E-04 | -7.27749E+00 |

Pentru aceasta a rezultat o conică generatoare a dioptrelui deformat de tipul elipsei. Conform tabelului 5.12 se găsește valoarea k= -0.56 a constantei conice. Ecuația acesteia este:

$$x = \frac{1}{-128.1} \cdot \frac{y^2}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{0.44y^2}{128.1^2}}\right)} \quad (5.5)$$

Tabelul 5.12

| X_{5MPa} | Y_{5MPa} | k |
|-------------------------|-------------------------|----------|
| 9.3017E+00 | 7.2775E+00 | -0.56 |
| 9.3898E+00 | 5.3128E+00 | |
| 9.4561E+00 | 3.3480E+00 | |
| 9.4879E+00 | 1.6740E+00 | |
| 9.4999E+00 | 4.8090E-07 | |

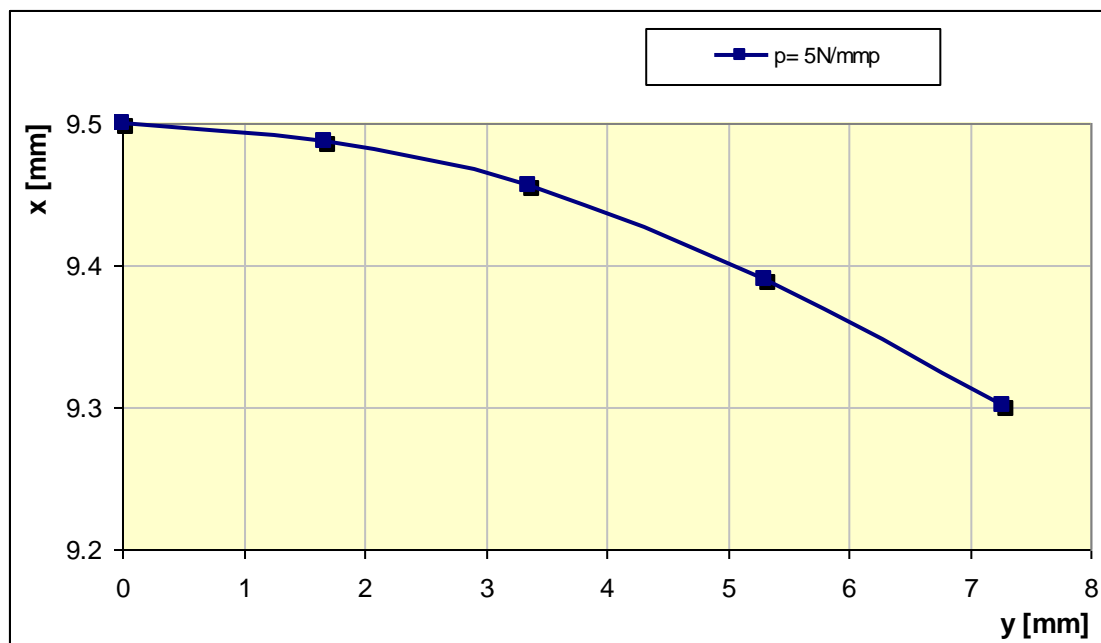


Fig. 5.22. Generatoarea eliptică a dioptrului liber al lentilei divergente

□ presiunea de contact $p=10\text{MPa}$

Aceleași elemente de analiză au fost prelevate și pentru cazul încărcării cu $p=10\text{MPa}$. Concluziile care rezultă sunt calitativ similare celor anterioare. Analiza numerică pune în evidență creșteri ale tensiunilor și deformațiilor și, respectiv ale constantelor conicelor.

Figurile 5.23...5.27 redau variația tensiunilor von Mises pe lentila convergentă (fig. 5.23) și divergentă (fig. 5.24), deplasările totale ale lentilelor (fig. 5.25), variația tensiunilor σ_x pentru lentila convergentă (fig. 5.26), respectiv pentru lentila divergentă (fig. 5.27), în cazul de încărcare $p=10\text{Mpa}$.

Datele numerice prelevate prin rularea programului Abaqus sunt prezentate în tabelele 5.13...5.18. Datele aferente lentilei convergente, referitoare la coordonatele inițiale x,y și valoarea constantei conicei suprafeței deformate pot fi urmărite în tabelele 5.13...5.15. Datele analizei corespunzătoare lentilei divergente sunt înscrise în tabele 5.16...5.18.

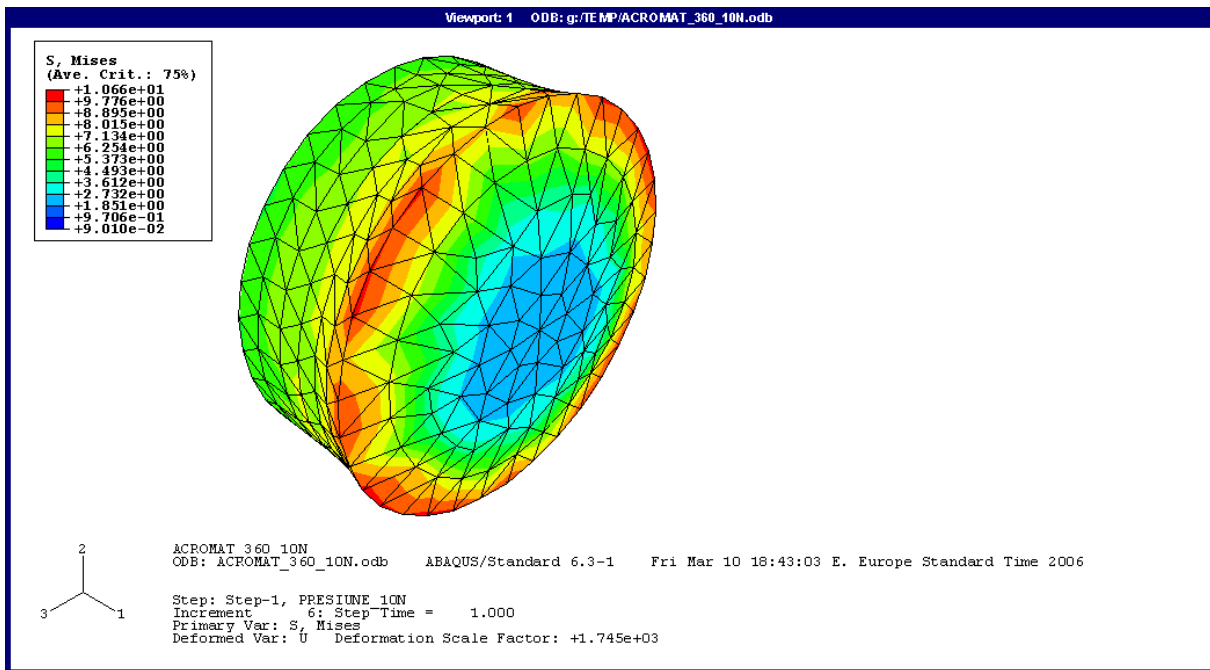


Fig. 5.23. Variația tensiunilor von Mises la $p=10$ Mpa pentru lentila convergentă

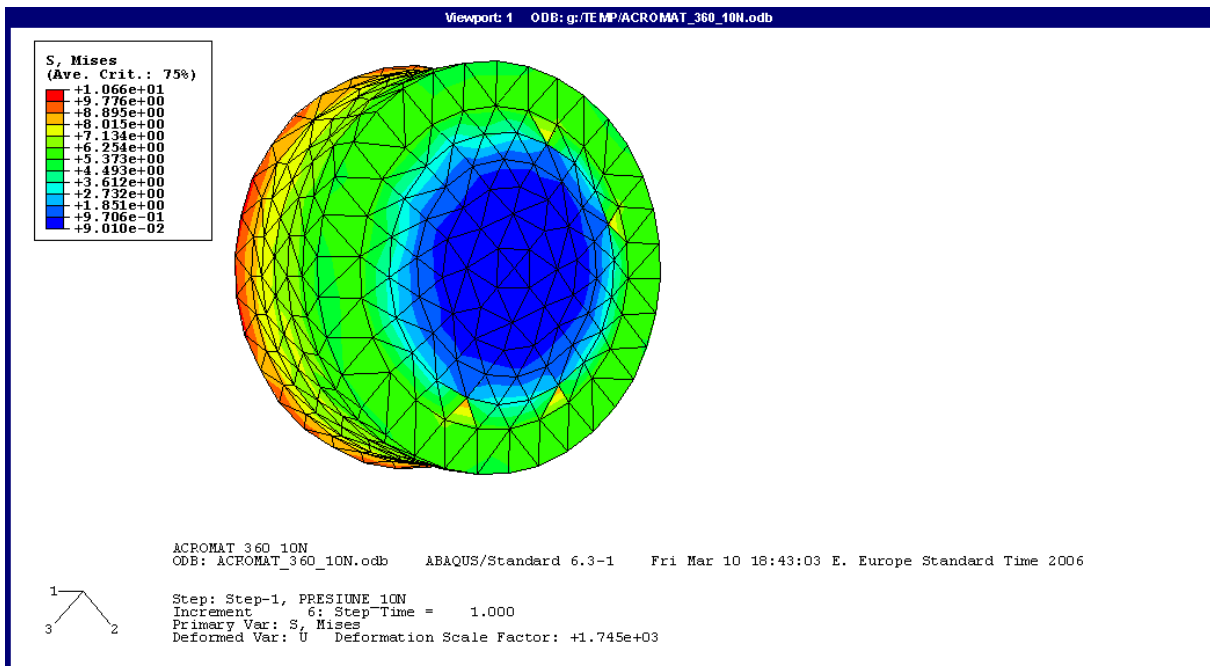


Fig. 5.24. Variația tensiunilor von Mises la $p=10$ Mpa pentru lentila divergentă

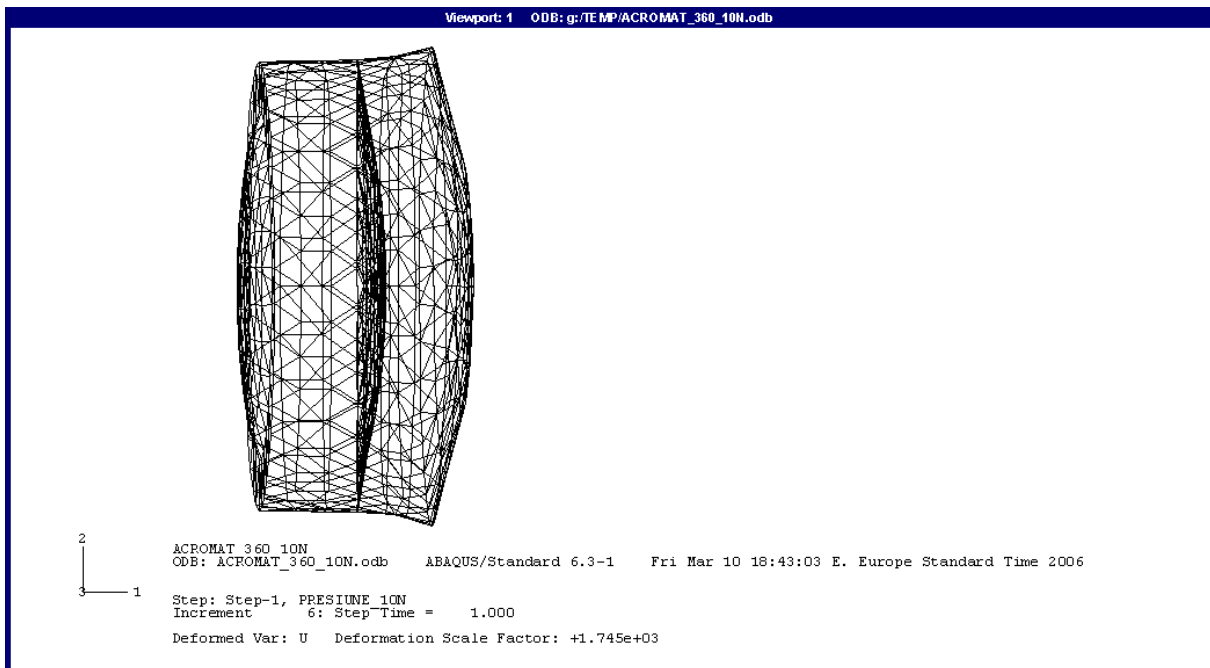


Fig. 5.25. Deplasările totale ale lentilelor dubletului pentru $p=10$ MPa

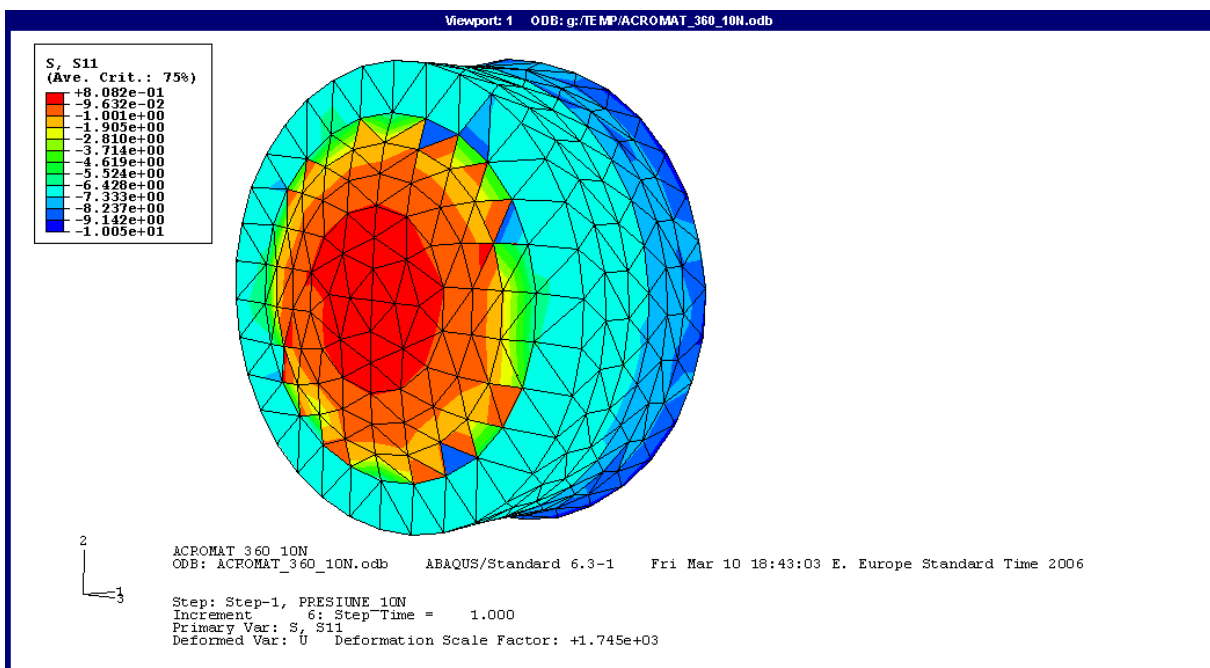


Fig. 5.26. Variația tensiunii σ_x pentru lentila convergentă

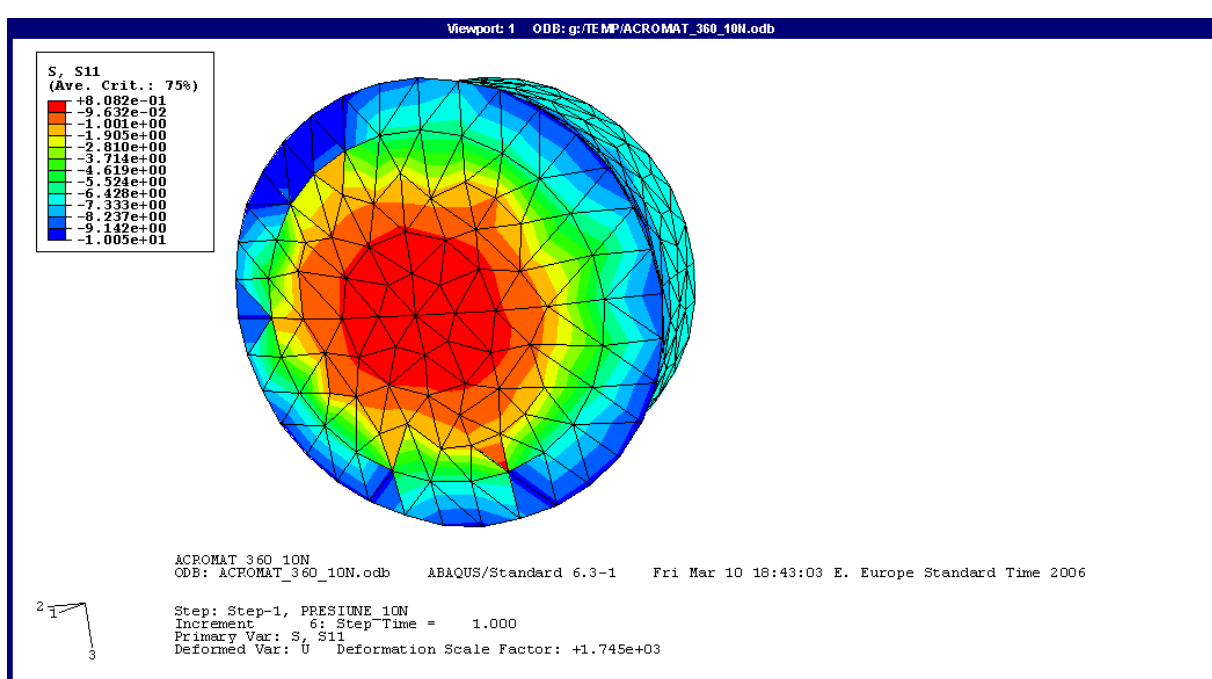


Fig. 5.27. Variația tensiunii σ_x pentru lentila divergentă

Tabelul 5.13

| ID NOD | X ₀ | ΔX_{10MPa} | X _{10MPa} |
|--------|----------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 9 | 4.28578E-01 | 0.00000E+00 | 4.28578E-01 |
| 6 | 2.97308E-01 | -1.63100E-04 | 2.97145E-01 |
| 7 | 1.90112E-01 | -2.17700E-04 | 1.89894E-01 |
| 32 | 1.06866E-01 | -2.39900E-04 | 1.06626E-01 |
| 30 | 4.74734E-02 | -2.49300E-04 | 4.72241E-02 |
| 3 | 1.18649E-02 | -2.50900E-04 | 1.16140E-02 |
| 1 | 0.00000E+00 | -2.52300E-04 | -2.52300E-04 |
| 2 | 1.18649E-02 | -2.50900E-04 | 1.16140E-02 |
| 29 | 4.74734E-02 | -2.47800E-04 | 4.72256E-02 |
| 31 | 1.06866E-01 | -2.38100E-04 | 1.06628E-01 |
| 4 | 1.90112E-01 | -2.16300E-04 | 1.89896E-01 |
| 5 | 2.97308E-01 | -1.61600E-04 | 2.97146E-01 |
| 8 | 4.28578E-01 | 0.00000E+00 | 4.28578E-01 |

Tabelul 5.14

| ID NOD | X ₀ | ΔX_{10MPa} | X _{10MPa} |
|--------|----------------|--------------------|--------------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 9 | 7.27736E+00 | 0.00000E+00 | 7.27736E+00 |
| 6 | 6.06477E+00 | 2.86100E-05 | 6.06480E+00 |
| 7 | 4.85157E+00 | 2.05000E-05 | 4.85159E+00 |
| 32 | 3.63868E+00 | 9.29800E-06 | 3.63869E+00 |
| 30 | 2.42579E+00 | 3.09900E-06 | 2.42579E+00 |
| 3 | 1.21289E+00 | 8.34400E-07 | 1.21289E+00 |
| 1 | 0.00000E+00 | -4.34200E-07 | -4.34200E-07 |

| | | | |
|----|--------------|--------------|--------------|
| 2 | -1.21289E+00 | -1.54900E-06 | -1.21289E+00 |
| 29 | -2.42579E+00 | -3.81400E-06 | -2.42579E+00 |
| 31 | -3.63868E+00 | -1.04900E-05 | -3.63869E+00 |
| 4 | -4.85157E+00 | -2.47900E-05 | -4.85159E+00 |
| 5 | -6.06447E+00 | -3.57600E-05 | -6.06451E+00 |
| 8 | -7.27736E+00 | 0.00000E+00 | -7.27736E+00 |

Tabelul 5.15

| X_{10MPa} | Y_{10MPa} | k |
|-------------|-------------|-------|
| -2.5230E-04 | -4.3420E-07 | -3.47 |
| 1.1614E-02 | -1.2129E+00 | |
| 4.7226E-02 | -2.4258E+00 | |
| 1.0663E-01 | -3.6387E+00 | |
| 1.8990E-01 | -4.8516E+00 | |
| 2.9715E-01 | -6.0645E+00 | |
| 4.2858E-01 | -7.2774E+00 | |

Din tabelul 5.15 rezultă că suprafața deformată a lentilei convergente are ca generatoare o hiperbolă cu constanta conicei $k=-3.47$, a cărei ecuație este de forma:

$$x = \frac{y^2}{62 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2.47y^2}{62^2}} \right)}. \quad (5.6)$$

Forma dioptrului deformat este redată în figura 5.28.

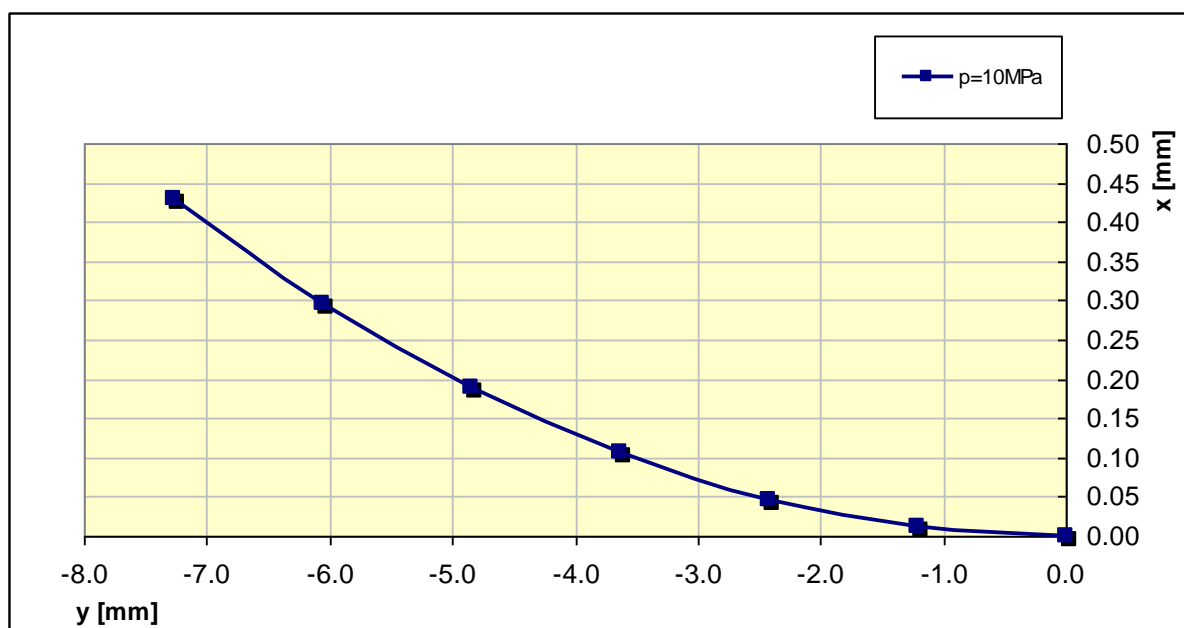


Fig. 5.28. Forma generatoarei dioptrului deformat al lentilei convergente

Tabelul 5.16

| ID NOD | X_0 | ΔX_{10MPa} | X_{10MPa} |
|--------|-------------|--------------------|-------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 9.30205E+00 | -7.36200E-04 | 9.30131E+00 |
| 99 | 9.39000E+00 | -3.80500E-04 | 9.38962E+00 |
| 16 | 9.45620E+00 | -2.59400E-04 | 9.45594E+00 |
| 92 | 9.48800E+00 | -2.31700E-04 | 9.48777E+00 |
| 17 | 9.50000E+00 | -2.19300E-04 | 9.49978E+00 |
| 93 | 9.47812E+00 | -2.31700E-04 | 9.47789E+00 |
| 18 | 9.45624E+00 | -2.62200E-04 | 9.45598E+00 |
| 100 | 9.37915E+00 | -3.70000E-04 | 9.37878E+00 |
| 20 | 9.30205E+00 | -7.47600E-04 | 9.30130E+00 |

Tabelul 5.17

| ID NOD | X_0 | ΔX_{10MPa} | X_{10MPa} |
|--------|--------------|--------------------|--------------|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 19 | 7.27736E+00 | 2.71300E-04 | 7.27763E+00 |
| 99 | 5.31264E+00 | 2.22200E-04 | 5.31286E+00 |
| 16 | 3.34792E+00 | 1.26100E-04 | 3.34805E+00 |
| 92 | 1.67396E+00 | 5.57900E-05 | 1.67402E+00 |
| 17 | 0.00000E+00 | 9.61900E-07 | 9.61900E-07 |
| 93 | -1.67396E+00 | -5.24500E-05 | -1.67401E+00 |
| 18 | -3.34792E+00 | -1.17800E-04 | -3.34804E+00 |
| 100 | -5.31264E+00 | -2.10200E-04 | -5.31285E+00 |
| 20 | -7.27735E+00 | -2.77500E-04 | -7.27763E+00 |

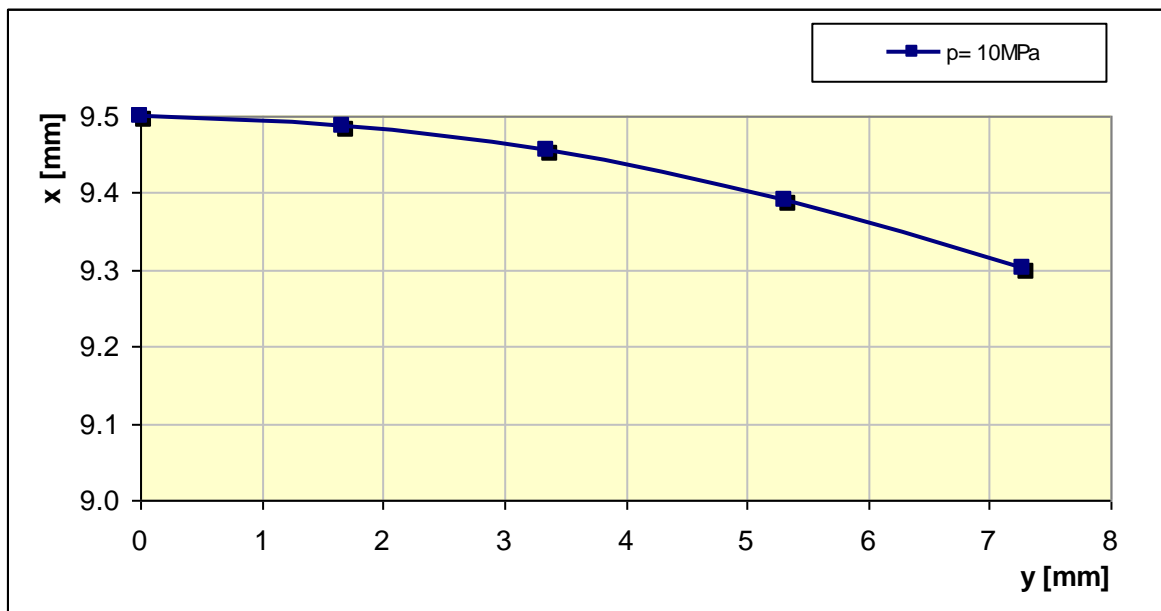


Fig. 5.29. Forma generatoarei dioptrului deformat al lentilei divergente

Tabelul 5.18

| X _{10MPa} | Y _{10MPa} | k |
|--------------------|--------------------|-------|
| 9.3013E+00 | 7.2776E+00 | -0.75 |
| 9.3896E+00 | 5.3129E+00 | |
| 9.4559E+00 | 3.3480E+00 | |
| 9.4878E+00 | 1.6740E+00 | |
| 9.4998E+00 | 9.6190E-07 | |

Generatoarea dioptrului deformat al lentilei divergente este o elipsă descrisă de ecuația (5.7) și redată grafic în figura 5.29.

$$x = \frac{1}{-128.1} \cdot \frac{y^2}{\left(1 + \sqrt{1 - \frac{0.25y^2}{128.1^2}}\right)} \quad (5.7)$$

5.2.2. Analiza variației parametrilor de calitate a imaginii funcție de starea de tensiune și deformație

Stabilirea stării de tensiune și deformație a pieselor optice, supuse la valori diferite ale solicitărilor exterioare, ca urmare a montajului, permite analiza variației parametrilor de calitate a imaginii. Se subliniază faptul că întregul studiu din paragraful anterior a avut în vedere un sistem optomecanic fără erori de montaj, la care piesele subansamblului optic ocupă pozițiile nominale, neafectate de descentrări sau înclinări ale pieselor.

Se vor supune analizei cele două fenomene definite în capitolele anterioare:

- birefringența consecutivă unei stări de tensiune în masa pieselor optice
- deformația dioptrilor ca urmare a deplasărilor nodale ale structurii.

Pentru lentila convergentă s-au sintetizat datele de interes privind efectul de birefringență al tensionării piesei, în tabelul 5.19.

Tabelul 5.19

| p [MPa] | σ _{Mises max} [MPa] | Δs [nm/cm] | OPD ₊ [nm] | RL ₊ [-] |
|---------|------------------------------|------------|-----------------------|---------------------|
| 10 | 6.0 | 166.2 | 83.1 | 0.60 |
| 5 | 2.7 | 74.8 | 37.3 | 0.27 |
| 2 | 0.9 | 34.0 | 17.0 | 0.12 |

Pe fiecare linie pot fi urmărite valorile solicitării exterioare (aproximativ egale cu tensiunile von Mises maxime), diferența optică de drum unitară introdusă de tensiunea luată în considerare, diferența optică de drum efectivă și valoarea criteriului Rayleigh, corespunzătoare OPD cauzat de birefrință.

În cazul materialului considerat, BK7, pentru care coeficientul tensiunii optice este $k=2.77$ și pentru lungimea de undă de referință $\lambda=546\text{nm}$ (linia spectrală e), OPD echivalent cu valoarea $\lambda/4$ a criteriului Rayleigh corespunde solicitării exterioare $p=5\text{MPa}$. Rezultă că, din punct de vedere al birefrinței, forța de apăsare a subansamblului optic trebuie limitată astfel încât tensiunile echivalente von Mises să nu depășească 5MPa .

Deși OPD introdus suplimentar prin efectul de birefrință se cumulează cu cel rezidual al sistemului rezultat din proiectare, se consideră că recomandarea anterioară este acoperitoare prin faptul că s-a luat în considerare valoarea maximă a tensiunii (valabilă în zona marginală și mult diminuată în partea centrală a lentilei) și, de asemenea, faptul că în calcul s-a introdus grosimea maximă, la centru a componentei.

În ceea ce privește al doilea aspect, al schimbării formei inițiale sferice a dioptrilor, se constată că tensionarea subansamblului are ca efect deplasări care conduc la asferizarea dioptrilor.

Coordonatele inițiale x și y ale punctelor aparținând generatoarei circulare se deplasează în plan meridian. Valorile absolute ale deplasărilor se încadrează în domeniul $1 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-4}$ pentru coordonata x (fig. 5.30) și sunt cu un ordin de mărime mai mici pentru coordonata y (fig. 5.31).

Deși deplasările sunt mici în valoare absolută, au o repartiție neuniformă și conduc la deformări globale ale suprafeței dioptrului, ceea ce impune o analiză a modificării parametrilor de calitate a subansamblului.

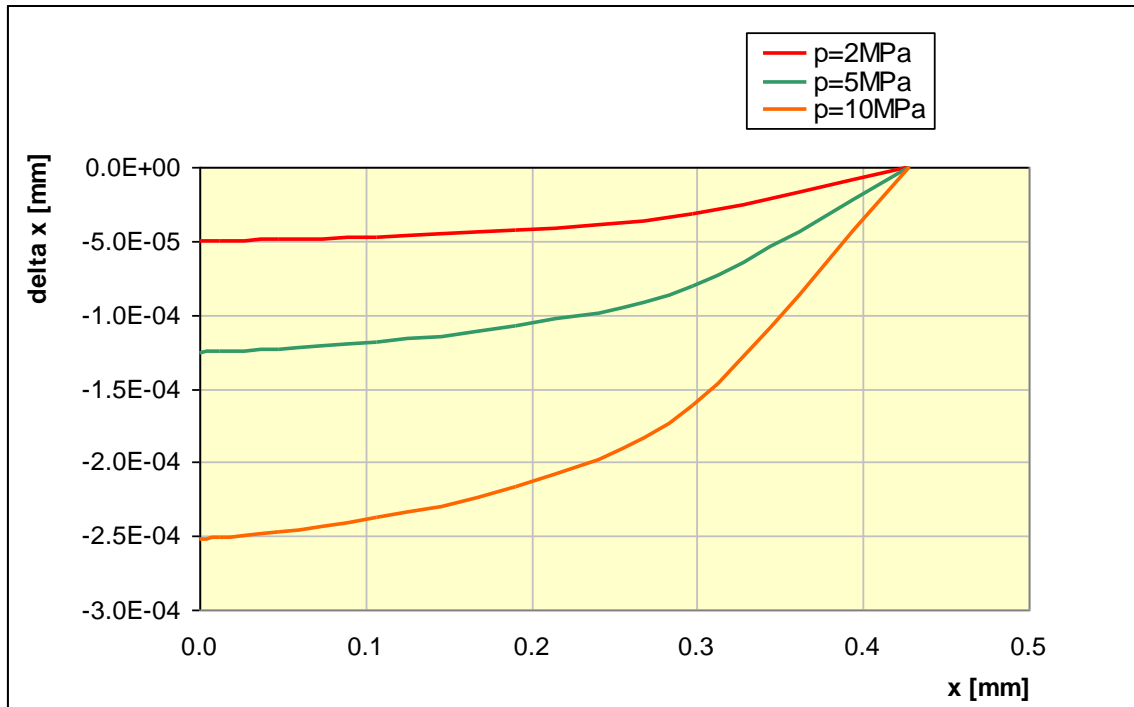


Fig. 5.30. Variația deplasărilor axiale (de-a lungul axei optice) în raport cu apertura pentru solicitări exterioare $p=2\text{MPa}$, 5MPa și 10MPa

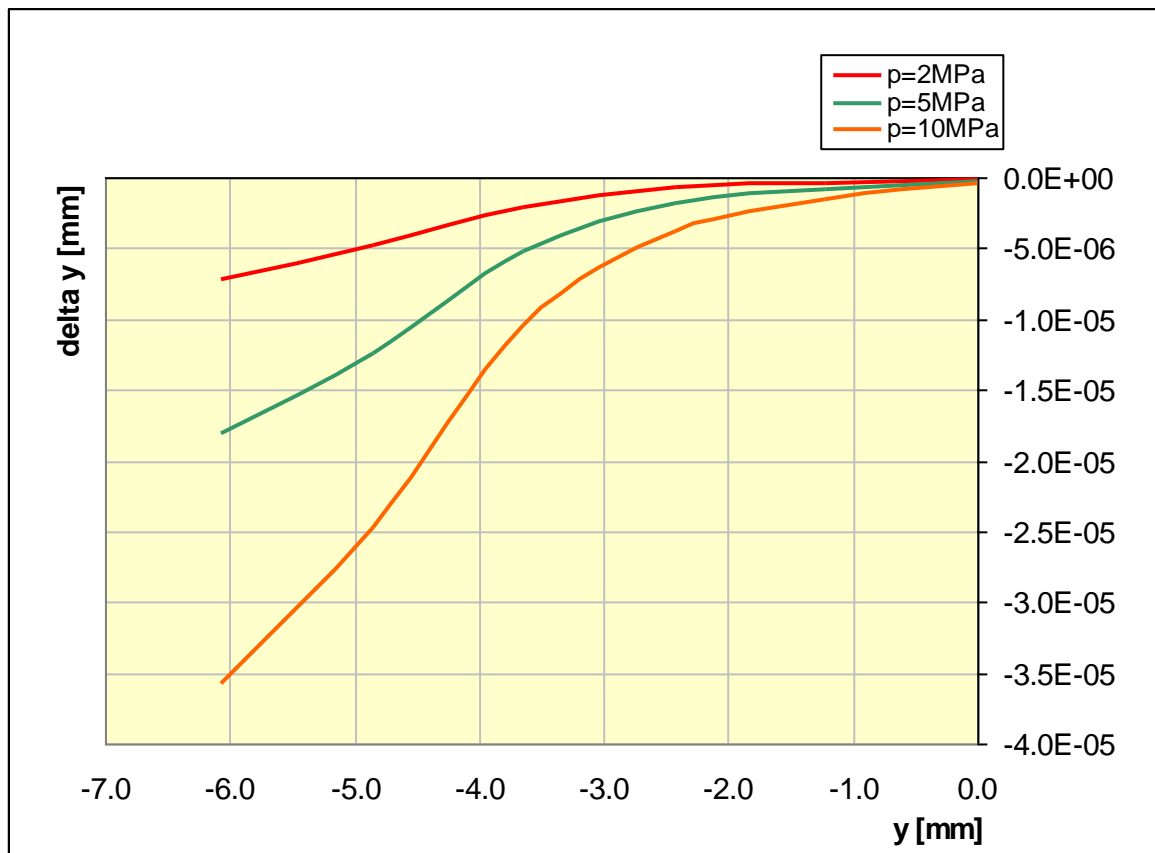


Fig. 5.31. Variația deplasărilor de-a lungul axei y în raport cu apertura pentru solicitări exterioare $p=2\text{MPa}$, 5MPa și 10MPa

Pentru lentila divergentă pe care este aplicată direct solicitarea, efectele stării de tensiune și deformație sunt și mai evidente.

În tabelul 5.20 este prezentată sinteza datelor care caracterizează efectul de birefrință.

Tabelul 5.20

| p [MPa] | $\sigma_{\text{Mises max}}$ [MPa] | Δs [nm/cm] | OPD₊ [nm] | RL₊ [-] |
|--------------------------|---|--|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 10 | 11.0 | 329.0 | 131.6 | 0.96 |
| 5 | 5.3 | 158.5 | 63.4 | 0.46 |
| 2 | 2.1 | 62.8 | 25.1 | 0.18 |

Pentru lentila divergentă, al cărei material (SF5) are un coeficient al tensiunii optice mai ridicat, $k=2.99$, recomandarea de limitare a tensiunilor echivalente von Mises indică valoarea de 2MPa.

Deplasările în plan meridian ale generatoarei dioptrului sunt prezentate grafic în raport cu apertura în figurile 5.32 (pentru coordonata x) și figura 5.33 (pentru coordonata y).

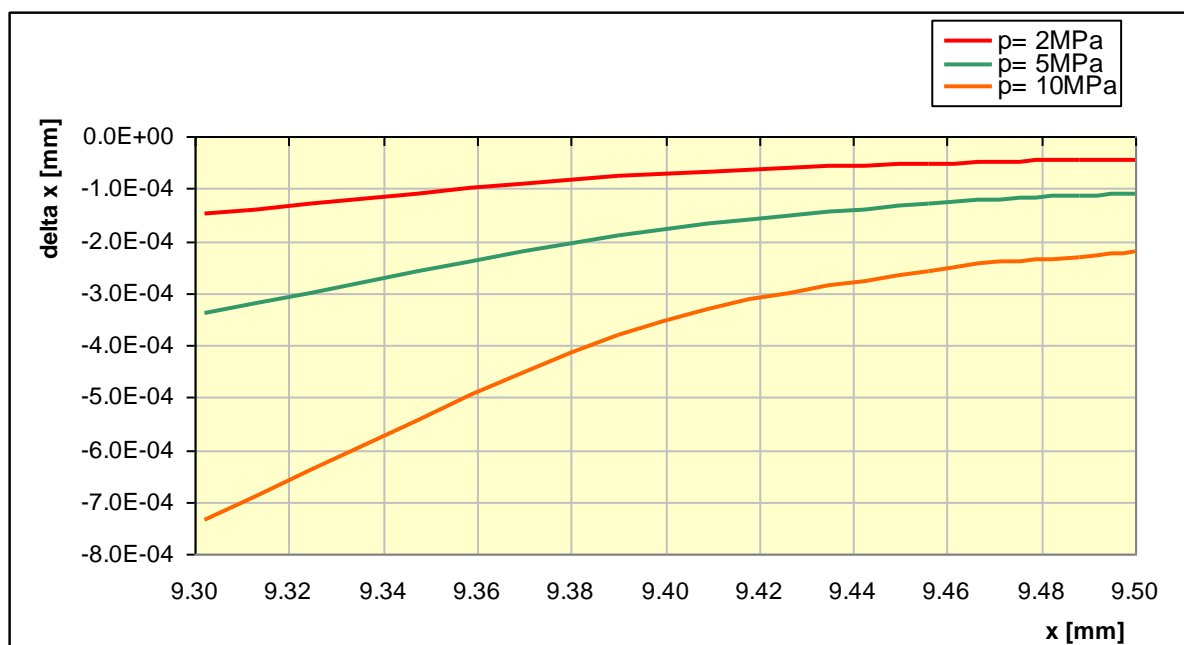


Fig. 5.32. Variația deplasărilor de-a lungul axei optice în raport cu apertura pentru solicitări $p=2\text{MPa}$, 5MPa și 10MPa

Se observă faptul că deplasările pe direcția x sunt de până la 3 ori mai mari, iar cele de pe direcția y de până la de 10 ori mai mari decât în cazul lentilei convergente. Rezultă că piesa cea mai afectată din punct de vedere mecanic este componenta cu care vine în contact inelul filetat. Se poate deduce faptul că pentru un șir mai lung de piese optice tensiunile sunt preluate preponderent de primele componente din vecinătatea inelului filet. Tensiunile și deformațiile vor fi tot mai scăzute spre capătul șirului.

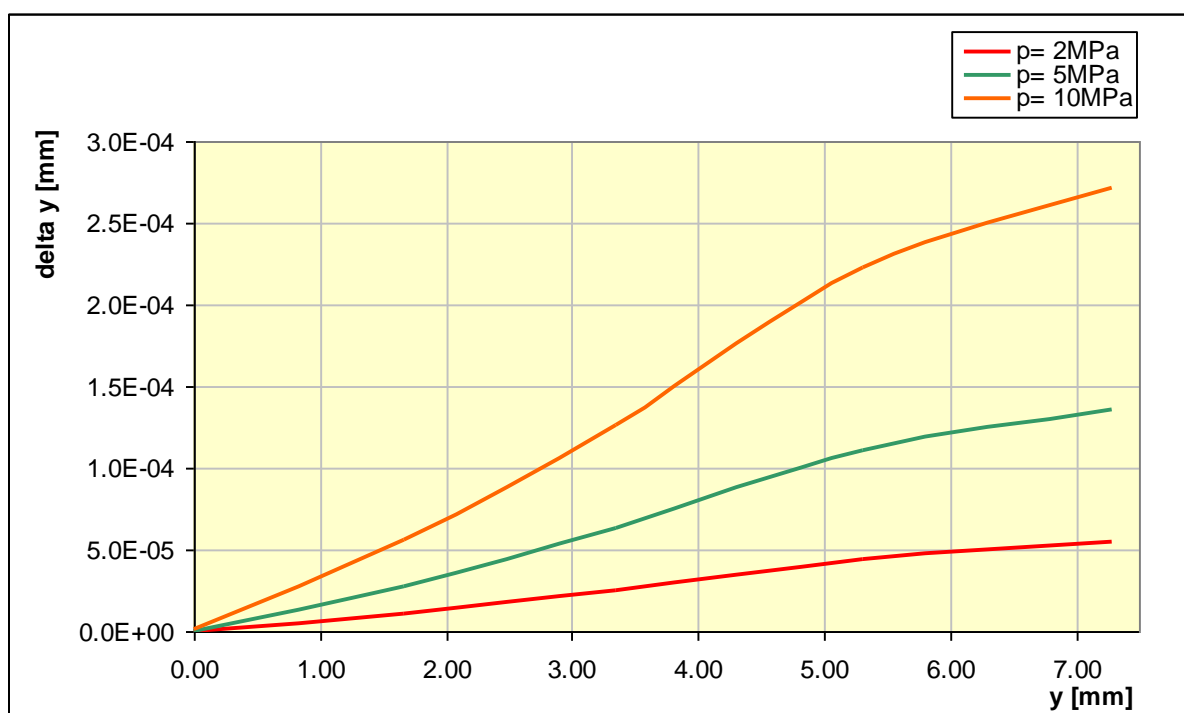


Fig. 5.33. Variația deplasărilor pe direcția axei y în raport cu apertura pentru solicitări $p=2\text{MPa}$, 5MPa și 10MPa

Pentru analiza influenței asferizării dioptrilor s-a apelat la programul OSLO LT.

În tabelul 5.21 este redată o sinteză a rezultatelor obținute în urma simulării asferizării suprafețelor.

Tabelul 5.21

| p [MPa] | k _{conv} | k _{div} | D=14 mm | | D=12 mm | | D=10 mm | | D=9 mm | |
|------------|-------------------|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | | | RMS | Strehl | RMS | Strehl | RMS | Strehl | RMS | Strehl |
| 0 | 0 | 0 | 0.0528 | 0.9064 | | | | | | |
| 2 | -0.69 | -0.43 | 0.0747 | 0.8028 | 0.0489 | 0.9116 | | | | |
| 5 | -1.73 | -0.56 | 0.1591 | 0.3533 | 0.0898 | 0.7166 | 0.0481 | 0.9109 | | |
| 10 | -3.47 | -0.75 | 0.3112 | 0.1257 | 0.1704 | 0.2983 | 0.0849 | 0.7393 | 0.0574 | 0.8722 |

Studiul datelor din tabelul 5.21 permite o analiză nuanțată a evoluției parametrilor de calitate a imaginii în raport cu forța de apăsare aplicată componentelor mecanice de fixare.

La modul absolut, asferizarea dioptrilor prejudiciază calitatea imaginii. Se subliniază faptul că, din proiectare, sistemul optic analizat este limitat la difracție, așa cum rezultă din prima linie a tabelului (culoarea de umplere galbenă este asociată încadrării sistemului în clasa de cea mai bună calitate).

Pe linia a doua, corespunzătoare solicitării p=2MPa, la apertura de proiectare, sistemul optic coboară în clasificare în categoria sistemelor precise. Liniaritatea și respectiv caracterul limitat la difracție se păstrează pe o zonă puțin redusă, corespunzătoare unei deschideri cu 2 mm mai mică. Altfel spus, sistemul este limitat la difracție numai pe 85% din apertura maximă.

Pentru solicitări mai mari, p=5MPa și p=10MPa, liniaritatea sistemului se restrânge la 70%, respectiv 65% din câmpul maxim.

Comparând efectele birefrinței și schimbării globale a formei dioptrilor se poate spune că cel de-al doilea este mai semnificativ în ceea ce privește influența asupra calității imaginii. Din punct de vedere al rezistenței materialelor, rezultă concluzia că deformațiile sunt mai importante decât tensiunile. Acestea din urmă au valori scăzute, care nu constituie o cauză probabilă a distrugerii piesei. Coeficientul de siguranță depășește valoarea 10 la compresiune, având în vedere că tensiunea de amorțire a fracturii prin compresiune este de ordinul 100MPa. Tensiunile trebuie limitate ca urmare a deformațiilor care le însoțesc. Din acest punct

de vedere, tensiunile care au drept consecință deformații critice pentru calitatea imaginii sunt de câteva ori mai mari decât cele periculoase din punct de vedere al inducerii fenomenului de birefrință. Totuși, trebuie avut în vedere faptul că sorturile de sticlă au coeficienți ai tensiunii optice diferiți, care se încadrează într-un domeniu larg de valori, raportul capetelor intervalului fiind în jur de 6 ($k=0.7 \cdot 10^{-6} \text{mm}^2/\text{N} \dots 4.2 \cdot 10^{-6} \text{mm}^2/\text{N}$), astfel încât fiecare aplicație necesită un studiu separat. Utilizarea unor sticle cu k mare poate aduce birefrința la un rang de importanță superior celui deformației suprafețelor. În mod cert, însă, efectul solicitărilor mecanice asupra forme dioptrilor trebuie avută în vedere pentru fiecare aplicație particulară, astfel încât să se poată prescrie cu precizie presiunea de contact, respectiv forța de strângere admisibilă.

5.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Capitolul 5 conține un exercițiu de modelare și simulare a unui subansamblu de tip dublet acromat, fixat în montură prin strângere cu inel filetat.

Scopul studiului fiind analiza influenței stării de tensiune și deformație asupra parametrilor de calitate a imaginii, s-a proiectat un dublet limitat la difracție, pentru care s-au determinat indicatorii sintetici de calitate RMS OPD și Raportul Strehl, în vederea studiului evoluției acestora ca urmare a solicitărilor mecanice asociate montajului. Pentru evaluarea calității imaginii s-a utilizat programul OSLO LT.

Modelarea și simularea comportamentului structurii s-a realizat prin rularea programului de element finit Abaqus.

Modelarea propriu-zisă a fost practică pentru cele două lentile componente ale dubletului, în timp ce partea mecanică, respectiv montura și inelul filetat, a fost simulată prin efectele sale (condiții restrictive de frontieră și încărcare).

Integral, studiul este dedicat unui subansamblu optomecanic fără erori de montaj, la care dubletul ocupă poziția nominală, fără a fi afectat de înclinări sau descentrări.

Modelul geometric a fost realizat prin importarea secțiunii plane furnizate de OSLO în AUTOCAD, cu ajutorul căruia s-au generat fișiere numerice de grafică 3D, compatibile cu Abaqus.

Pentru discretizare geometrică s-au utilizat elemente tridimensionale de tip tetraedric modelate matematic prin polinoame liniare de tip Pascal.

Studiul a fost proiectat pentru trei cazuri de încărcare, corespunzătoare unor presiuni de contact $p=2\text{MPa}$, 5MPa și 10MPa . S-a evitat solicitarea exterioară de tip forță normală sau moment de strângere, având în vedere dependența acestora de dimensiunile radiale efective ale structurii și ca urmare, irelevanța rezultatelor pentru recomandări cu caracter general.

Rezultatele analizei numerice efectuate conduc la următoarele concluzii:

- ❑ chiar și în cazul respectării poziției nominale a subansamblului optic în montură, practicarea unui montaj incorect, cu presarea necontrolată a lentilelor între montură și inelul filetat, poate conduce la deprecierea imaginii
- ❑ starea de tensiune și deformație a lentilelor are ca efect birefringența și deformația dioptrilor, care poate fi interpretată ca abatere de la forma nominală sferică
- ❑ tensiunile echivalente von Mises maxime au valori aproximativ egale cu încărcarea pentru lentila pe care este aplicată direct solicitarea exterioară și valori înjumătățite pentru următoarea piesă optică. Rezultă că, pentru un sistem optic mai complex, format dintr-un șir mai lung de lentile, cea mai afectată este cea care vine în contact direct cu inelul filetat. Efectul presiunii se diminuează semnificativ pe componentele următoare
- ❑ simetria geometrică de revoluție caracteristică lentilelor și simetria încărcării asigură menținerea simetriei în plan meridian și sagital și după deformație
- ❑ starea de tensiune și deformație în cazul pieselor optice are semnificații particulare față de abordarea caracteristică organelor de mașini, în

general. Tensiunile au valori absolute mici, care nu constituie obiectul rațional al unor operații de dimensionare sau verificare. Sticla optică are o rezistență foarte ridicată la compresiune, astfel încât pericolul deteriorării datorită acestei solicitări practic nu există. Prezența tensiunilor însă, chiar la valori foarte reduse, poate induce fenomenul de birefrință, care afectează grav calitatea imaginii

□ valorile efective ale tensiunilor admisibile din punct de vedere al birefrinței sunt individualizate pentru fiecare lentilă, având în vedere faptul că OPD introdus prin tensionare este direct proporțional cu grosimea componentei și coeficientul tensiunii optice, parametru care depinde de material. Astfel, pentru lentila convergentă, executată din sortul BK7, pentru respectarea criteriului Rayleigh, solicitarea exterioară trebuie limitată la $p=5\text{MPa}$, în timp ce pentru lentila divergentă, executată din sortul SF5, același criteriu conduce la limitarea $p=2\text{MPa}$. Rezultă că, pentru un sistem complex, care conține sorturi diferite de sticle și geometrii diferite ale componentelor, trebuie efectuată o simulare care să pună în evidență valoarea maximă admisibilă, stabilită ca fiind cea mai mică valoare dintre tensiunile admisibile individual, pe lentile

□ deformațiile pieselor optice au valori absolute foarte scăzute, de ordinul $10^{-3}\dots 10^{-5}$, mărimi care în majoritatea cazurilor, în construcția de mașini ar fi considerate total ne semnificative. Pentru lentile, însă, deplasările punctelor de pe generatoarea circulară nominală, cu o distribuție neuniformă, care caracterizează atât variația volumului, cât și variația formei, au o importanță cu totul specială. Deplasările care apar datorită presării pieselor optice au ca rezultat deformarea generatoarei suprafeței inițial sferice

□ rezemarea pe umărul de sprijin al monturii și apăsarea inelului filetat din partea opusă au ca efect comprimarea pieselor în zona marginală și întinderea în zona centrală. În acest caz, deplasările generatoarei în plan meridian conduc la accentuarea caracterului convex al dioptrilor, care dobândesc un aspect mai bombat decât cel specific sferei

□ din punct de vedere matematic, generatoarea deformată a lentilelor poate fi aproximată cu o curbă asferică de tipul hiperbolei sau elipsei. Pentru lentila convergentă, mai puțin tensionată și cu deplasări mai mici, s-au modelat matematic generatoare asferice de tipul hiperbolei, având constante ale conicei negative, subunitare, cuprinse în intervalul $(-1,0)$. Odată cu creșterea solicitării, constanta conicei este tot mai mare în valoare absolută, punând în evidență abaterea de la forma sferică. Pentru lentila divergentă, mai puternic tensionată, în toate cele trei cazuri de încărcare, constanta conicei de aproximare a generatoarei deformată este mai mică decât -1 , indicând curbe de tipul elipsei

□ analiza efectuată evidențiază un aspect de principiu particular, caracteristic pieselor optice și anume acela că deformațiile sunt mai importante decât tensiunile, din punct de vedere al influenței calității imaginii

□ sistemele optice cu dioptri asferici au caracteristici de calitate mai slabe decât cele determinate prin proiectare. Analiza dubletului cu suprafețe deformată în cele trei cazuri de încărcare studiate, a demonstrat pierderea caracterului limitat la difracție pe întreaga apertură a sistemului. Parametrii inițiali de calitate a imaginii s-au păstrat pe 85%, 70% și, respectiv 65% din câmpul obiect la solicitările $p=2\text{MPa}$, 5MPa , respectiv 10MPa . Din punct de vedere practic, se poate recomanda limitarea presiunii de contact la valoarea minimă $p=2\text{MPa}$. În același timp, se pot admite valori mai ridicate în măsura în care se admite pierderea liniarității sistemului pe un sector din zona marginală a câmpului obiect

□ în concluzie, se poate spune că montajul pieselor optice în montură, prin fixare cu inel filetat, are ca efect o stare triaxială de tensiune și deformație a lentilelor. Tensionarea în volumul pieselor induce birefringența și, implicit, o diferență de drum optic suplimentară a frontului de undă emergent. Deformațiile sunt echivalente cu abateri ale dioptrilor de la forma nominală sferică și conduc, cel puțin în zona marginală, la pierderea caracterului limitat la difracție al sistemului optic.

Pe parcursul capitolului 5 al tezei se pot evidenția următoarele contribuții originale:

- proiectarea unui dublet acromat original, limitat la difracție
- modelarea sistemului optomecanic dublet-montură-inel filetat în programul de element finit Abaqus
- simularea comportării structurii în trei cazuri de încărcare
- analiza efectului de birefrință cauzat de tensionarea în masă a lentilelor și recomandarea limitării solicitării exterioare la valori determinate direct funcție de sortul de sticlă optică și geometria componentei
- determinarea numerică a curbelor generatoare ale suprafețelor deformatate datorită solicitării mecanice
- modelarea matematică a generatoarelor deformatate prin curbe conice, pentru care s-au determinat expresiile analitice în forma canonică și constanta conice pentru compatibilizarea analizei calității imaginii cu programul OSLO
- evaluarea influenței abaterilor de la forma sferică nominală asupra parametrilor de calitate a imaginii, cu ajutorul programului OSLO
- recomandarea privind limitarea presiunii de contact lentilă-inel la $p=2\text{MPa}$, pentru păstrarea caracterului limitat la difracție al sistemului pe 85% din apertură

BIBLIOGRAFIE

[C1], [D2], [D4], [D5], [G4], [G7], [G17], [G18], [G19], [H3], [J2], [L2], [L1], [L2], [M1], [N1], [N5], [O3], [O4], [P6], [P10], [S1], [S2], [S3], [S6], [S16], [S8], [T2], [T5], [Z2], [W14], [W22]

6. ANALIZA NUMERICĂ A STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE A SUBANSAMBLURILOR OPTOMECANICE CU ERORI DE MONTAJ

6.1. MODELAREA ȘI SIMULAREA ANSAMBLULUI OPTOMECANIC REAL PRIN MEF

Studiul sistemului optomecanic real a fost conceput având în vedere următoarele aspecte:

- sistemul optic rezultat prin algoritmul de proiectare este limitat la difracție. Practic s-a analizat același dublet supus studiului în capitolul anterior. Utilizarea aceluiași sistem optic este, evident, necesară pentru a putea compara comportarea structurii în poziția nominală și cea afectată de erori, într-un câmp de toleranțe impus de criteriile optice. Scopul final este realizarea unei conexiuni sistem optic ideal – sistem optic real afectat de erori controlate, care se încadrează într-un domeniu admisibil – modificare a parametrilor de calitate a imaginii ca urmare a presării la montaj
- pentru modelarea geometrică a sistemului, față de poziția nominală s-au impus o descentrare de 0.02 mm și o înclinare de 0.1° (fig. 6.1), care, din punct de vedere optic asigură preservarea caracterului limitat la difracție al dubletului [G16]

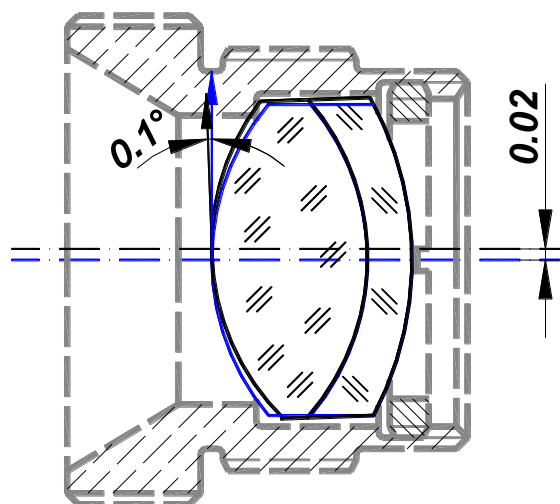


Fig. 6.1. Poziția nominală (linie albastră) și afectată de erori (linie neagră) a dubletului în montură (linie întreruptă gri)

□ având în vedere concluziile capitolului anterior s-au realizat simulări numai pentru două cazuri de încărcare, și anume, $p=2\text{MPa}$ și $p=5\text{MPa}$. Al treilea caz, corespunzător solicitării $p=10\text{MPa}$ s-a dovedit inacceptabil chiar și pentru structura așezată în poziția nominală. Se poate deduce că efectele în cazul sistemului descentrat și înclinat vor fi mai accentuate și ca urmare, cazul poate fi omis.

Se prezintă, în continuare, rezultatele obținute prin simulări.

□ presiunea de contact $p=2\text{MPa}$

Tensiunile echivalente von Mises maxime au valori puțin superioare solicitării pentru lentila divergentă (fig. 6.3) și se situează cam la jumătate pentru lentila convergentă (fig. 6.2)

Se observă aceeași distribuție a tensiunilor pe componente, în sensul că lentila cea mai tensionată este cea pe care se aplică direct solicitarea exterioară. Aceasta preia aproximativ jumătate din eforturile care apar.

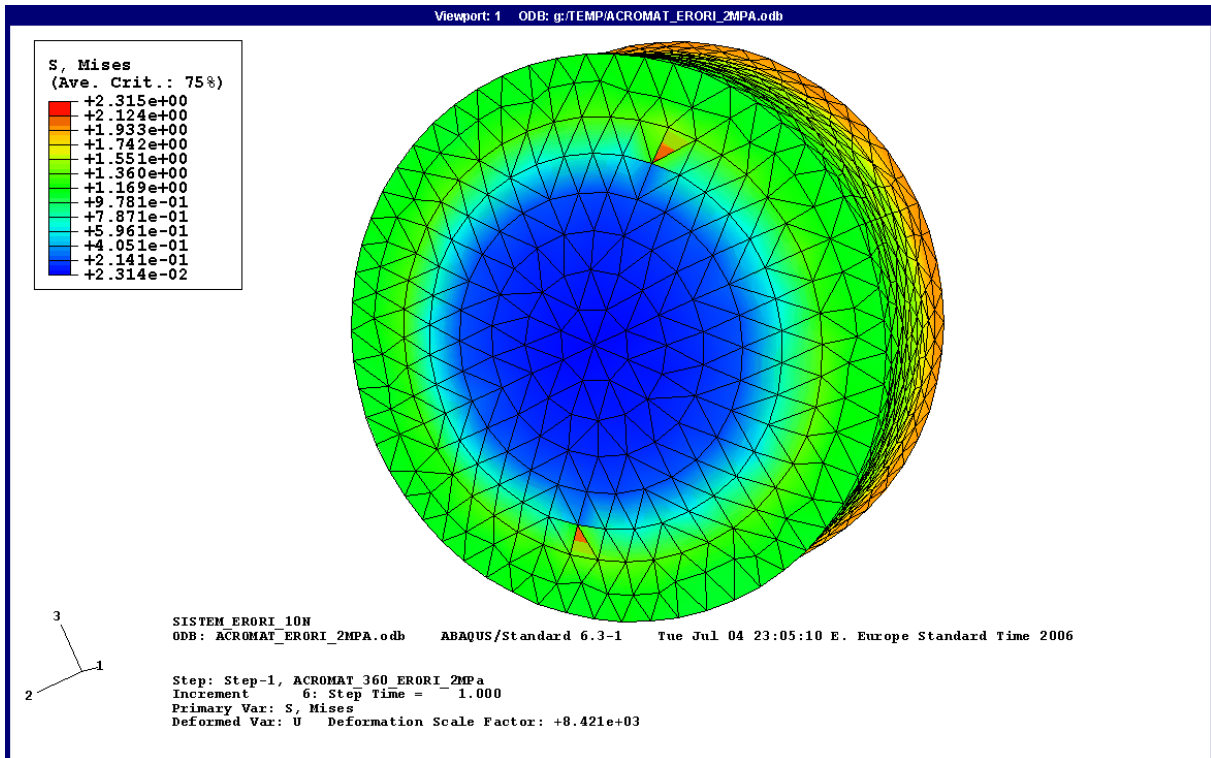


Fig. 6.2. Tensiunile echivalente von Mises pentru lentila convergentă

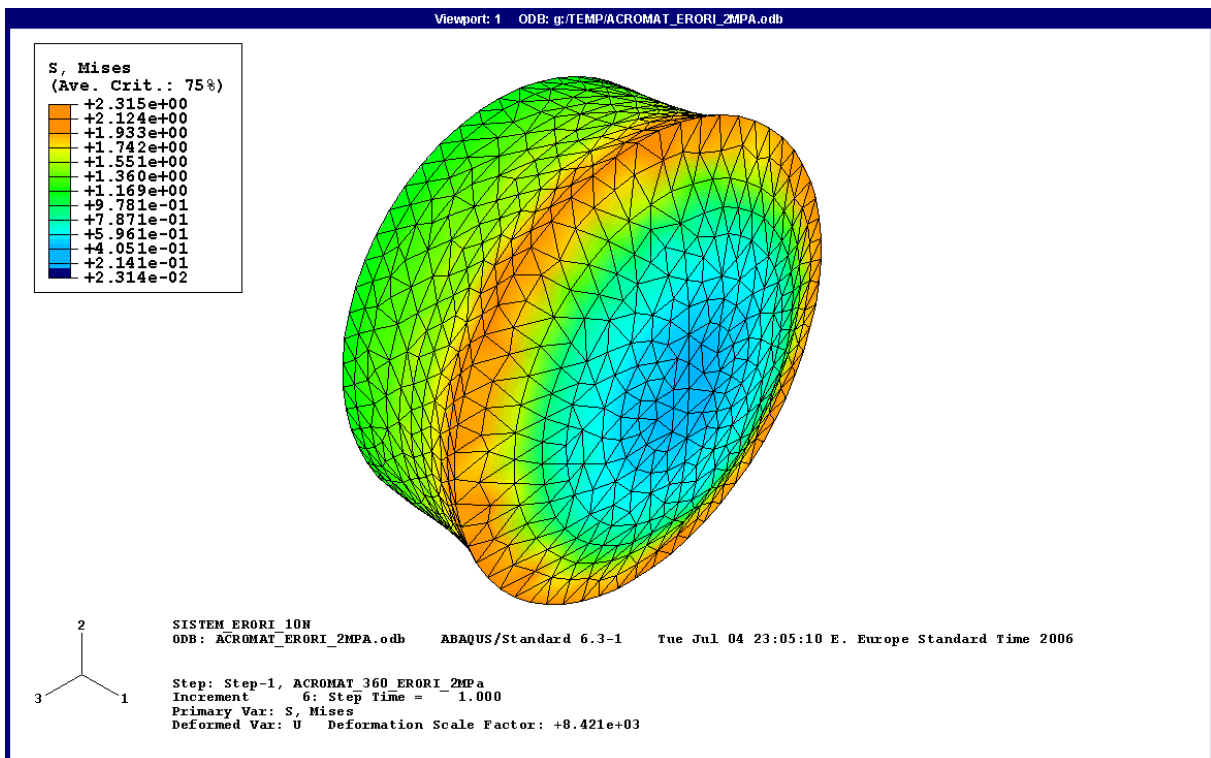


Fig. 6.3. Tensiunile echivalente von Mises pentru lentila divergentă

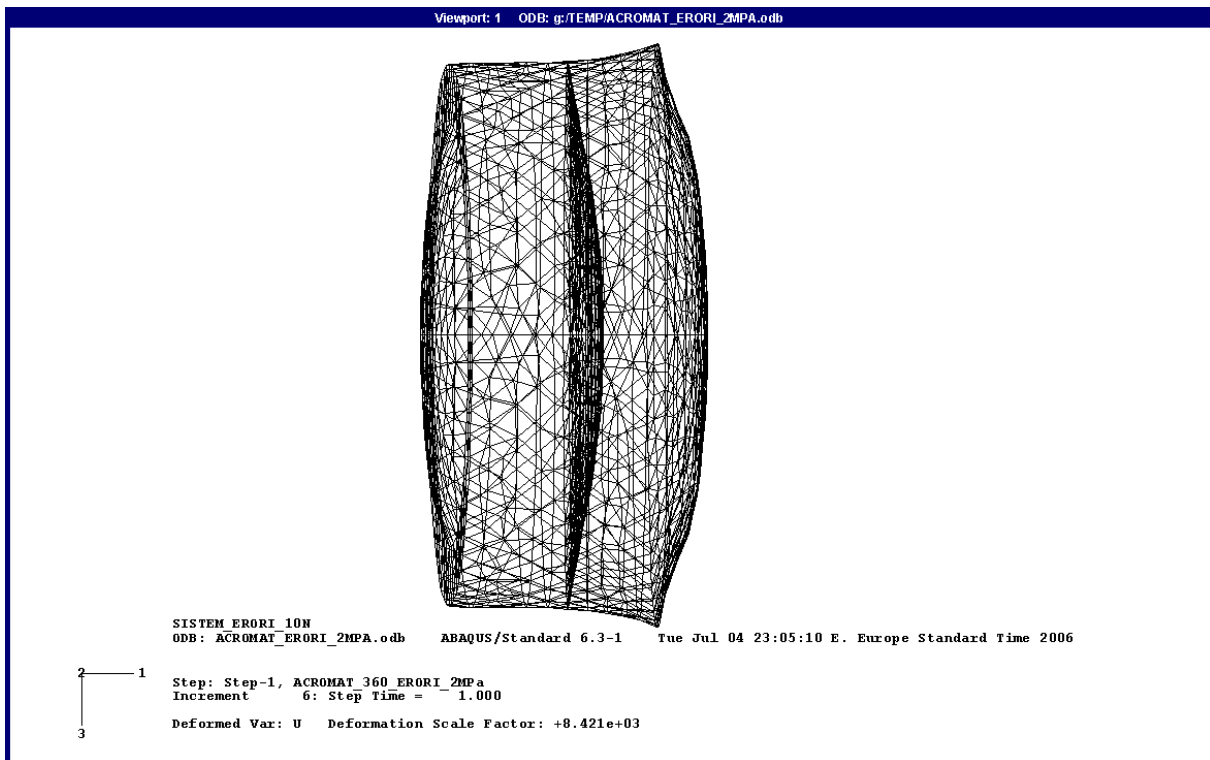


Fig. 6.4. Deplasările totale ale dubletului

În figura 6.4 este redată o imagine a structurii deformate, a cărei ușoară asimetrie în raport cu axa optică poate fi observată calitativ.

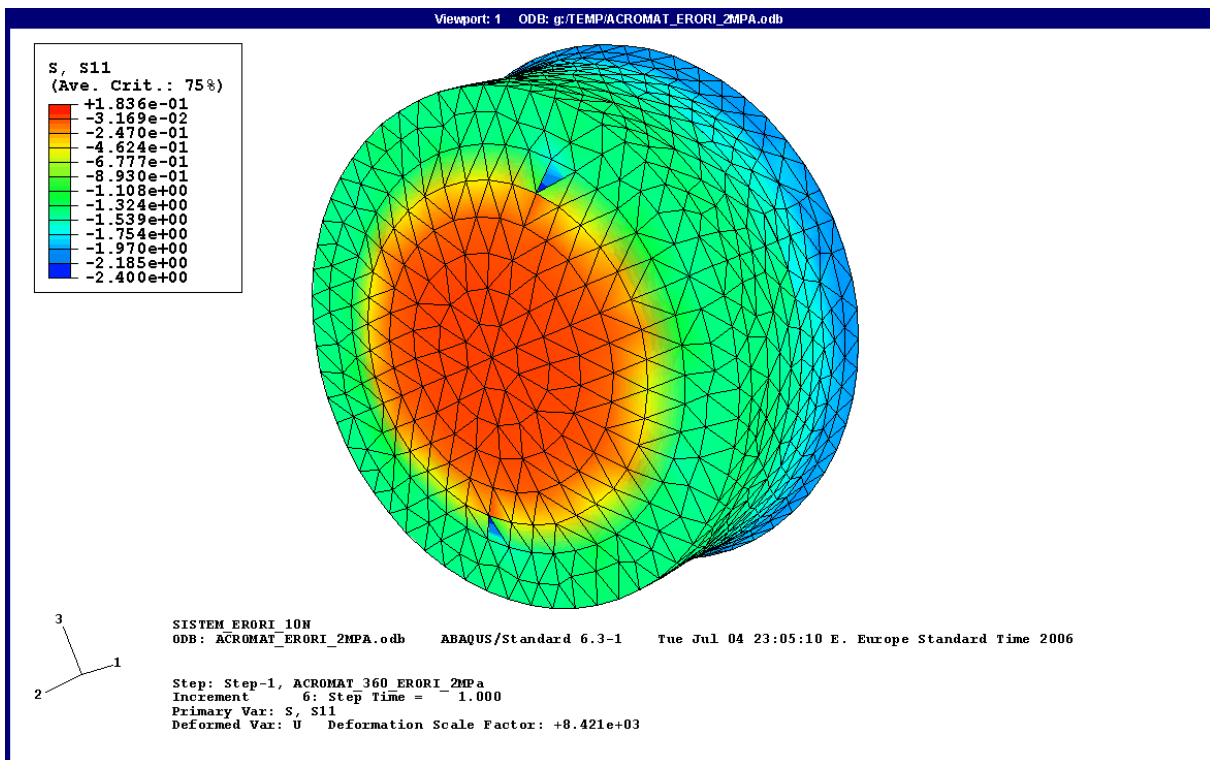


Fig. 6.5. Tensiunile σ_x pentru lentila convergentă

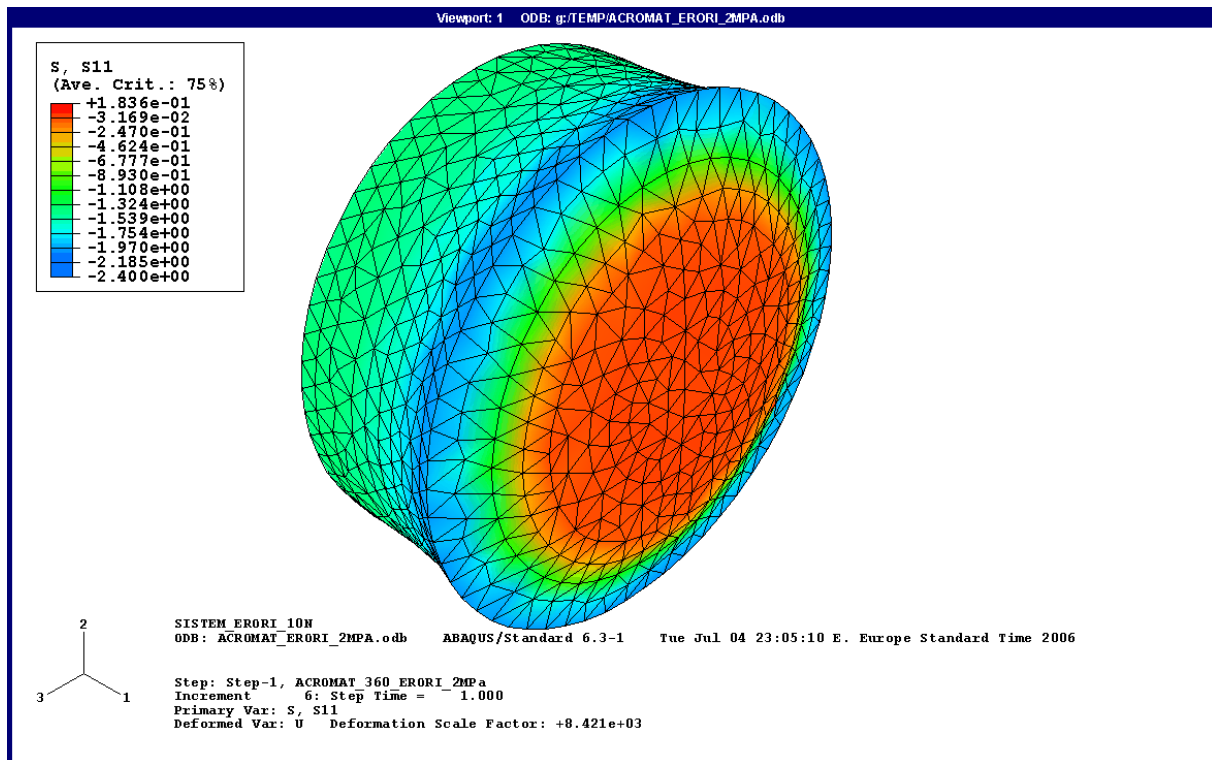


Fig. 6.6. Tensiunile σ_x pentru lentila divergentă

Asimetria structurii schimbă repartiția tensiunilor în raport cu sistemul de axe global atașat sistemului. Tensiunile σ_x au valori mai ridicate (2.4MPa) față de sistemul așezat în poziția nominală la aceeași încărcare (2.0 MPa) – figurile 5.11 și 5.12.

Starea triaxială de tensiune și deformație este bine pusă în evidență la un studiu al tensiunilor principale. Toate trei au valori finite și comparabile.

Urmărind figurile 6.7...6.9, care redau distribuția tensiunilor principale pe structură, se pot preleva următoarele valori:

- $\sigma_1 \sim 1\text{MPa}$
- $\sigma_2 \sim 0.74\text{MPa}$
- $\sigma_3 \sim -2.8\text{MPa}$

Se observă faptul că în valoare absolută cele mai mari sunt tensiunile σ_3 , cu efect de compresiune pe jumătatea marginală a aperturii și de întindere pe centrul structurii.

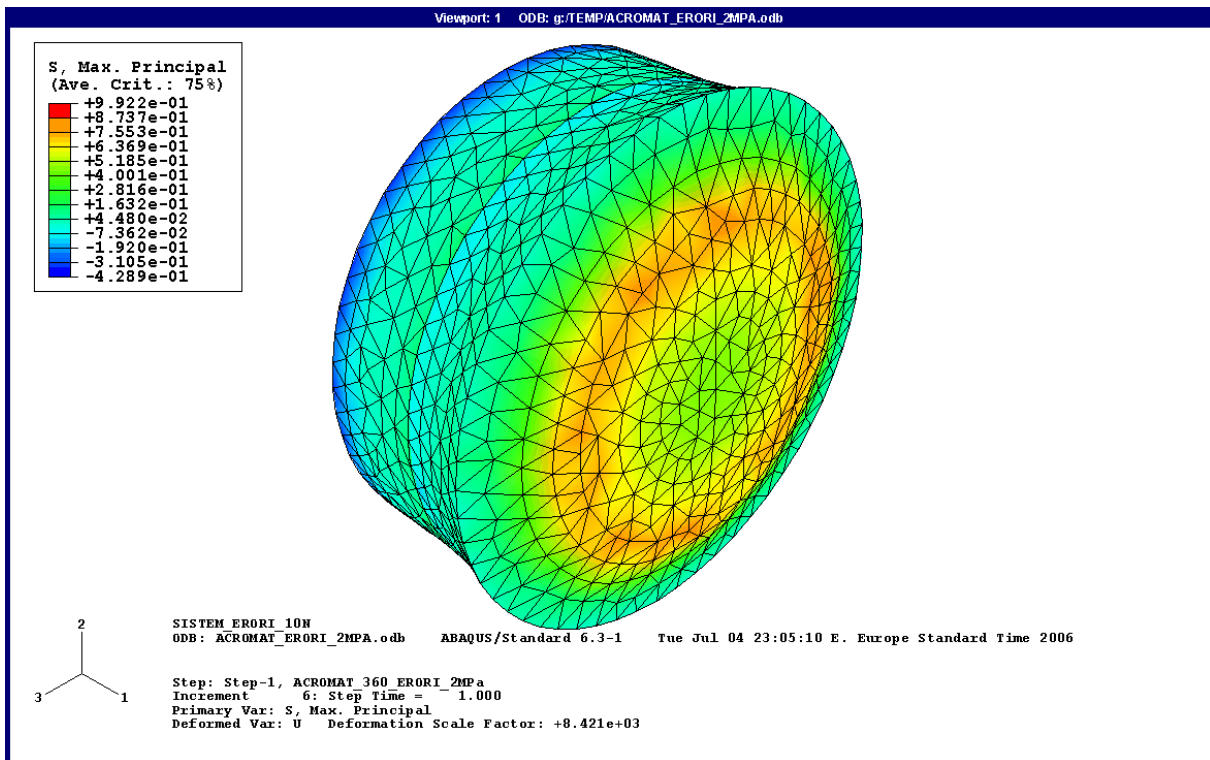


Fig. 6.7. Distribuția tensiunilor principale maxime σ_1 pe ansamblu

Comparând distribuția tensiunilor σ_x și σ_3 rezultă că axa principală corespunzătoare tensiunii principale minime nu coincide cu axa optică.

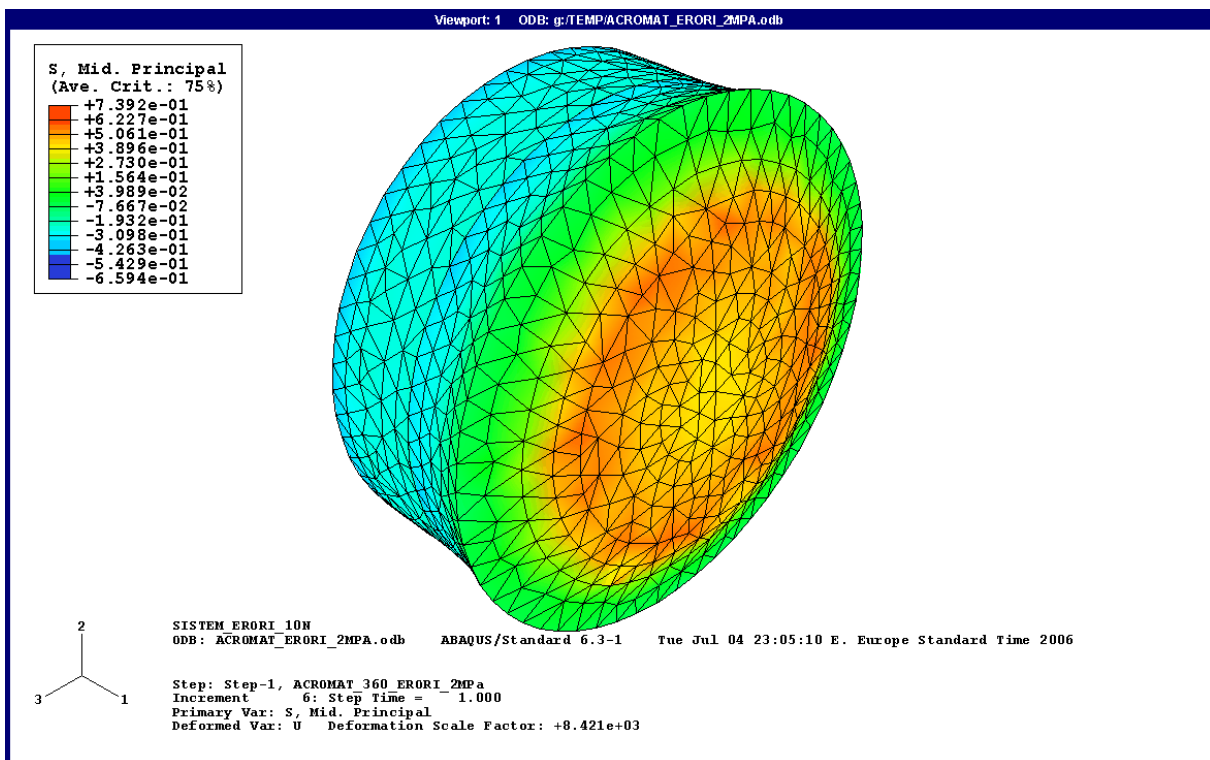


Fig. 6.8. Distribuția tensiunilor principale medii σ_2 pe ansamblu

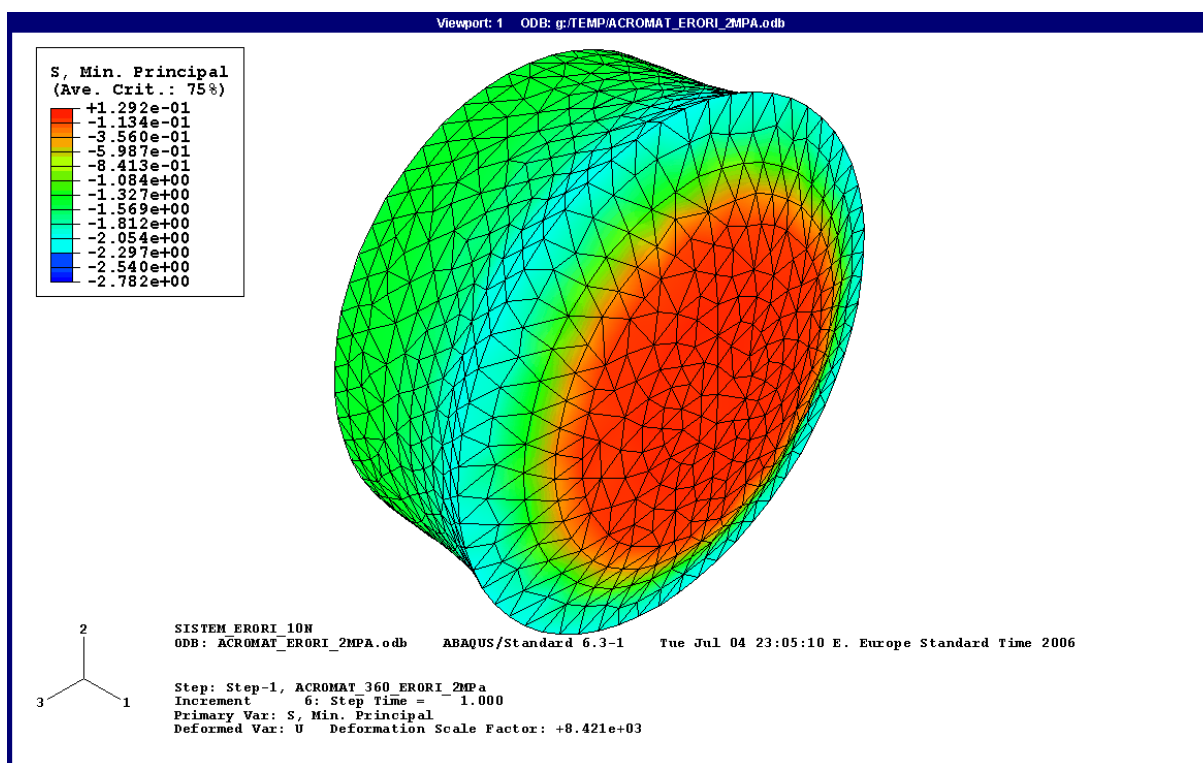


Fig. 6.9. Distribuția tensiunilor principale minime σ_3 pe ansamblu

Pentru studiul deformării dioptrilor s-au prelevat valorile coordonatelor x , y , z inițiale și finale, corespunzătoare aplicării presiunii $p=2\text{MPa}$. Descentrarea și înclinarea, care au fost impuse în raport cu axa x , respectiv axa y și, au valori absolute reduse și efectul lor pe axa z , asimilabilă planului sagital este neglijabil. Deplasările pe axa z sunt de ordinul $10^{-7}\dots 10^{-8}$ sau mai mici, ceea ce conduce la acceptarea păstrării ipotezei de simetrie de rotație a dioptrilor. Datele numerice relative la deplasările în plan sagital nu sunt prezentate în continuare, fiind considerate nesemnificative. Se acceptă ipoteza că dioptrii deformați au o generatoare curbă și o directoare circulară. În acest caz, este necesară și suficientă determinarea generatoarei în plan meridian, prin analiza coordonatelor x și y .

Tabelele 6.1 și 6.2 redau valorile inițiale, deplasările și valorile finale ale coordonatelor punctelor aparținând generatoarei suprafeței libere a lentilei convergente.

Tabelul 6.1

| X_0 | ΔX_{2MPa} | X_{2MPa} | r_{CERC} |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------|
| 3.0587E-01 | -3.5182E-05 | 3.0584E-01 | 62.000 |
| 1.9427E-01 | -4.5441E-05 | 1.9422E-01 | 62.000 |
| 1.0847E-01 | -4.9725E-05 | 1.0842E-01 | 62.000 |
| 4.8068E-02 | -5.1203E-05 | 4.8017E-02 | 62.000 |
| 1.2097E-02 | -5.1514E-05 | 1.2045E-02 | 62.000 |
| 1.3981E-02 | -5.1533E-05 | 1.3930E-02 | 62.000 |
| 1.1582E-02 | -5.1640E-05 | 1.1530E-02 | 62.000 |
| 4.6962E-02 | -5.1245E-05 | 4.6910E-02 | 62.000 |
| 1.0669E-01 | -4.9710E-05 | 1.0664E-01 | 62.000 |
| 1.9137E-01 | -4.5359E-05 | 1.9132E-01 | 62.000 |
| 3.0090E-01 | -3.4392E-05 | 3.0087E-01 | 62.000 |

Linia cu caractere boldate marchează vârful dioptrului.

Ultima coloană a tabelului 6.1 conține o confirmare a faptului că punctele (x_0, y_0) aparțin unui cerc de rază $r=62$ mm.

Urmărind datele din tabelul 6.1 se observă că descentrarea și înclinarea sunt reflectate prin coordonate inițiale care nu mai prezintă simetrie față de axa optică, așa cum era în cazul poziției nominale a sistemului optic, iar vârful dioptrului nu se mai află în punctul de coordonate $(0,0)$.

Tabelul 6.2

| Y_0 | ΔY_{2MPa} | Y_{MPa} |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| 6.1510E+00 | 7.6294E-06 | 6.1510E+00 |
| 4.9042E+00 | 3.3379E-06 | 4.9042E+00 |
| 3.6658E+00 | 7.1526E-07 | 3.6658E+00 |
| 2.4409E+00 | -7.1526E-07 | 2.4409E+00 |
| 1.2247E+00 | -9.5367E-07 | 1.2247E+00 |
| 1.3166E+00 | -8.1211E-07 | 1.3166E+00 |
| -1.1984E+00 | -7.1526E-07 | -1.1984E+00 |
| -2.4127E+00 | -9.5367E-07 | -2.4127E+00 |
| -3.6357E+00 | -2.3842E-06 | -3.6357E+00 |
| -4.8675E+00 | -4.7684E-06 | -4.8675E+00 |
| -6.1009E+00 | -7.6294E-06 | -6.1009E+00 |

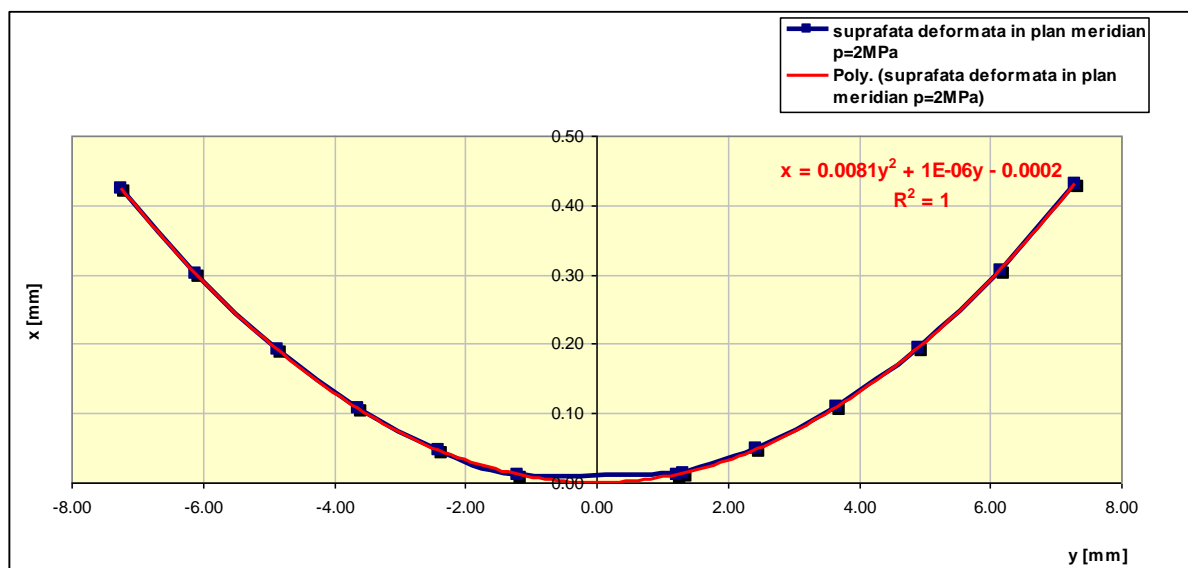


Fig. 6.10. Generatoarea inițială și aproximarea generatoarei deformate a dioptrelui liber al lentilei convergente

În figura 6.10 este reprezentată curba generatoare a suprafeței deformate (linie albastră), pentru care s-a căutat un polinom de aproximare de gradul II, având ca puncte de precizie coordonatele x_{2MPa} , y_{2MPa} din tabelele 6.1 și 6.2. A rezultat o parabolă, a cărei ecuație analitică este înscrisă în câmpul figurii.

Constanta conicei pentru parabolă este $k = -1$. Ecuația în forma canonică a curbei devine:

$$x = \frac{y^2}{124}. \quad (6.1)$$

Din figură se observă că ordonatele capetelor curbei generatoare sunt diferite (arcul din stânga are o ordonată mai mică decât cel din dreapta axei x), datorită descentrării și înclinării. Arcul de parabolă reprezentat cu linie roșie în figura 6.10 are, de asemenea, porțiuni inegale la dreapta și la stânga axei x . Deși parabola de interpolare nu este rotită (are axa mare orientată de-a lungul axei optice), erorile față de profilul real deformat nu depășesc 0.5% (tabelul 6.3).

Tabelul 6.3

| X_{2MPa} | $x = \frac{y^2}{124}$ | $x = 0.0081y^2 + 0.000001y - 0.0002$ | $\Delta = X_{2MPa} - \frac{y^2}{124}$ | $\frac{\Delta}{X_{2MPa}} \cdot 100$ |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 3.0584E-01 | 3.0512E-01 | 3.0627E-01 | -0.00072 | -0.23 |
| 1.9422E-01 | 1.9396E-01 | 1.9462E-01 | -0.00026 | -0.13 |
| 1.0842E-01 | 1.0837E-01 | 1.0865E-01 | -4.5E-05 | -0.04 |
| 4.8017E-02 | 4.8049E-02 | 4.8063E-02 | 3.25E-05 | 0.07 |
| 1.2045E-02 | 1.2096E-02 | 1.1950E-02 | 5.03E-05 | 0.42 |
| 1.3930E-02 | 1.3980E-02 | 1.3843E-02 | 4.99E-05 | 0.36 |
| 1.1530E-02 | 1.1581E-02 | 1.1431E-02 | 5.06E-05 | 0.44 |
| 4.6910E-02 | 4.6944E-02 | 4.6948E-02 | 3.35E-05 | 0.07 |
| 1.0664E-01 | 1.0660E-01 | 1.0686E-01 | -4.2E-05 | -0.04 |
| 1.9132E-01 | 1.9107E-01 | 1.9171E-01 | -0.00025 | -0.13 |
| 3.0087E-01 | 3.0017E-01 | 3.0129E-01 | -0.0007 | -0.23 |

Studiul evoluției suprafeței libere a lentilei divergente poate fi urmărit cu ajutorul datelor din tabelele 6.4 și 6.5, care indică valorile inițiale ale coordonatelor x , y aparținând generatoarei circulare, deplasările de-a lungul axei x și y și valorile coordonatelor finale ale punctelor deplasate.

Tabelul 6.4

| X_0 | ΔX_{2MPa} | X_{2MPa} | r_{CERC} |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------|
| 9.1809E+00 | -1.9455E-04 | 9.1811E+00 | 128.101 |
| 9.2508E+00 | -1.4782E-04 | 9.2509E+00 | 128.100 |
| 9.3119E+00 | -9.8229E-05 | 9.3120E+00 | 128.100 |
| 9.3662E+00 | -7.5340E-05 | 9.3662E+00 | 128.100 |
| 9.4109E+00 | -6.1989E-05 | 9.4110E+00 | 128.100 |
| 9.4458E+00 | -5.3406E-05 | 9.4458E+00 | 128.100 |
| 9.4750E+00 | -4.8637E-05 | 9.4750E+00 | 128.100 |
| 9.4928E+00 | -4.5776E-05 | 9.4929E+00 | 128.100 |
| 9.4961E+00 | -4.5776E-05 | 9.4962E+00 | 128.100 |
| 9.4815E+00 | -4.7684E-05 | 9.4816E+00 | 128.100 |
| 9.4556E+00 | -5.2452E-05 | 9.4557E+00 | 128.100 |
| 9.4235E+00 | -6.1035E-05 | 9.4235E+00 | 128.100 |
| 9.3819E+00 | -7.4387E-05 | 9.3820E+00 | 128.100 |
| 9.3302E+00 | -9.5367E-05 | 9.3303E+00 | 128.100 |
| 9.2717E+00 | -1.4496E-04 | 9.2718E+00 | 128.100 |
| 9.2023E+00 | -1.9074E-04 | 9.2025E+00 | 128.101 |

Tabelul 6.5

| Y_0 | $\Delta Y_{2\text{MPa}}$ | Y_{MPa} |
|--------------------|--------------------------|--------------------|
| 9.0354E+00 | 6.8665E-05 | 9.0354E+00 |
| 7.9872E+00 | 6.2943E-05 | 7.9871E+00 |
| 6.9401E+00 | 5.4836E-05 | 6.9401E+00 |
| 5.8542E+00 | 4.2439E-05 | 5.8542E+00 |
| 4.7764E+00 | 3.0984E-05 | 4.7764E+00 |
| 3.7262E+00 | 2.2888E-05 | 3.7261E+00 |
| 2.5319E+00 | 1.3590E-05 | 2.5319E+00 |
| 1.3542E+00 | 6.3181E-06 | 1.3542E+00 |
| -9.9643E-01 | -7.8678E-06 | -9.9642E-01 |
| -2.1749E+00 | -1.5288E-05 | -2.1749E+00 |
| -3.3710E+00 | -2.4796E-05 | -3.3709E+00 |
| -4.4271E+00 | -3.3379E-05 | -4.4271E+00 |
| -5.4994E+00 | -4.3869E-05 | -5.4994E+00 |
| -6.5935E+00 | -5.7221E-05 | -6.5934E+00 |
| -7.6453E+00 | -6.3267E-05 | -7.6452E+00 |
| -8.7288E+00 | -7.5340E-05 | -8.7287E+00 |

Figura 6.11 conține reprezentările profilului meridian real deformat (linie albastră) și curba de aproximare a generatoarei cu ajutorul unui polinom de interpolare de gradul II.

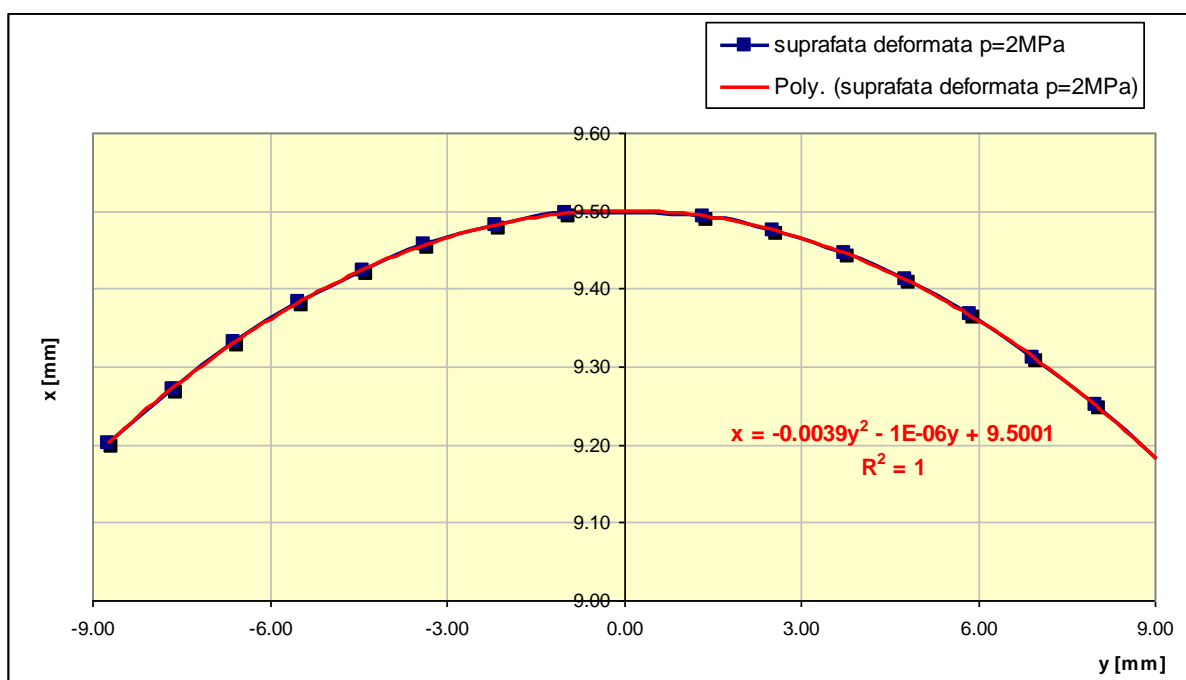


Fig. 6.11. Generatoarea inițială și aproximarea generatoarei deformate a dioptrului liber al lentilei divergente

Ecuția parabolei de aproximare este:

$$x = -\frac{y^2}{256.2} \tag{6.2}$$

În tabelul 6.6 sunt înscrise datele numerice de comparație a abscisei x prelevate din programul Abaqus, a abscisei determinate aplicând ecuația canonică (6.2), a abscisei x calculate ca polinom de interpolare de gradul II, a cărei ecuație este prezentată în câmpul figurii 6.11, precum și erorile absolute și relative procentuale, care sunt inferioare valorii de 0.15%.

Coloana 1 conține abscisele raportate la sistemul de referință local, având originea în vârful dioptrului nominal, în timp ce coloana a doua indică abscisele exprimate față de sistemul de axe global, cu originea în vârful primului dioptru al lentilei convergente. Trecerea la sistemul de axe local este necesară pentru formularea corectă a ecuației canonice a parabolei.

Tabelul 6.6

| X_{2MPa0} | X_{2MPa} | $x = -\frac{y^2}{256.2}$ | $x = -0.0039y^2 - 0.000001y + 9.5001$ | $\Delta = X_{2MPa0} + \frac{y^2}{256.2}$ | $\frac{\Delta}{X_{2MPa0}} \cdot 100$ |
|-------------|------------|--------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| -0.3191 | 9.1809 | -0.31865 | -0.3183 | -0.0004 | 0.13 |
| -0.2492 | 9.2508 | -0.24900 | -0.2487 | -0.0002 | 0.10 |
| -0.1881 | 9.3119 | -0.18800 | -0.1877 | -0.0001 | 0.08 |
| -0.1338 | 9.3662 | -0.13377 | -0.1336 | -0.0001 | 0.05 |
| -0.0891 | 9.4109 | -0.08905 | -0.0889 | 0.0000 | 0.04 |
| -0.0542 | 9.4458 | -0.05419 | -0.0541 | 0.0000 | 0.02 |
| -0.0250 | 9.4750 | -0.02502 | -0.0249 | 0.0000 | 0.01 |
| -0.0072 | 9.4928 | -0.00716 | -0.0071 | 0.0000 | 0.00 |
| -0.0039 | 9.4961 | -0.00388 | -0.0038 | 0.0000 | 0.00 |
| -0.0185 | 9.4815 | -0.01846 | -0.0183 | 0.0000 | 0.01 |
| -0.0444 | 9.4556 | -0.04435 | -0.0442 | 0.0000 | 0.02 |
| -0.0765 | 9.4235 | -0.0765 | -0.0763 | 0.0000 | 0.03 |
| -0.1181 | 9.3819 | -0.11804 | -0.1178 | -0.0001 | 0.05 |
| -0.1698 | 9.3302 | -0.16968 | -0.1694 | -0.0001 | 0.07 |
| -0.2283 | 9.2717 | -0.22814 | -0.2278 | -0.0002 | 0.09 |
| -0.2977 | 9.2023 | -0.29739 | -0.2970 | -0.0004 | 0.12 |

□ presiunea de contact $p=5MPa$

Relativ la distribuția, raportul și semnificația tensiunilor pe cele două lentile rezultă aceleași concluzii ca și pentru cazul de încărcare anterior.

Diferă numai valorile efective ale diferitelor componente de tensiune.

În formă grafică pot fi studiate tensiunile von Mises pentru lentila convergentă (fig. 6.12), tensiunile von Mises pentru lentila divergentă (fig. 6.13), deplasările totale ale ansamblului (fig. 6.14), tensiunile σ_x pentru lentila convergentă (fig. 6.15), respectiv divergentă (fig. 6.16), tensiunile principale maxime (fig. 6.17), tensiunile principale medii (fig. 6.18) și tensiunile principale minime (fig. 6.19), pentru ansamblu.

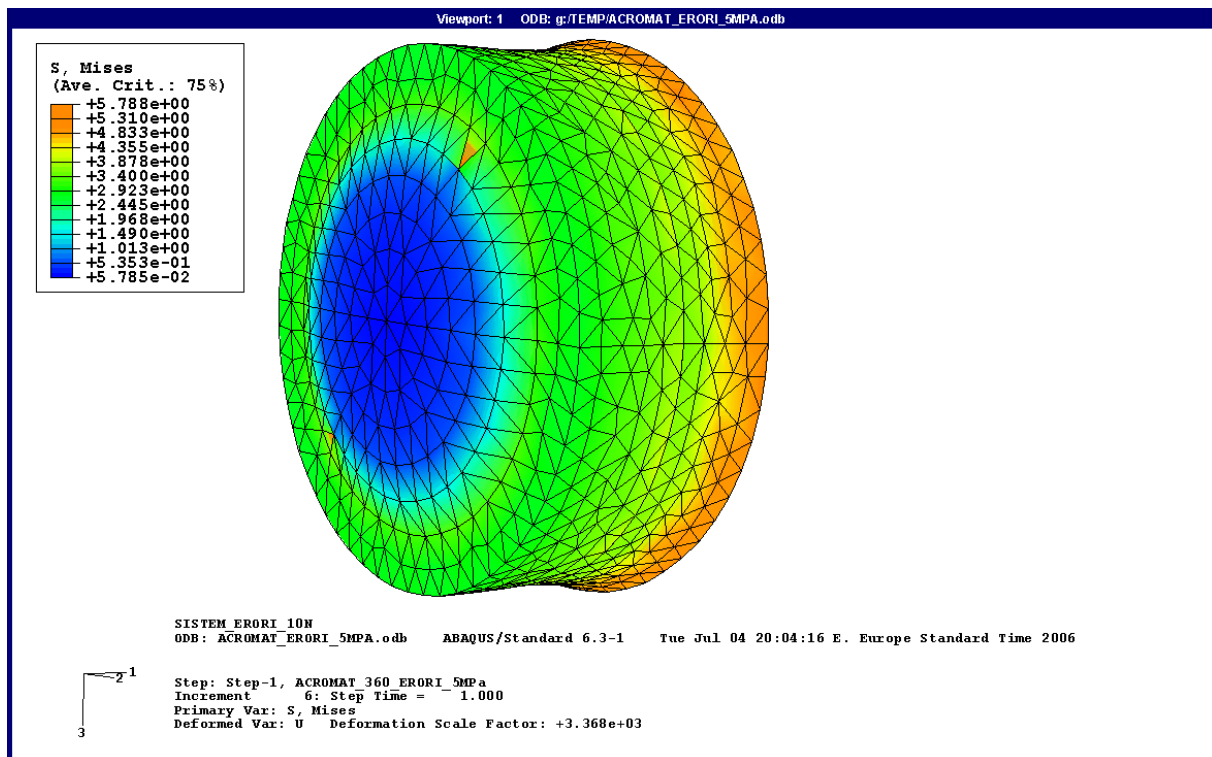


Fig. 6.12. Distribuția tensiunilor von Mises pe lentila convergentă

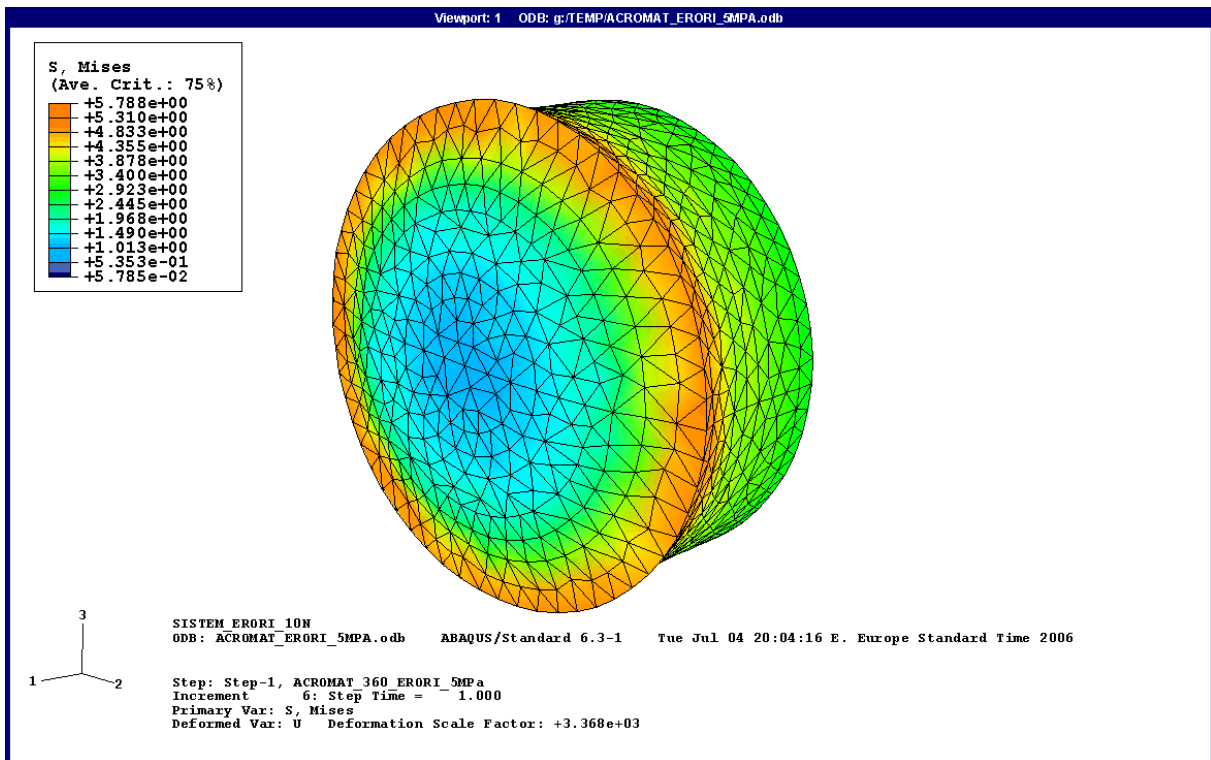


Fig. 6.13. Distribuția tensiunilor von Mises pe lentila divergentă

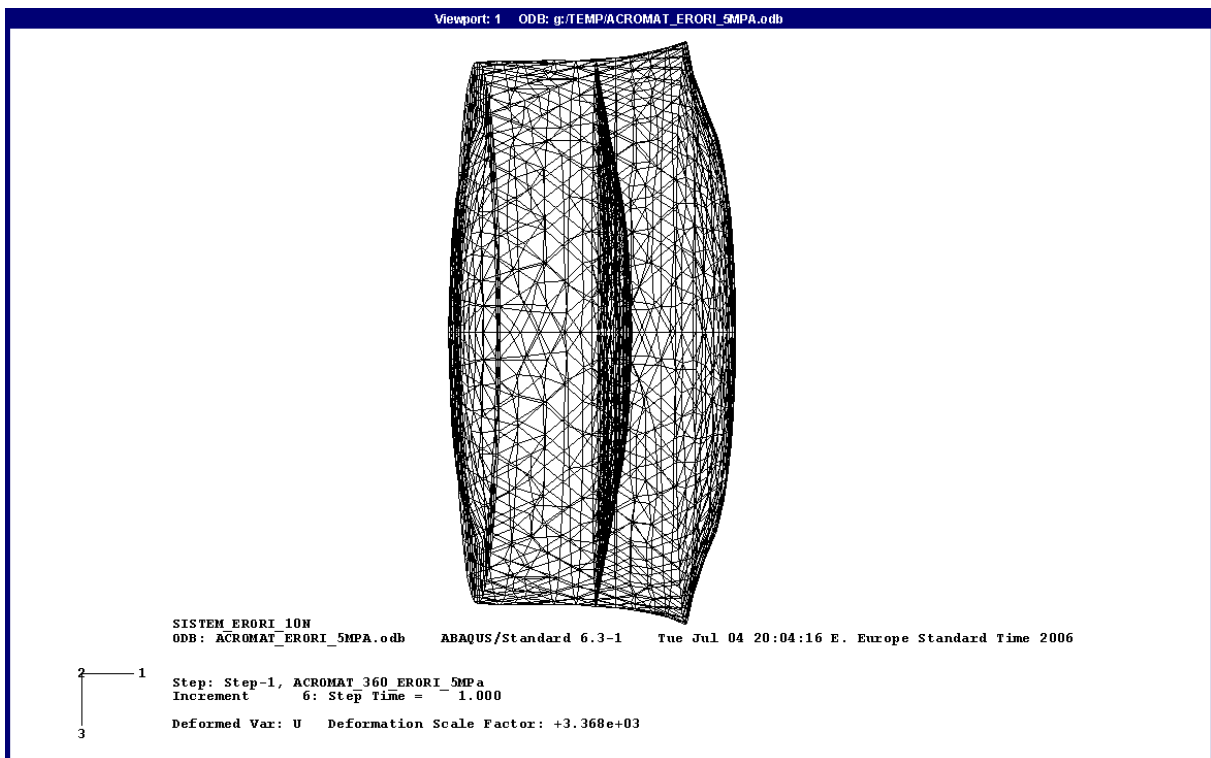


Fig. 6.14. Deplasările totale ale structurii

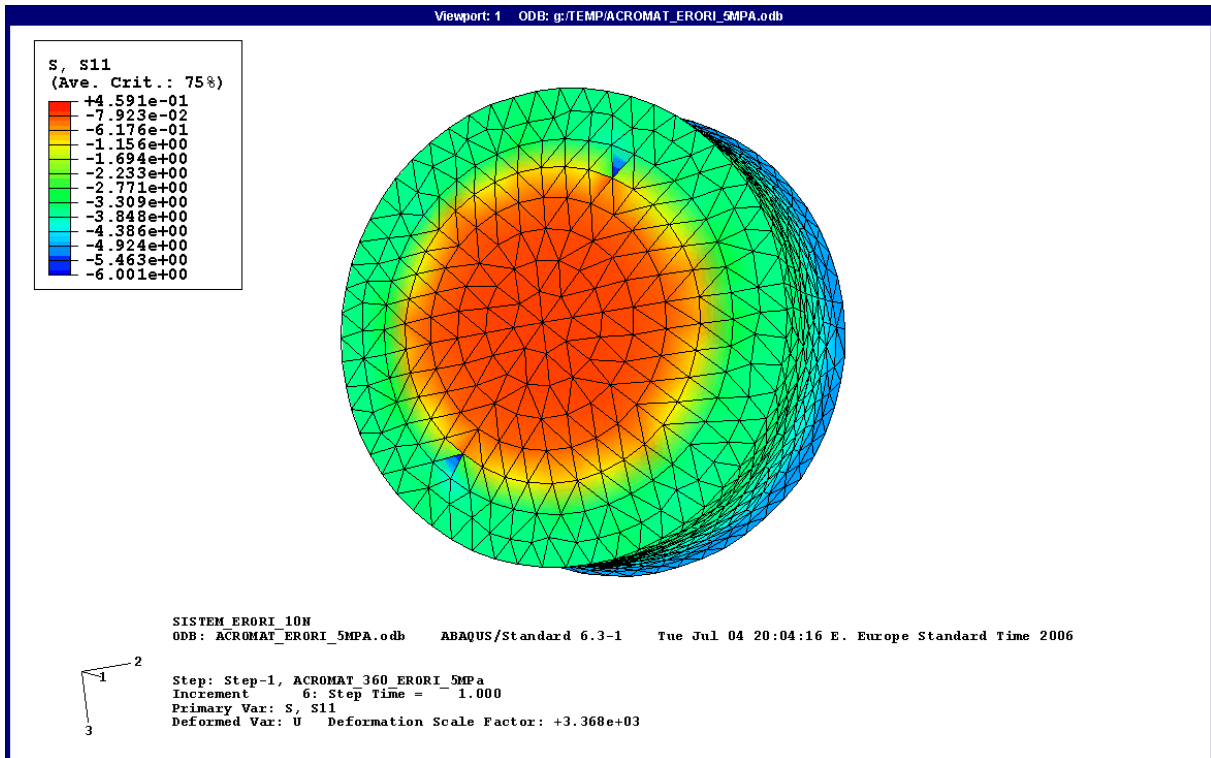


Fig. 6.15. Distribuția tensiunilor σ_x pe lentila convergentă

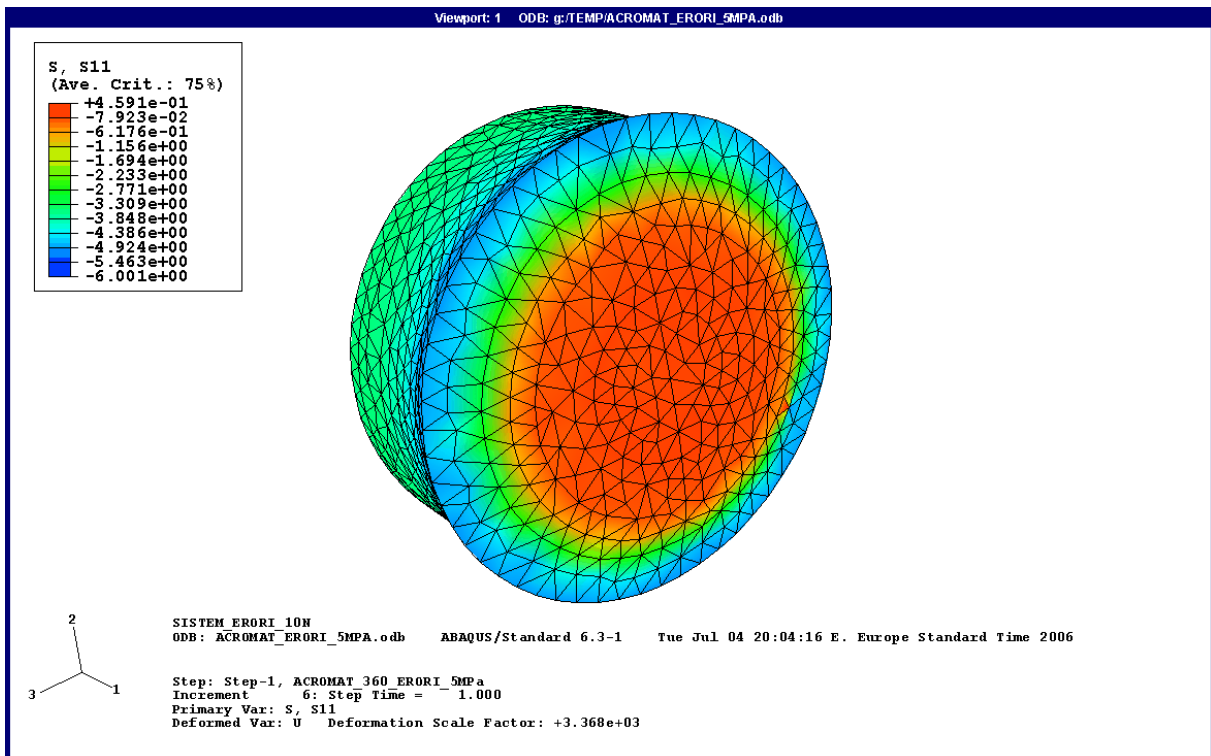


Fig. 6.16. Distribuția tensiunilor σ_x pe lentila divergentă

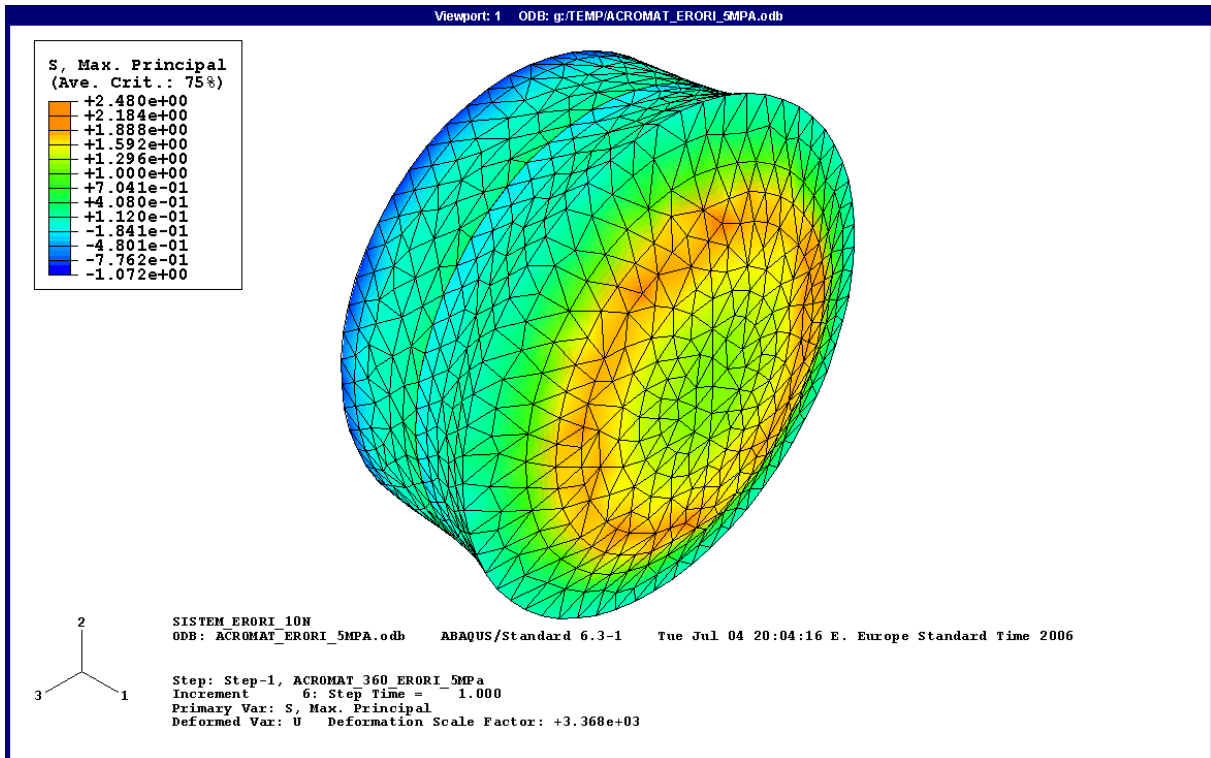


Fig. 6.17. Distribuția tensiunilor principale maxime pe ansamblu

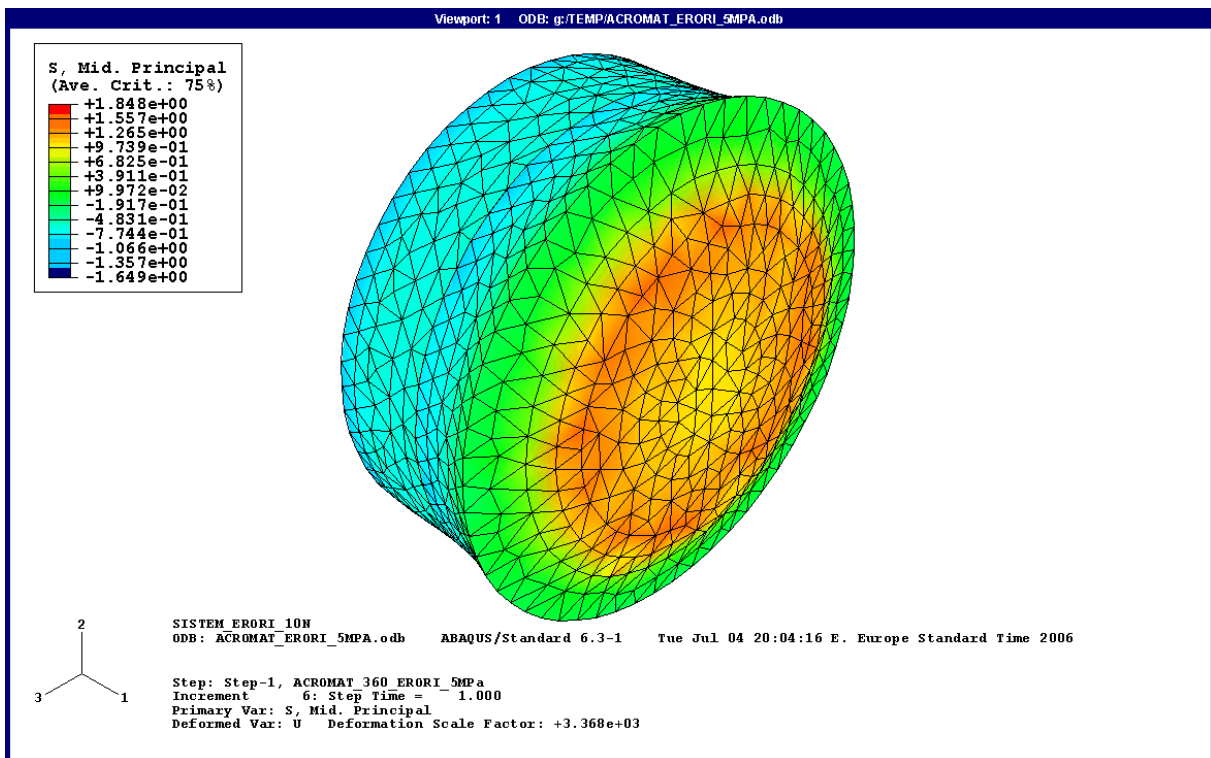


Fig. 6.18. Distribuția tensiunilor principale medii pe ansamblu

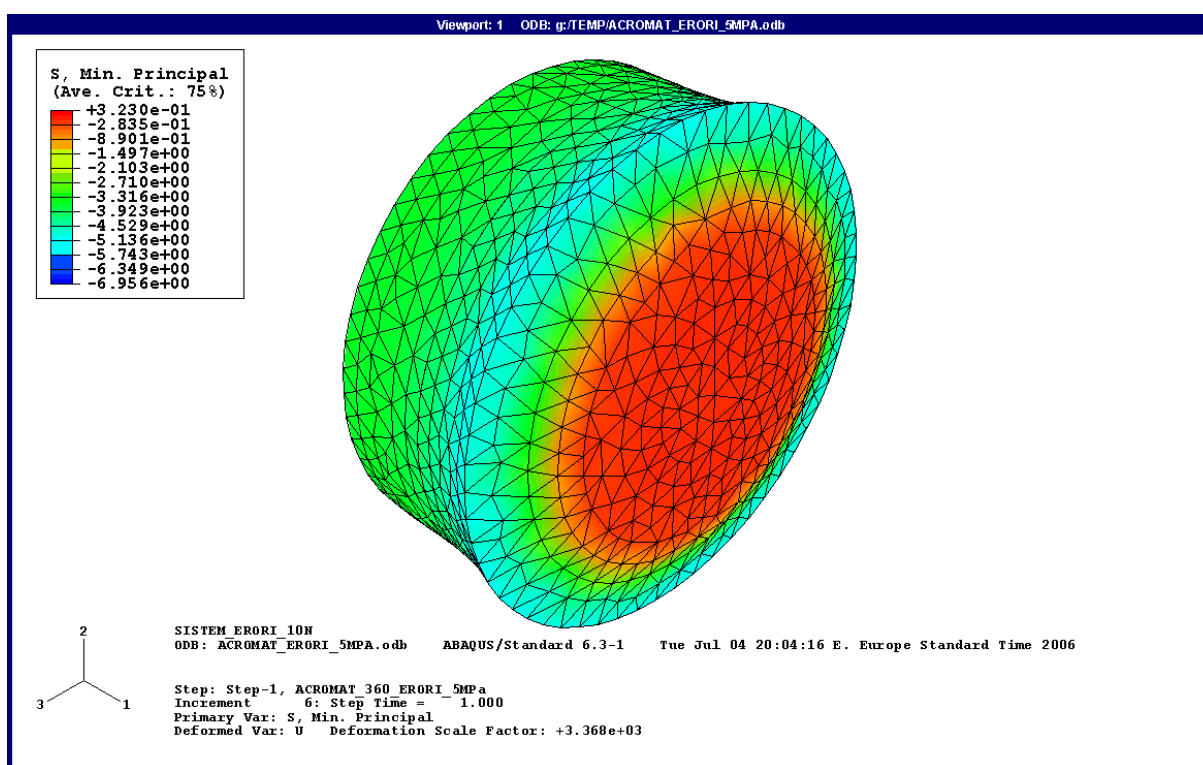


Fig. 6.19. Distribuția tensiunilor principale minime pe ansamblu

În continuare este dezvoltat același tip de analiză numerică, utilizat în cazurile anterioare, pentru determinarea generatoarei suprafeței deformate a lentilei convergente (tab.6.7...6.9 și fig. 6.20) și a lentilei divergente (tab. 6.10...6.12 și fig. 6.21).

Tabelul 6.7

| X_0 | ΔX_{5MPa} | X_{5MPa} |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| 5.5856E-01 | 0.0000E+00 | 5.5856E-01 |
| 4.3170E-01 | 0.0000E+00 | 4.3170E-01 |
| 3.0587E-01 | -8.7946E-05 | 3.0578E-01 |
| 1.9427E-01 | -1.1359E-04 | 1.9415E-01 |
| 1.0847E-01 | -1.2431E-04 | 1.0834E-01 |
| 4.8068E-02 | -1.2801E-04 | 4.7940E-02 |
| 1.2097E-02 | -1.2879E-04 | 1.1968E-02 |
| 1.3981E-02 | 1.2883E-04 | 1.4110E-02 |
| 1.1582E-02 | -1.2910E-04 | 1.1453E-02 |
| 4.6962E-02 | -1.2811E-04 | 4.6833E-02 |
| 1.0669E-01 | -1.2429E-04 | 1.0656E-01 |
| 1.9137E-01 | -1.1340E-04 | 1.9125E-01 |
| 3.0090E-01 | -8.5950E-05 | 3.0082E-01 |
| 4.2521E-01 | 0.0000E+00 | 4.2521E-01 |
| 5.5116E-01 | 0.0000E+00 | 5.5116E-01 |

Tabelul 6.8

| Y_0 | ΔY_{5MPa} | Y_{5MPa} |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| 8.3036E+00 | 0.0000E+00 | 8.3036E+00 |
| 7.3037E+00 | 0.0000E+00 | 7.3037E+00 |
| 6.1510E+00 | 1.8597E-05 | 6.1510E+00 |
| 4.9042E+00 | 9.0599E-06 | 4.9042E+00 |
| 3.6658E+00 | 1.6689E-06 | 3.6658E+00 |
| 2.4409E+00 | -1.0254E-05 | 2.4409E+00 |
| 1.2247E+00 | -2.3842E-06 | 1.2247E+00 |
| 1.3166E+00 | -2.0284E-06 | 1.3166E+00 |
| -1.1984E+00 | -1.7881E-06 | -1.1984E+00 |
| -2.4127E+00 | -2.3842E-06 | -2.4127E+00 |
| -3.6357E+00 | -5.7221E-06 | -3.6357E+00 |
| -4.8675E+00 | -1.1921E-05 | -4.8675E+00 |
| -6.1009E+00 | -1.8597E-05 | -6.1010E+00 |
| -7.2488E+00 | 0.0000E+00 | -7.2488E+00 |
| -8.2486E+00 | 0.0000E+00 | -8.2486E+00 |

Suprafața deformată a dioptrului și o curbă de aproximare parabolică sunt reprezentate în figura 6.20.

Se observă doar o mică diferență între coeficientul termenului de gradul I și termenul liber al polinomului de interpolare pentru cele două cazuri de încărcare analizate.

Ecuția canonică a parabolei de aproximare este aceeași, constanta conice este $k = -1$ și, așa cum rezultă din tabelul 6.9, abaterile relative procentuale față de abscisele prelevate direct nu depășesc 1%.

Tabelul 6.9

| X_{2MPa} | $x = \frac{y^2}{124}$ | $x = 0.0081y^2 + 0.000002y - 0.0003$ | $\Delta = x_{2MPa} - \frac{y^2}{124}$ | $\frac{\Delta}{X_{2MPa}} \cdot 100$ |
|------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 3.0578E-01 | 3.0512E-01 | 3.0618E-01 | -6.6532E-04 | -0.22 |
| 1.9415E-01 | 1.9396E-01 | 1.9453E-01 | -1.9043E-04 | -0.10 |
| 1.0834E-01 | 1.0837E-01 | 1.0856E-01 | 2.9316E-05 | 0.03 |
| 4.7940E-02 | 4.8049E-02 | 4.7965E-02 | 1.0887E-04 | 0.23 |
| 1.1968E-02 | 1.2096E-02 | 1.1851E-02 | 1.2753E-04 | 1.07 |
| 1.4110E-02 | 1.3980E-02 | 1.3744E-02 | -1.3048E-04 | -0.92 |
| 1.1453E-02 | 1.1581E-02 | 1.1330E-02 | 1.2803E-04 | 1.12 |
| 4.6833E-02 | 4.6944E-02 | 4.6846E-02 | 1.1033E-04 | 0.24 |
| 1.0656E-01 | 1.0660E-01 | 1.0676E-01 | 3.2620E-05 | 0.03 |
| 1.9125E-01 | 1.9107E-01 | 1.9160E-01 | -1.8138E-04 | -0.09 |
| 3.0082E-01 | 3.0017E-01 | 3.0118E-01 | -6.4300E-04 | -0.21 |

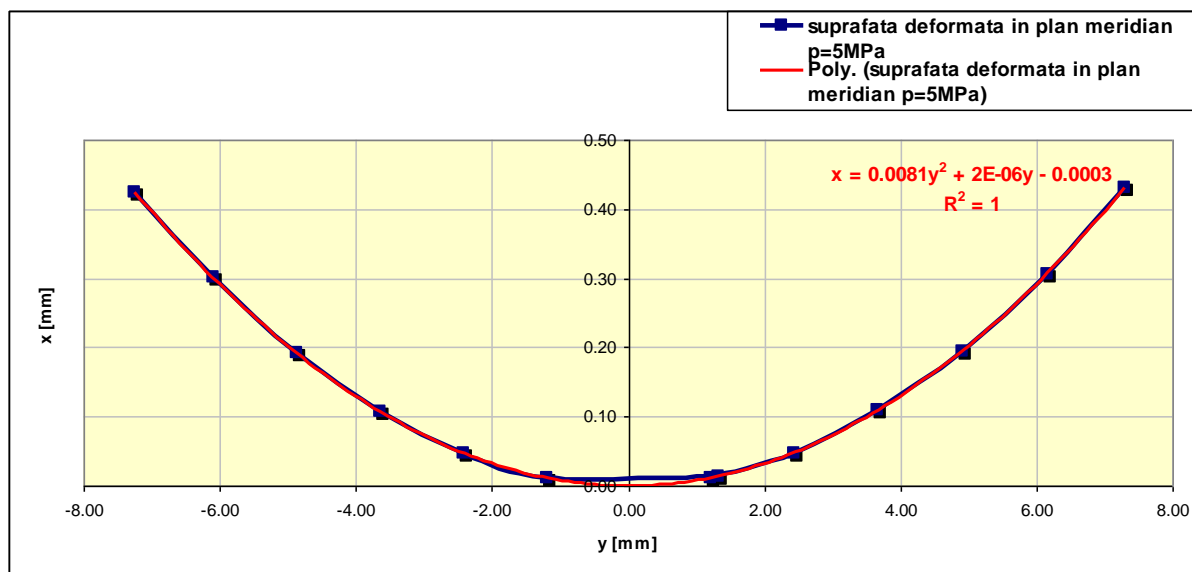


Fig. 6.20. Generatoarea inițială și aproximarea generatoarei deformate a dioptrelui liber al lentilei convergente

Tabelul 6.10

| X_0 | ΔX_{5MPa} | X_{5MPa} |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| 7.5187E+00 | -4.8637E-04 | 7.5192E+00 |
| 7.9265E+00 | -3.7003E-04 | 7.9269E+00 |
| 8.4040E+00 | -2.4509E-04 | 8.4042E+00 |
| 8.6536E+00 | -1.8787E-04 | 8.6537E+00 |
| 8.8179E+00 | -1.5545E-04 | 8.8181E+00 |
| 8.9470E+00 | -1.3351E-04 | 8.9471E+00 |
| 9.0242E+00 | -1.2016E-04 | 9.0243E+00 |
| 9.0803E+00 | -1.1444E-04 | 9.0804E+00 |
| 9.1194E+00 | -1.1444E-04 | 9.1195E+00 |
| 9.1060E+00 | -1.1921E-04 | 9.1061E+00 |
| 9.0696E+00 | -1.3161E-04 | 9.0697E+00 |
| 8.9765E+00 | -1.5259E-04 | 8.9766E+00 |
| 8.8459E+00 | -1.8501E-04 | 8.8461E+00 |
| 8.6424E+00 | -2.3937E-04 | 8.6426E+00 |
| 8.2081E+00 | -3.6240E-04 | 8.2085E+00 |
| 7.8373E+00 | -4.7684E-04 | 7.8378E+00 |

Tabelul 6.11

| Y_0 | ΔY_{5MPa} | Y_{5MPa} |
|------------|-------------------|------------|
| 9.0354E+00 | 1.7166E-04 | 9.0353E+00 |
| 7.9872E+00 | 1.5688E-04 | 7.9871E+00 |
| 6.9401E+00 | 1.3733E-04 | 6.9400E+00 |
| 5.8542E+00 | 1.0634E-04 | 5.8541E+00 |
| 4.7764E+00 | 7.7725E-05 | 4.7763E+00 |
| 3.7262E+00 | 5.7459E-05 | 3.7261E+00 |
| 2.5319E+00 | 3.4094E-05 | 2.5318E+00 |
| 1.3542E+00 | 1.5736E-05 | 1.3542E+00 |

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| -9.9643E-01 | -1.9670E-05 | -9.9641E-01 |
| -2.1749E+00 | -3.8147E-05 | -2.1749E+00 |
| -3.3710E+00 | -6.1989E-05 | -3.3709E+00 |
| -4.4271E+00 | -8.3447E-05 | -4.4271E+00 |
| -5.4994E+00 | -1.1015E-04 | -5.4993E+00 |
| -6.5935E+00 | -1.4305E-04 | -6.5933E+00 |
| -7.6453E+00 | -1.6356E-04 | -7.6451E+00 |
| -8.7288E+00 | -1.8883E-04 | -8.7286E+00 |

Pentru lentila divergentă, curba de aproximare este tot o parabolă ($k = -1$). Ecuația acesteia diferă foarte puțin de cea determinată în cazul de încărcare precedent. Reprezentarea grafică a profilului deformat și a parabolei de interpolare sunt prezentate în figura 6.21.

Tabelul 6.12 pune în evidență precizia ridicată a aproximării, abaterile relative procentuale fiind mai mici decât 0.2%.

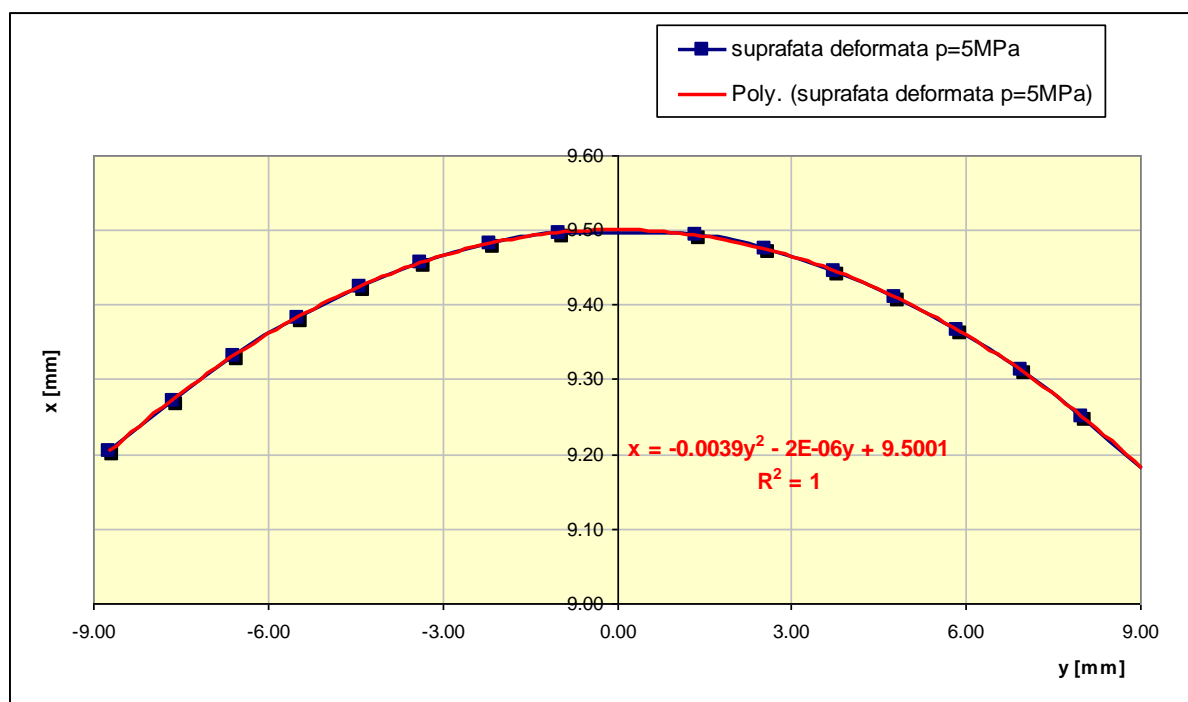


Fig. 6.21. Generatoarea inițială și aproximarea generatoarei deformate a dioptrului liber al lentilei divergente

Tabelul 6.12

| X_{2MPa} | $x = \frac{y^2}{124}$ | $x = 0.0081y^2 + 0.000002y - 0.0003$ | $\Delta = x_{2MPa} + \frac{y^2}{256.2}$ | $\frac{\Delta}{X_{2MPa}} \cdot 100$ |
|-------------|-----------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|
| -3.1905E-01 | 9.1809E+00 | -3.1864E-01 | -0.0004 | 0.13 |
| -2.4925E-01 | 9.2508E+00 | -2.4900E-01 | -0.0003 | 0.10 |
| -1.8814E-01 | 9.3119E+00 | -1.8799E-01 | -0.0001 | 0.08 |
| -1.3384E-01 | 9.3662E+00 | -1.3376E-01 | -0.0001 | 0.06 |
| -8.9079E-02 | 9.4109E+00 | -8.9045E-02 | 0.0000 | 0.04 |
| -5.4205E-02 | 9.4458E+00 | -5.4191E-02 | 0.0000 | 0.02 |
| -2.5023E-02 | 9.4750E+00 | -2.5020E-02 | 0.0000 | 0.01 |
| -7.1580E-03 | 9.4928E+00 | -7.1576E-03 | 0.0000 | 0.01 |
| -3.8754E-03 | 9.4961E+00 | -3.8752E-03 | 0.0000 | 0.01 |
| -1.8464E-02 | 9.4815E+00 | -1.8462E-02 | 0.0000 | 0.01 |
| -4.4361E-02 | 9.4556E+00 | -4.4352E-02 | 0.0000 | 0.02 |

6.2. ANALIZA VARIAȚIEI PARAMETRILOR DE CALITATE A IMAGINII FUNCȚIE DE STAREA DE TENSIUNE ȘI DEFORMAȚIE

În ceea ce privește efectul de birefringență introdus de tensionarea în masă se consideră justificată menținerea observațiilor și recomandărilor din capitolul anterior. Starea de tensiune este ceva mai accentuată, dar nu atât de diferită încât să influențeze semnificativ OPD.

Pentru verificarea nivelului parametrilor de calitate ai sistemului cu erori de montaj s-a apelat la programul OSLO, în care au fost introduse modificările de geometrie determinate prin analiză cu element finit.

În figura 6.22 este un tablou cu datele complete ale sistemului optic real. Pentru suprafețele 1 și 3 s-au indicat constante conice $k = -1$ (simbolul "A" pe coloana "SPECIAL") și s-au introdus erorile vizibile în fereastra "Slider Wheel" (a căror prezență este marcată cu "C" în coloana "SPECIAL").

Fereastra TW1* indică, la apertura maximă a sistemului optic, o înrăutățire accentuată a calității imaginii. RMS OPD a crescut la 0.16λ , iar Raportul Strehl a scăzut la 0.33.

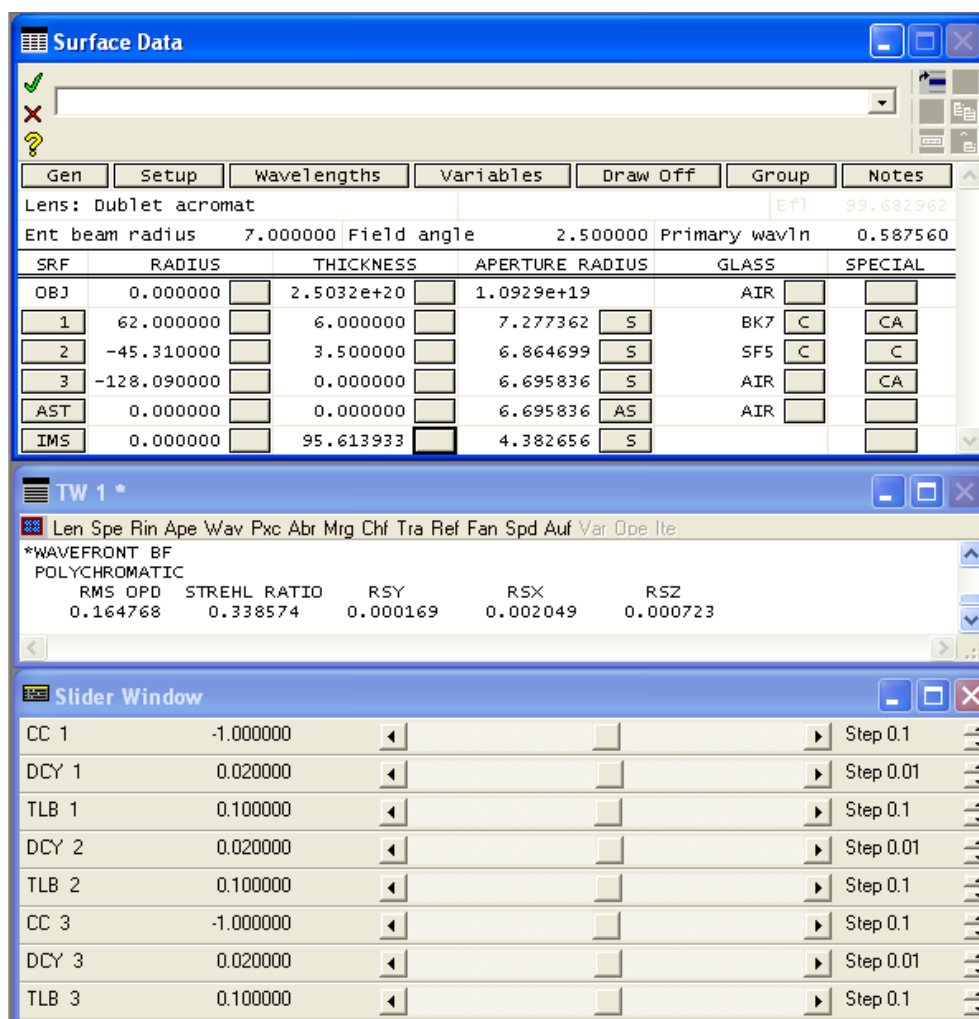


Fig. 6.22. Surface Data pentru sistemul descentrat și înclinat, cu dioptri asferici

Analiza frontului de undă (fig. 6.23) și diagrama spot (fig. 6.24) pun în evidență o puternică deformare a frontului de undă, respectiv o distribuție asimetrică și rarefiată a punctelor imagine în treimea superioară a câmpului obiect.

Așa cum sugerează diagrama spot, prin mărimea și forma petelor de difuzie, sistemul oferă o calitate a imaginii corespunzătoare pe o apertură mai redusă, cuprinzând aproximativ 70% din câmpul obiect.

Între-adevăr, dacă se impune o reducere a aperturii de la 14 mm la 9 mm, cu aceleași condiții de asferizare și tensionare (fig. 6.25), se regăsesc parametrii superiori de calitate a imaginii. Valorile RMS OPD = 0.08λ și Raportul Strehl = 0.73 încadrează sistemul în categoria precis, la frontiera categoriei limitat la difracție.

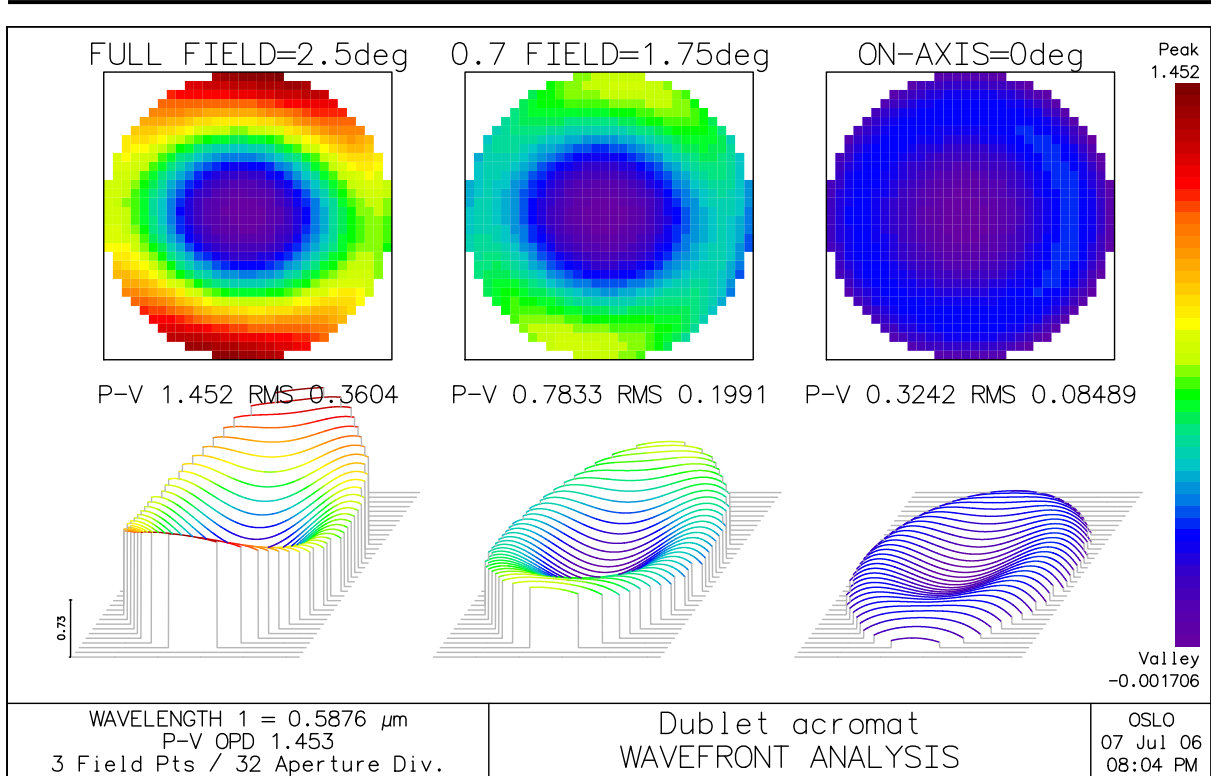


Fig. 6.23. Analiza frontului de undă a sistemului cu erori de așazare și supus la presiune de contact

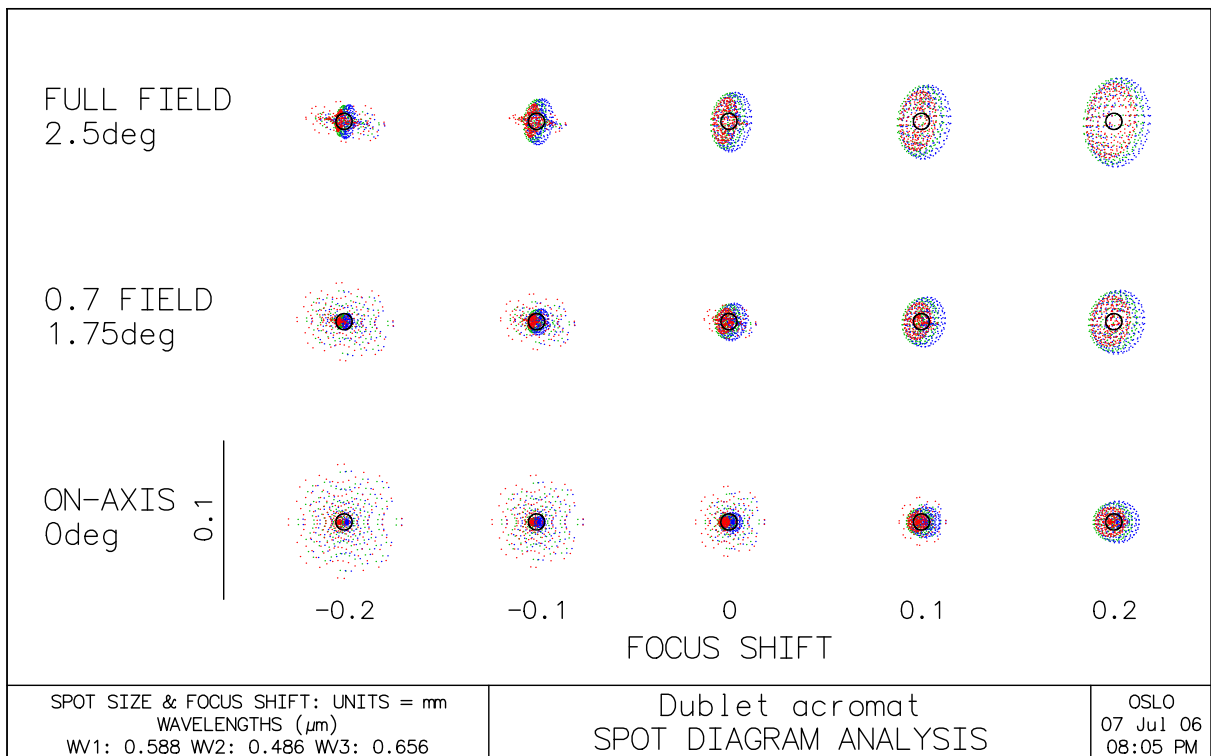


Fig. 6.24. Diagrama spot a sistemului cu erori de așazare și supus la presiune de contact

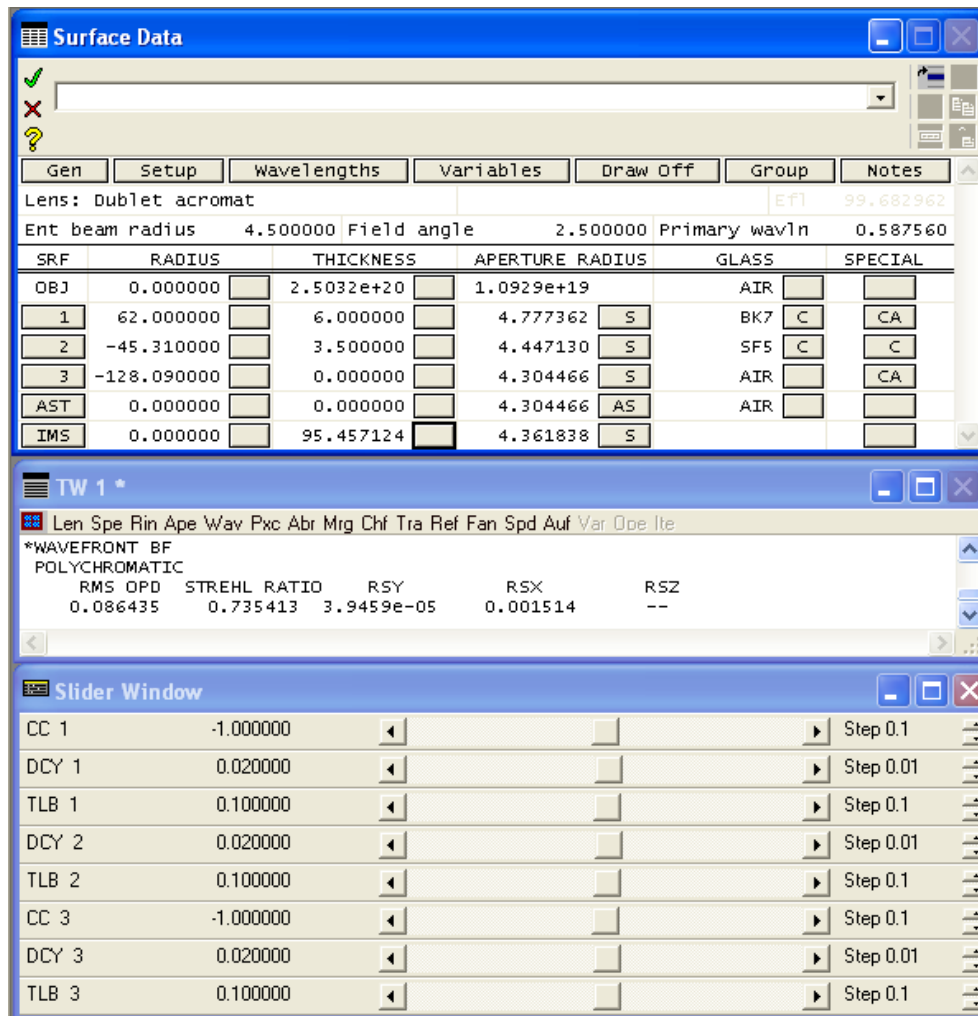


Fig. 6.25. Surface Data pentru sistemul descentrat și înclinat, cu dioptri asferici, la o apertură maximă egală cu 65% din cea inițială

Asferizarea și erorile de așezare, cu precădere înclinarea, introduc un vârf de distorsiune (fig. 6.26) în apropierea axei optice (unde se află vârful dioptrilor în mod efectiv) și slăbesc caracterul acromat al componentei. Parabola înclinată determină deplasarea punctului de acromazie în plan sagital (fig. 6.26 – curbele de interceptare a razelor).

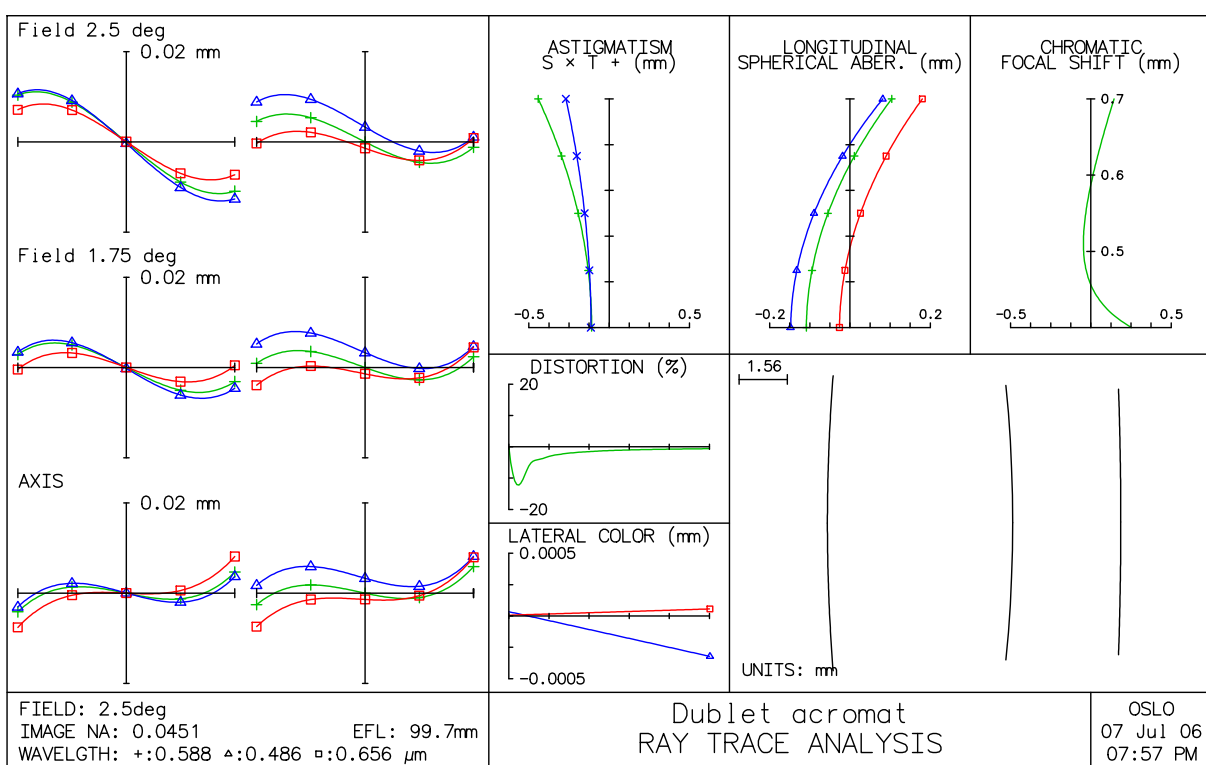


Fig. 6.26. Aberrațiile geometrice și cromatice ale sistemului cu erori de așezare și dioptri asferici la apertură D= 9 mm

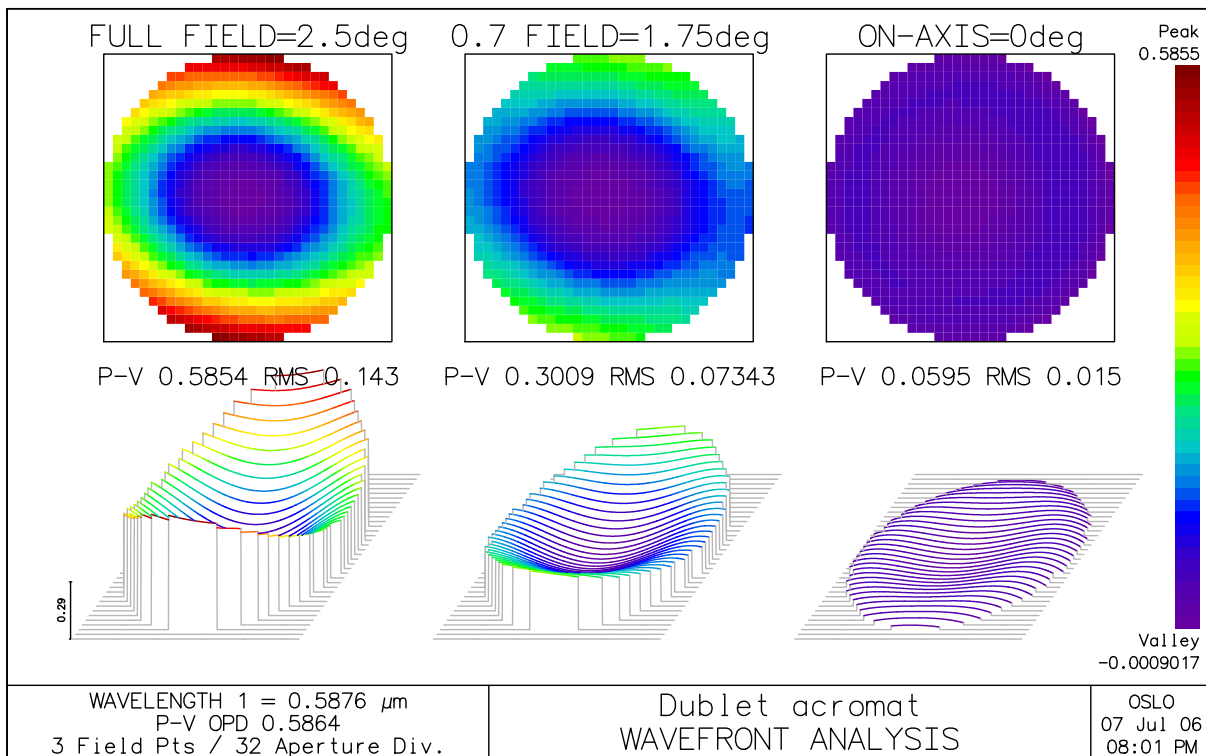


Fig. 6.27. Analiza frontului de undă pentru sistemul cu erori de așezare și dioptri asferici la apertură D= 9 mm

Frontul de undă este deformat, necircular, dar nu este asimetric, așa cum rezultă din figura 6.27. Încadrarea punctelor imagine în cercul Airy poate fi mai sugestiv urmărită pe diagrama spot din figura 6.28.

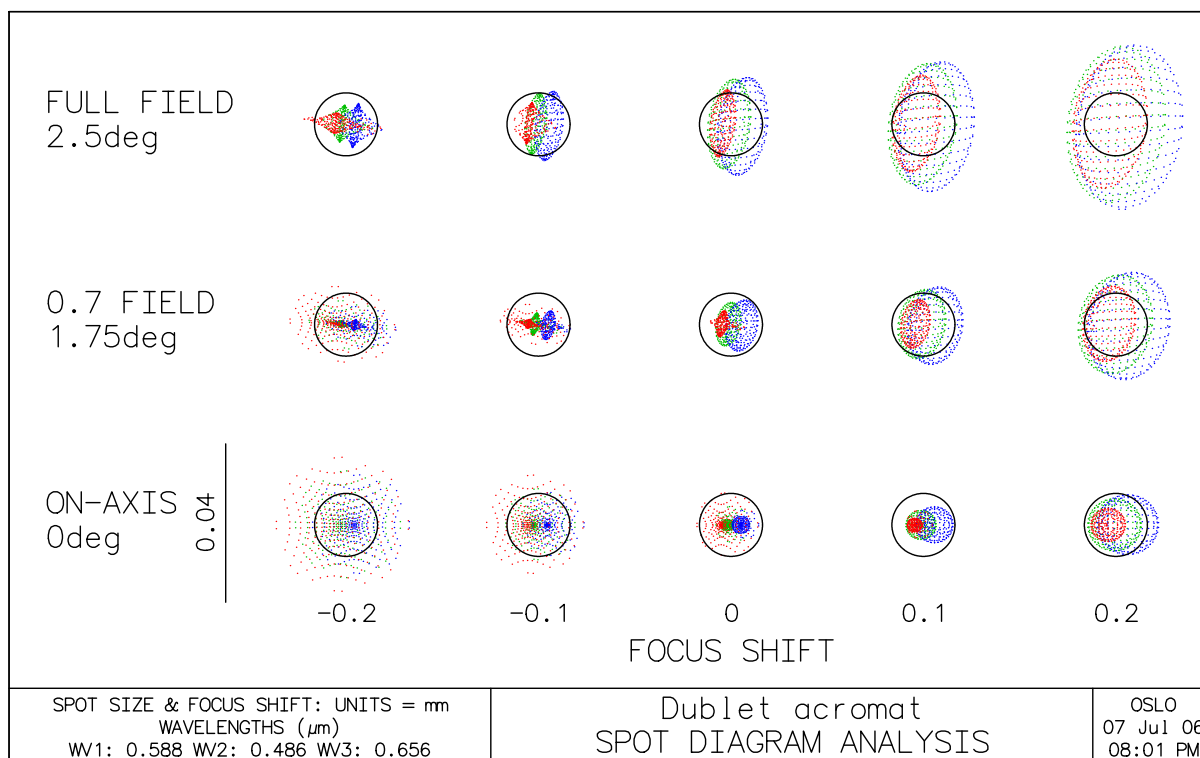


Fig. 6.28. Diagrama spot a sistemului cu erori de așezare și dioptri asferice la apertura $D=9$ mm

Deși punctele imagine se înscriu în cercul Airy, distribuția cromatică indică o diminuare a acromaziei. În figura 6.29 este detaliată o diagramă spot singulară cu caracter polar, obținută prin discretizarea pupilei de intrare în 30 de cercuri concentrice. Se observă o separare a centrelor de culoare și o pată de difuzie diferită spectral. Totuși, păstrarea proiectării punctelor imagine în interiorul cercului Airy asigură a calitate foarte bună a imaginii.

Asferizarea asociată cu înclinare determină curbe MTF și PTF (fig. 6.30) puțin diferite în plan tangențial și sagital, dar cu valori suficient de apropiate încât sistemul să poată fi considerat limitat la difracție.

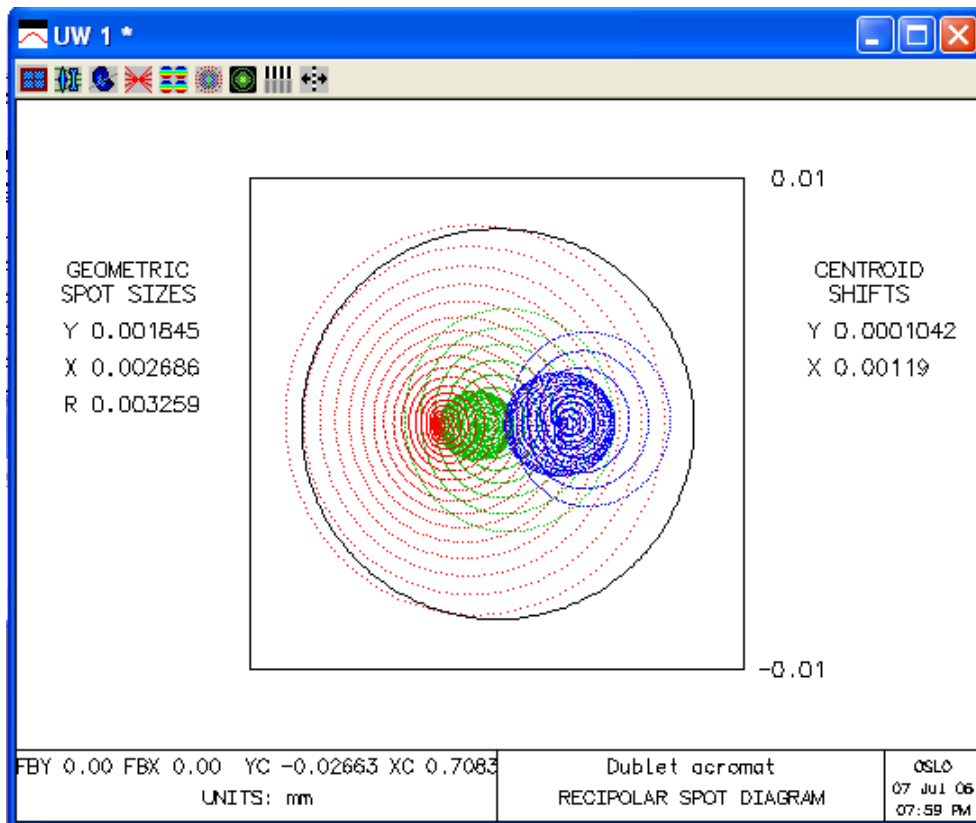


Fig. 6.29. Diagrama spot polară a sistemului cu erori de așezare și dioptri asferici la apertura $D=9\text{ mm}$

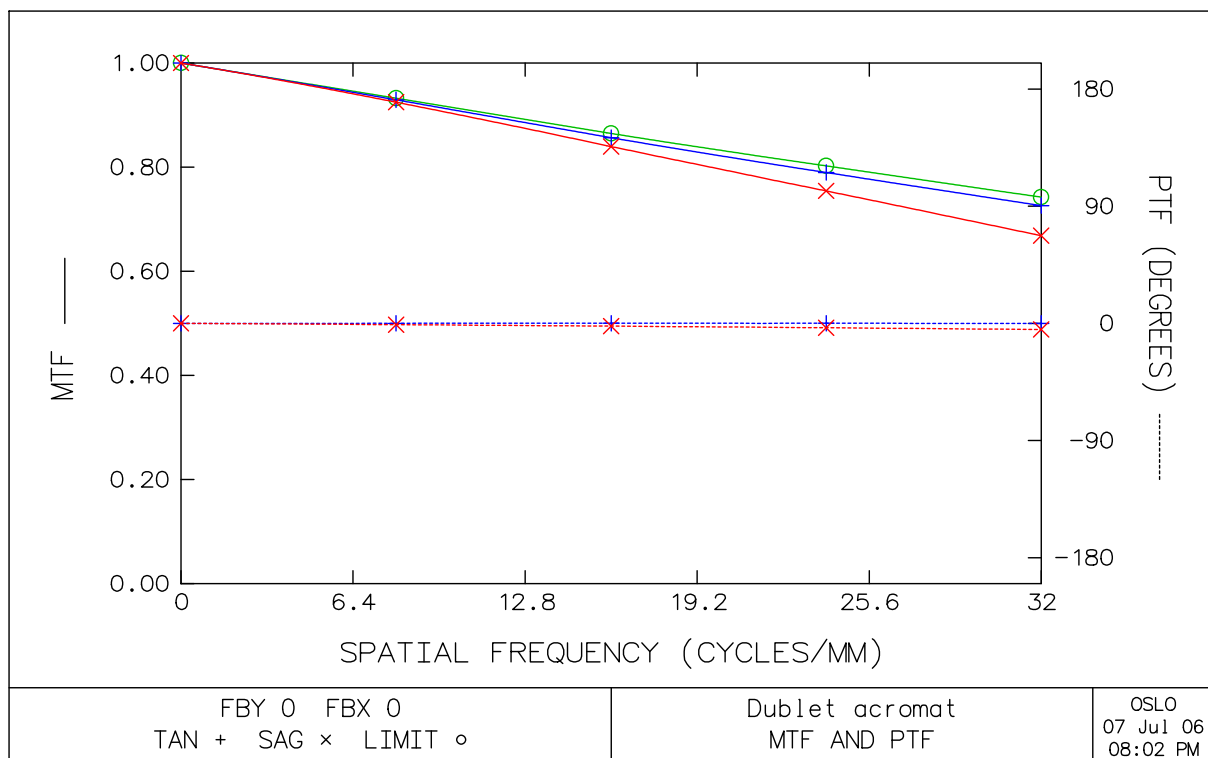


Fig. 3.60. MTF și PTF pentru sistemul cu erori de așezare și dioptri asferici la apertura $D=9\text{ mm}$

6.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Capitolul 6 al tezei a urmărit desfășurarea unui studiu al stării de tensiune și deformație a componentelor unui sistem optic afectat de descentrare și înclinare și presat în montură prin operația de montaj.

Modelarea și simularea structurii s-a realizat în programul de element finit Abaqus, iar analiza calității imaginii a necesitat utilizarea programului OSLO LT.

Având în vedere rezultatele demersului similar aplicat unui sistem optic aflat în poziția nominală, s-a stabilit oportunitatea reducerii numărului de cazuri de încărcare la numai două: $p=2\text{MPa}$ și $p=5\text{MPa}$.

Pentru relevanța studiului, respectiv posibilitatea comparării și interpretării critice a rezultatelor, modelarea și simularea au avut ca obiect aceeași structură analizată în poziția nominală în capitolul anterior.

Erorile de montaj au fost simulate prin impunerea unei descentrări de 0.02mm față de axa optică, respectiv axa geometrică a monturii și o înclinare de 0.1° în plan meridian. Aceste valori numerice au fost preluate din cercetări anterioare la Universitatea Politehnica din Timișoara [S16] și reprezintă abateri determinate ca admisibile pentru prezervarea caracterului limitat la difracție al unui sistem optic de tip dublet. Ca urmare pierderile de calitate a imaginii care pot fi sesizate se datorează exclusiv stării de tensionare a subansamblului optic în montură.

Rularea programului Abaqus a permis prelevarea datelor numerice privind deplasările nodale, urmărite pe un set special de noduri, aparținând generatoarei dioptrilor, precum și mărimea și distribuția componentelor de tensiune pe lentile.

Concluziile studiului pot fi rezumate astfel:

- starea triaxială de tensiune și deformație este bine pusă în evidență la un studiu al tensiunilor principale. Toate trei au valori finite și comparabile
- în valoare absolută, cele mai mari sunt tensiunile σ_3 , cu efect de compresiune pe jumătatea marginală a aperturii și de întindere pe centrul structurii. Numeric, tensiunile σ_3 sunt cu aproximativ 40% mai mari decât

valoarea solicitării, spre deosebire de cazul simetriei perfecte, caracteristic poziției nominale, când cele două valori erau comparabile

□ tensiunile echivalente von Mises maxime au valori puțin superioare solicitării pentru lentila divergentă și se situează cam la jumătate pentru lentila convergentă. Rezultă că, pentru un șir mai lung de lentile tensiunile nu sunt repartizate uniform. Solicitățile sunt preluate, preponderent de primele componente pe care se exercită apăsarea. Tensiunile se diminuează rapid și devin tot mai reduse, pe măsură ce poziția lor este mai îndepărtată de inelul filetat. Ca urmare, o atenție deosebită trebuie acordată primei lentile sau primelor două dintr-un sistem complex, atenție care vizează atât birefringența, cât și deformarea dioptrilor

□ simetria de rotație a structurii, chiar în urma impunerii descentrării și înclinării și simetria încărcării conduc la păstrarea simetriei geometrice a ansamblului după deformare. Numeric, în plan sagital, deplasările pe axa z au valori suficient de mici pentru a putea fi neglijate. Efectele erorilor de poziție și a solicitării exterioare sunt bine puse în evidență în plan meridian, pentru care s-a inițiat un studiu amănunțit

□ prelevarea numerică a coordonatelor în plan meridian pentru punctele aparținând generatoarei dioptrilor a permis trasarea grafică a suprafețelor deformate și a curbelor generatoare de aproximare a profilului real. Prin utilizarea facilităților programului Microsoft Excel s-au determinat grafic și analitic curbele asferice de interpolare. S-au găsit, cu o precizie foarte ridicată, respectiv cu erori procentuale situate sub valoarea de 2%, polinoame de interpolare de gradul II, care definesc, de fapt, parabole. Atât pentru lentila convergentă, cât și pentru cea divergentă, în ambele cazuri de încărcare simulate, parabola s-a dovedit curba asferică adecvată aproximării profilului real deformat. Constanta conicei pentru parabolă fiind $k = -1$, au putut fi deduse formele canonice ale curbelor asferice, necesare compatibilizării cu cerințele programului OSLO LT de analiză a sistemelor optice

□ din punct de vedere al efectului de birefringență se mențin

recomandările din capitolul anterior: 2MPa pentru lentila divergentă și 5MPa pentru lentila convergentă. Se menționează faptul că majorarea tensiunilor nu afectează semnificativ OPD. Trebuie, de asemenea, avut în vedere caracterul strict individual al fiecărei componente pentru că birefringența depinde de material, geometrie și poziție în sistemul optic. Ca urmare, nu se poate face o recomandare general valabilă, ci se indică o analiză completă pentru fiecare caz concret, astfel încât să se stabilească exact valoarea la care trebuie limitată presiunea de contact la fixarea subansamblurilor optice

□ analiza sistemului optic cu programul OSLO LT, având introduse datele care caracterizează asferizarea dioptrilor 1 și 3, descentrarea și înclinarea, a pus în evidență deprecirea calității imaginii, cel puțin pentru studiul efectuat la apertura maximă

□ evaluarea atentă a efectelor asferizării și erorilor de poziție scoate în evidență atât aspecte geometrice cât și cromatice. Calotele de paraboloid înclinate deformează puternic frontul de undă, cu precădere, în zona marginală. Aspectul necircular, alungit și rotit în raport cu axa y este bine pus în evidență pe diagrama spot și reprezentarea 3D a frontului de undă. Înclinarea și descentrarea, respectiv deplasarea vârfului dioptrilor în afara axei optice introduc un vârf de distorsiune în vecinătatea acesteia, cu efecte semnificative în diminuarea parametrilor globali de calitate. Sistemul optic este afectat și din punct de vedere cromatic, în sensul că se pierde parțial caracterul acromatic al dubletului. Toate aceste efecte se reflectă asupra MTF și PTF, la care curbele tangențială și sagitală nu se mai suprapun, așa cum se întâmplă în cazul sistemului ideal, fără erori

□ diminuarea parametrilor de calitate a imaginii nu are însă un caracter catastrofal pentru sistem. Efectele negative descrise mai sus se manifestă în zona marginală a subansamblului. Simularea unei aperturi mai mici demonstrează că sistemul își păstrează liniaritatea și, ca urmare caracterul limitat la difracție, pe 65%-70% din deschiderea maximă inițială

□ ca o concluzie generală se poate aprecia că montajul părții optice în

tubul mecanic diminuează calitatea imaginii. Efectele tensionării lentilelor constau în birefringența materialului și asferizarea dioptrilor. Valorile admise pentru presiunea exercitată de inelul filetat asupra componentelor optice depinde, în ultimă instanță, de exigența privind extinderea câmpului caracterizat de liniaritate. În funcție de cerințele de calitate ale fiecărei aplicații, este la latitudinea proiectantului să prescrie valoarea admisă a presiunii de contact și, funcție de geometria lentilei direct presate și de dimensiunea radială a ansamblului, să determine forța normală, respectiv momentul de strângere a inelului filetat.

Printre elementele originale prezente în capitolul 6 al tezei se pot enumera:

- modelarea unui sistem optomecanic real, afectat de erori de montaj, prin generarea fișierelor grafice în AUTOCAD și importarea în Abaqus. Modelarea numerică necesită o precizie foarte ridicată, având în vedere că descentrarea și înclinarea au fost impuse la valori de 0.02mm, respectiv 0.1°, conform abaterilor maxime determinate pe criterii optice
- simularea comportării structurii pentru două cazuri de încărcare, corespunzătoare presiunilor de contact $p=2\text{MPa}$ și $p=5\text{MPa}$
- determinarea numerică a curbelor generatoare ale suprafețelor deformate datorită solicitării mecanice
- modelarea matematică a generatoarelor deformate prin curbe conice, de tipul parabolei, pentru care s-au determinat expresiile analitice în forma canonică și constanta conice pentru compatibilizarea analizei calității imaginii cu programul OSLO
- evaluarea influenței asferizării, descentrării și înclinării asupra parametrilor de calitate a imaginii, cu ajutorul programului OSLO
- interpretarea rezultatelor analizei OSLO privind evoluția negativă a distorsiunii, aberațiilor cromatice și funcției optice de transfer
- evaluarea reducerii zonei de liniaritate a sistemului optic
- elaborarea recomandării generale privind prescrierea momentului de strângere a inelului filetat având în vedere factorii sensibili ai sistemului:

sortul de sticlă (prin coeficientul tensiunii optice), geometria lentilelor (prin curburile efective care influențează aria nominală de contact lentilă-inel), poziția lentilei în șirul de componente care formează sistemul (având în vedere distribuția neuniformă a tensiunilor pe componente) și gabaritul radial al subansamblului optic.

BIBLIOGRAFIE

[C1], [D2], [D4], [D5], [G4], [G7], [G17], [G18], [G19], [H3], [J2], [L2], [L1], [L2], [M1], [N1], [N5], [O3], [O4], [P6], [P10], [S1], [S2], [S3], [S6], [S16], [S8], [T2], [T5], [Z2], [W14], [W22]

7. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

7.1. PROIECTAREA EXPERIMENTULUI

Analiza sistemelor optice a atins un nivel de rafinament și profunzime care îi asigură statutul de instrument puternic, precis și sigur de apreciere a calității imaginii. Modelarea și simularea matematică permit evaluarea rapidă a unei game foarte largi și diverse de parametri de calitate, cu posibilitatea decelării unor influențe, care, practic, nu pot fi separate. Determinările experimentale, la nivelul de precizie al rezultatelor simulării, sunt dificil, dacă nu chiar imposibil de realizat practic. Măsurarea cantitativă a unor parametri de calitate a sistemelor optice, cum ar fi aberațiile, rezoluția, contrastul sau funcția optică de transfer necesită instalații sofisticate, scumpe și specializate. În principiu, punerea în evidență a fiecărui indicator de calitate, eventual a unui set restrâns de parametri presupune un echipament cu o schemă special dedicată. Chiar dacă această condiție este îndeplinită, din punct de vedere practic este greu de realizat un montaj care să materializeze exclusiv condițiile de punere în evidență a unui singur indicator de calitate (de exemplu numai aberația sferică longitudinală, coma tangențială, distorsiunea, rezoluția etc.). În condiții experimentale, se manifestă toate erorile de formare a imaginii, ca efect cumulat al concepției sistemului optic, al erorilor de execuție și montaj, al tensionării mecanice prin asamblare a părților optice și mecanice, iar efectul particular al fiecărui parametru de influență nu

poate fi evidențiat cu acuratețe. Calitatea imaginii rămâne, prin excelență, o caracteristică globală determinată ca o sumă algebrică și ponderată a unui număr mare de termeni.

Având în vedere cele de mai sus, se propune un studiu experimental care să ilustreze, cel puțin principial și calitativ rezultatele simulărilor din capitolele anterioare.

Se propune realizarea unui experiment cu caracter preponderent calitativ, care să pună în evidență modificările din planul imagine în condițiile tensionării mecanice într-o gamă de valori, mărginită de zero și valoarea la care pierderile de calitate a imaginii devin perceptibile de către receptorul natural.

Se urmărește calitatea imaginii unui obiect oarecare, imagine formată de o lentilă simplă, având în vedere faptul că pentru studiul propus, complexitatea sistemului nu este relevantă.

Ca principiu, se compară imaginile obținute la diverse încărcări mecanice, vizualizate printr-un microscop și preluate digital cu o cameră foto de rezoluție ridicată. Utilizarea microscopului se consideră necesară pentru a prelua două imagini de referință: imaginea obiectului formată de microscop și imaginea formată de sistemul analizat, vizualizată prin microscop.

Odată pusă la punct imaginea formată de microscop și lentila analizată, poziția tubului microscopului rămâne fixată (abscisa planului imagine nu se modifică în timpul măsurărilor).

Se încarcă mecanic lentila pe contur și se urmărește evoluția calității imaginii. La încărcarea la care apar neclarități sau distorsiuni evidente rezultă că abscisa reală a planului imagine s-a deplasat în urma deformațiilor geometrice a componentei și a birefringenței.

Utilizarea microscopului s-a considerat necesară, datorită faptului că valoarea scăzută, de câțiva milimetri a câmpului obiect limitează studiul lentilei la o zonă restrânsă, care se încadrează cu bună aproximație în domeniul paraxial. În acest mod, se elimină principial, toate aberațiile

geometrice și pot fi puse în evidență cu mai multă acuratețe efectele tensionării asupra geometriei și refringenței. Ca urmare, s-a considerat că deplasarea abscisei planului imagine, manifestată prin pierderea calității imaginii, se datorează exclusiv cauzelor mecanice.

7.2. DESCRIEREA STANDULUI

Pentru efectuarea determinărilor experimentale s-au utilizat următoarele aparate și componente:

- ❑ o lamelă subțire de sticlă pe care s-a trasat un obiect liniar (fig. 7.1)



Fig. 7.1. Lamela de sticlă subțire având trasat un obiect liniar

- ❑ un filtru galben pentru creșterea contrastului obiect – fond (fig. 7.2)



Fig. 7.2. Filtru galben

- ❑ o lentilă de testat (prezentată în figura 7.3 împreună cu filtrul și lamela suport)

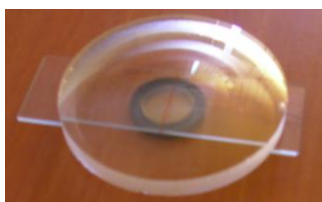


Fig. 7.3. Ansamblul lentila de testat – lamela suport obiect – filtru

- ❑ microscop de observare și preluare a imaginii cu camera foto (fig. 7.4)



Fig. 7.4. Microscop de observare și preluare a imaginii cu camera foto

- sistem de încărcare gravimetric
- camera foto digitală.

7.3. REZULTATE EXPERIMENTALE

Pe lamela suport s-a trasat un obiect liniar, care a fost plasat pe măsura microscopului. S-a procedat la punerea la punct a imaginii. În figura 7.5 este prezentată imaginea obiectului vizualizată direct prin microscop.

Pentru studiu s-a utilizat o lentilă divergentă de ochelari, cu puterea de -4 dpt., executată din sticla oftalmică având $n = 1.523$. Lentila a fost plasată deasupra obiectului și fixată în poziție centrată. Prin focusarea corectă a rezultat imaginea din figura 7.6.

Nu se observă diferențe de calitate a imaginii, ceea ce confirmă caracterul paraxial de formare a acesteia. Lentila a fost plasată direct pe lamela suport, astfel încât abscisa obiect să fie cât mai mică. De altfel, se remarcă mărimile apropiate ale celor două imagini din figurile 7.5 și 7.6, ceea ce indică o mărire liniară apropiată de valoarea unitară.

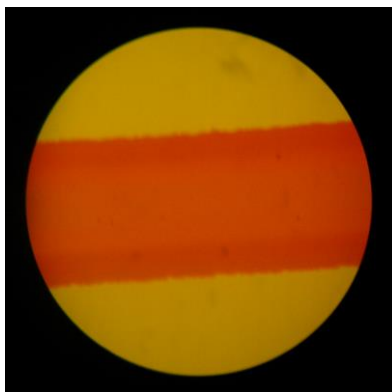


Fig. 7.5. Imagine a obiectului vizualizată direct prin microscop

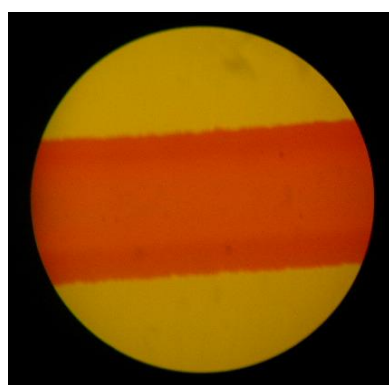


Fig. 7.6. Imagine a obiectului vizualizată prin lentila de probă și microscop

Pe dispozitivul de încărcare s-au introdus greutateți de 300g, 600g, 900g și 1200g, repartizate simetric pentru a asigura uniformitatea presiunii de contact. Alezajul dispozitivului de încărcare are dimensiunea de Φ 15 mm și o suprafață de așezare cu generatoarea de aproximativ 0.1 mm. În aceste condiții, presiunile de contact la suprafața lentilei sunt: 0.64 MPa, 1.27 MPa, 1.90 MPa și, respectiv 2.54 MPa.

În figurile 7.7...7.10 sunt prezentate imaginile preluate la presiunile indicate mai sus.

La ultima imagine se observă evident o neclaritate a imaginii, ceea ce corespunde schimbării planului de focusare.

Valoarea presiunii de contact la care se manifestă pierderea de calitate a imaginii este în perfectă concordanță cu rezultatele simulărilor din capitolele precedente.

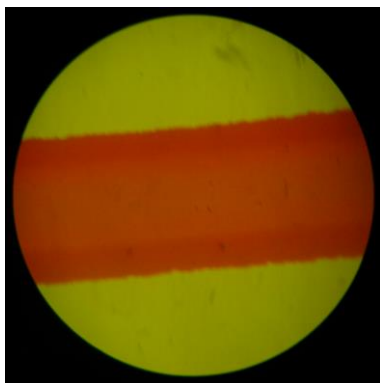


Fig. 7.7. Imaginea test la $p = 0.64$ MPa

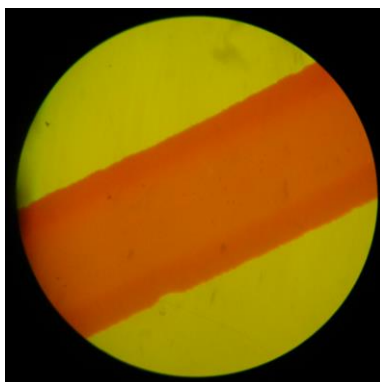


Fig. 7.8. Imaginea test la $p = 1.27$ MPa

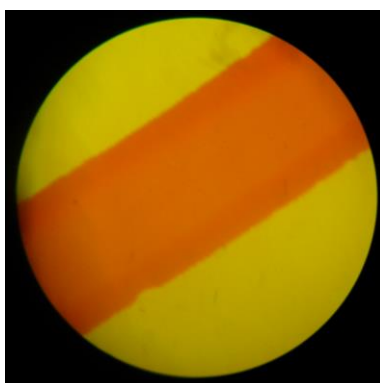


Fig. 7.9. Imaginea test la $p = 1.90$ MPa

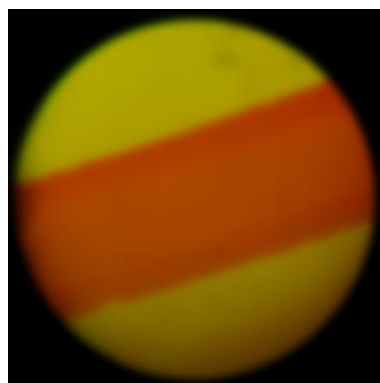


Fig. 7.10. Imaginea test la $p = 2.54$ MPa

7.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

În prezentul capitol este prezent un experiment care pune în evidență influența încărcării mecanice a componentelor optice. Testarea s-a realizat prin aspectarea imaginilor formate de o componentă divergentă, pentru diverse încărcări până la nivelul la care abscisa planului imagine paraxial s-a modificat. Rezultatele numerice sunt în concordanță cu simulările efectuate prin metoda elementului finit și echivalarea modificărilor geometrice și de refringență cu aberația de undă.

Printre contribuțiile originale din capitolul 7 se pot aminti:

- proiectarea experimentului de punere în evidență a influenței încărcării mecanice asupra calității imaginii componentelor optice
- realizarea unui stand experimental și preluarea imaginilor test
- interpretarea rezultatelor și validarea simulărilor numerice anterioare.

BIBLIOGRAFIE

[D12], [G16], [N2], [N4], [P2], [S6]

8. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Prezenta teză are la bază premiza că un sistem optic de cea mai bună calitate – limitat la difracție – conform proiectului, poate fi afectat de erori de execuție a pieselor optice sau mecanice și de erori de montaj, care să descalifice total subansamblul materializat practic. Sensibilitatea problemei rezidă în faptul că forma pieselor optice este mult mai importantă decât în cazul organelor de mașini în general, având în vedere faptul că funcționalitatea piesei optice este legată direct de forma dioptrilor. Abaterile globale și locale de la formele sferice, plane sau asferice prescrise de proiectant trebuie să se încadreze în toleranțe mult mai restrânse decât în domeniul mecanic. De asemenea, centrarea sistemelor optice este o condiție esențială pentru calitatea imaginii și ca urmare, pozițiile relative ale pieselor optice și ale subansamblurilor optice în raport cu monturile mecanice dobândesc o importanță deosebită și necesită un control mult mai atent decât în celelalte aplicații tehnice.

Un aspect particular, cu influență majoră, în cazul subansamblurilor optice fixate în monturi de orice tip, este legat de deformațiile locale și globale ale dioptrilor ca urmare a presiunii de contact sticlă-metal și de tensiunile interne induse în volumul materialului optic de aceeași cauză.

Efectele fixării lentilelor în monturi prin apăsarea inelelor filetate pot fi încadrate în două categorii: modificarea formei nominale a dioptrilor prin

deformări locale în zona contactului și deformări globale pe suprafețe extinse în zona centrală a lentilei, precum și inducerea fenomenului de birefrință, ca urmare a tensionării sticlei în masă. Ambele efecte influențează calitatea imaginii. Nivelul influenței depinde de momentul de strângere a inelului filetat, coroborată cu erorile de formă și poziție ale componentelor și poate ajunge până la descalificarea subansamblului.

Prezenta teză și-a propus să dezvolte un studiu care să pună în evidență evoluția parametrilor de calitate a imaginii în condiții în care se au în vedere toate aspectele implicate în realizarea practică a unui sistem optic care, teoretic, prin aplicarea algoritmilor de proiectare, este limitat la difracție.

Scopurile declarate ale tezei au fost următoarele:

- *stabilirea toleranțelor de formă și poziție a componentelor optice pentru prezervarea caracterului limitat la difracție al sistemului optic*
- *identificarea tipului și mărimii erorilor de montaj, generate de prescrierea ajustajului cu joc dintre subansamblul optic și montura metalică*
- *modelarea numerică a ansamblului optomecanic lentile-montură și simularea comportamentului ansamblului la aplicarea unor forțe de apăsare de diferite valori, prin metoda elementului finit*
- *analiza evoluției parametrilor de calitate a imaginii sub acțiunea presiunii de contact care determină deformări locale în zona contactului și deformări de suprafață extinse ale dioptrilor în zonele centrală și mediană, ca urmare a stării de tensiune și deformație care afectează componentele optice*
- *studiul manifestării și evoluției fenomenului de birefrință generat de tensiunile din masa lentilelor*
- *elaborarea unor recomandări privind prescrierea momentelor de strângere admisibile pentru inelele de fixare a lentilelor, astfel încât caracterul limitat la difracție al sistemului optic să se păstreze, conform proiectului.*

Punerea în fapt a demersurilor necesare atingerii obiectivelor mai sus menționate a condus la următoarele concluzii generale:

□ În prezent, algoritmi optici de proiectare, permit obținerea unor subansambluri, respectiv sisteme complexe, limitate la difracție. Ca urmare, este justificată cercetarea evoluției componentelor optice după integrarea lor în subansambluri optomecanice, scopul urmărit fiind prezervarea calității previzionate pe cale strict de inginerie optică

□ sistemele optice sunt evaluate prin parametri care se măsoară în nanometri, astfel încât execuția și montajul pieselor optice și mecanice necesită o abordare diferită în raport cu construcția de mașini în general, atât prin prescrierea toleranțelor, dar mai ales privind aspectele care trebuie urmărite

□ piesele optice de refracție sunt executate din sticlă optică, a cărei principală caracteristică este transmitanța, ca o funcție izotropă, independentă de punct sau direcție

□ sticla este un material dur și fragil, cu comportament liniar elastic pe un interval foarte îngust de deformații specifice

□ lentilele, ca piese caracteristice pentru construcția sistemelor optice, reprezintă piese volumice, a căror analiză de tensiuni și deformații necesită o abordare tridimensională

□ montajul lentilelor în monturi conduce inevitabil la tensionarea sticlei. Tensiunile volumice prezintă o importanță deosebită datorită efectului de birefringență, care determină în diverse grade anizotropia materialului și induce fronturi de undă parazite, care pot compromite calitatea imaginii

□ starea complexă de tensiune și deformație a lentilelor impune apelarea la analiză prin metode numerice, accesibile prin programe dedicate, cele mai adecvate fiind cele care practică metoda elementului finit pentru rezolvarea problemelor de elasticitate

□ chiar și în cazul respectării poziției nominale a subansamblului optic în montură, practicarea unui montaj incorect, cu presarea lentilelor între montură și inelul filetat, poate conduce la deprecierea imaginii. Studiul

efectuat asupra unui sistem optic așezat în poziția nominală a relevat următoarele aspecte:

- tensiunile echivalente von Mises maxime au valori aproximativ egale cu încărcarea pentru lentila pe care este aplicată direct solicitarea exterioară și valori înjumătățite pentru următoarea piesă optică. Rezultă că, pentru un sistem optic mai complex, format dintr-un șir mai lung de lentile, cea mai afectată este cea care vine în contact direct cu inelul filetat. Efectul presiunii se diminuează semnificativ pe componentele următoare
- simetria geometrică de revoluție caracteristică lentilelor și simetria încărcării asigură menținerea simetriei în plan meridian și sagital și după deformație
- starea de tensiune și deformație în cazul pieselor optice are semnificații particulare față de abordarea caracteristică organelor de mașini, în general. Tensiunile au valori absolute mici, care nu constituie obiectul rațional al unor operații de dimensionare sau verificare. Sticla optică are o rezistență foarte ridicată la compresiune, astfel încât pericolul deteriorării datorită acestei solicitări practic nu există. Prezența tensiunilor însă, chiar la valori foarte reduse, poate induce fenomenul de birefringență, care afectează grav calitatea imaginii
- valorile efective ale tensiunilor admisibile din punct de vedere al birefringenței sunt individualizate pentru fiecare lentilă, având în vedere faptul că OPD introdus prin tensionare este direct proporțional cu grosimea componentei și coeficientul tensiunii optice, parametru care depinde de material. Astfel, pentru lentila convergentă, executată din sortul BK7, pentru respectarea criteriului Rayleigh, solicitarea exterioară trebuie limitată la $p=5\text{MPa}$, în timp ce pentru lentila divergentă, executată din sortul SF5, același criteriu conduce la limitarea $p=2\text{MPa}$. Rezultă că, pentru un sistem complex, care conține

- sorturi diferite de sticle și geometrii diferite ale componentelor, trebuie efectuată o simulare care să pună în evidență valoarea maximă admisibilă, stabilită ca fiind cea mai mică valoare dintre tensiunile admisibile individual, pe lentile
- deformațiile pieselor optice au valori absolute foarte scăzute, de ordinul $10^{-3} \dots 10^{-5}$, mărimi care în majoritatea cazurilor, în construcția de mașini ar fi considerate total ne semnificative. Pentru lentile, însă, deplasările punctelor de pe generatoarea circulară nominală, cu o distribuție neuniformă, care caracterizează atât variația volumului, cât și variația formei, au o importanță cu totul specială. Deplasările care apar datorită presării pieselor optice au ca rezultat deformarea generatoarei suprafeței inițial sferice
 - rezemarea pe umărul de sprijin al monturii și apăsarea inelului filetat din partea opusă au ca efect comprimarea pieselor în zona marginală și întinderea în zona centrală. În acest caz, deplasările generatoarei în plan meridian conduc la accentuarea caracterului convex al dioptrilor, care dobândesc un aspect mai bombat decât cel specific sferei
 - din punct de vedere matematic, generatoarea deformată a lentilelor poate fi aproximată cu o curbă asferică de tipul hiperbolei sau elipsei. Pentru lentila convergentă, mai puțin tensionată și cu deplasări mai mici, s-au modelat matematic generatoare asferice de tipul hiperbolei, având constante ale conicei negative, subunitare, cuprinse în intervalul $(-1,0)$. Odată cu creșterea solicitării, constanta conicei este tot mai mare în valoare absolută, punând în evidență abaterea de la forma sferică. Pentru lentila divergentă, mai puternic tensionată, în toate cele trei cazuri de încărcare, constanta conicei de aproximare a generatoarei deformate este mai mică decât -1 , indicând curbe de tipul elipsei

- analiza efectuată evidențiază un aspect de principiu particular, caracteristic pieselor optice și anume acela că deformațiile sunt mai importante decât tensiunile, din punct de vedere al influenței calității imaginii
 - sistemele optice cu dioptri asferici au caracteristici de calitate mai slabe decât cele determinate prin proiectare. Analiza dubletului cu suprafețe deformate în cele trei cazuri de încărcare studiate, a demonstrat pierderea caracterului limitat la difracție pe întreaga apertură a sistemului. Parametrii inițiali de calitate a imaginii s-au păstrat pe 85%, 70% și, respectiv 65% din câmpul obiect la solicitările $p=2\text{MPa}$, 5MPa , respectiv 10MPa . Din punct de vedere practic, se poate recomanda limitarea presiunii de contact la valoarea minimă $p=2\text{MPa}$. În același timp, se pot admite valori mai ridicate în măsura în care se admite pierderea liniarității sistemului pe un sector din zona marginală a câmpului obiect
- completarea studiului cu cazul unui sistem real, afectat de erori de montaj, concretizate prin descentrare și înclinare a componentelor optice în raport cu axa optică, respectiv axa y , a condus la următoarele observații:
- starea triaxială de tensiune și deformație este bine pusă în evidență la un studiu al tensiunilor principale. Toate trei au valori finite și comparabile
 - în valoare absolută, cele mai mari sunt tensiunile σ_3 , cu efect de compresiune pe jumătatea marginală a aperturii și de întindere pe centrul structurii. Numeric, tensiunile σ_3 sunt cu aproximativ 40% mai mari decât valoarea solicitării, spre deosebire de cazul simetriei perfecte, caracteristic poziției nominale, când cele două valori erau comparabile
 - tensiunile echivalente von Mises maxime au valori puțin superioare solicitării pentru lentila divergentă și se situează cam la jumătate pentru lentila convergentă. Rezultă că, pentru

un șir mai lung de lentile tensiunile nu sunt repartizate uniform. Solicitățile sunt preluate, preponderent de primele componente pe care exercită apăsarea. Tensiunile se diminuează rapid și devin tot mai reduse, pe măsură ce poziția lor este mai îndepărtată de inelul filetat. Ca urmare, o atenție deosebită trebuie acordată primei lentile sau primelor două dintr-un sistem complex, atenție care vizează atât birefringența, cât și deformarea dioptrilor

- simetria de rotație a structurii, chiar în urma impunerii descentrării și înclinării și simetria încărcării conduc la păstrarea simetriei geometrice a ansamblului după deformare. Numeric, în plan sagital, deplasările pe axa z au valori suficient de mici pentru a putea fi neglijate. Efectele erorilor de poziție și a solicitării exterioare sunt bine puse în evidență în plan meridian, pentru care s-a inițiat un studiu amănunțit
- prelevarea numerică a coordonatelor în plan meridian pentru punctele aparținând generatoarei dioptrilor a permis trasarea grafică a suprafețelor deformate și a curbelor generatoare de aproximare a profilului real. Prin utilizarea facilităților programului Microsoft Excel s-au determinat grafic și analitic curbele asferice de interpolare. S-au găsit, cu o precizie foarte ridicată, respectiv cu erori procentuale situate sub valoarea de 2%, polinoame de interpolare de gradul II, care definesc, de fapt, parabole. Atât pentru lentila convergentă, cât și pentru cea divergentă, în ambele cazuri de încărcare simulate, parabola s-a dovedit curba asferică adecvată aproximării profilului real deformat. Constanta conice pentru parabolă fiind $k = -1$, au putut fi deduse formele canonice ale curbelor asferice, necesare compatibilizării cu cerințele programului OSLO LT de analiză a sistemelor optice
- din punct de vedere al efectului de birefringență se mențin recomandările din capitolul anterior: 2MPa pentru lentila

divergentă și 5MPa pentru lentila convergentă. Se menționează faptul că majorarea tensiunilor nu afectează semnificativ OPD. Trebuie, de asemenea, avut în vedere caracterul strict individual al fiecărei componente pentru că birefringența depinde de material, geometrie și poziție în sistemul optic. Ca urmare, nu se poate face o recomandare general valabilă, ci se indică o analiză completă pentru fiecare caz concret, astfel încât să se stabilească exact valoarea la care trebuie limitată presiunea de contact la fixarea subansamblurilor optice

- analiza sistemului optic cu programul OSLO LT, având introdusele datele care caracterizează asferizarea dioptrilor 1 și 3, descentrarea și înclinarea, a pus în evidență deprecirea calității imaginii, cel puțin pentru studiul efectuat la apertura maximă
- evaluarea atentă a efectelor asferizării și erorilor de poziție scoate în evidență atât aspecte geometrice cât și cromatice. Calotele de paraboloid înclinate deformează puternic frontul de undă, cu precădere, în zona marginală. Aspectul necircular, alungit și rotit în raport cu axa y este bine pus în evidență pe diagrama spot și reprezentarea 3D a frontului de undă. Înclinarea și descentrarea, respectiv deplasarea vârfului dioptrilor în afara axei optice introduc un vârf de distorsiune în vecinătatea acesteia, cu efecte semnificative în diminuarea parametrilor globali de calitate. Sistemul optic este afectat și din punct de vedere cromatic, în sensul că se pierde parțial caracterul acromatic al dubletului. Toate aceste efecte se reflectă asupra MTF și PTF, la care curbele tangențială și sagitală nu se mai suprapun, așa cum se întâmplă în cazul sistemului ideal, fără erori
- diminuarea parametrilor de calitate a imaginii nu are însă un caracter catastrofal pentru sistem. Efectele negative descrise

mai sus se manifestă în zona marginală a subansamblului. Simularea unei aperturi mai mici demonstrează că sistemul își păstrează liniaritatea și, ca urmare caracterul limitat la difracție, pe 65%-70% din deschiderea maximă inițială

- ca o concluzie generală se poate aprecia că montajul părții optice în tubul mecanic diminuează calitatea imaginii. Efectele tensionării lentilelor constau în birefringența materialului și asferizarea dioptrilor. Valorile admise pentru presiunea exercitată de inelul filetat asupra componentelor optice depinde, în ultimă instanță, de exigență privind extinderea câmpului caracterizat de liniaritate. În funcție de cerințele de calitate ale fiecărei aplicații, este la latitudinea proiectantului să prescrie valoarea admisă a presiunii de contact și, funcție de geometria lentilei direct presate și de dimensiunea radială a ansamblului să determine forța normală, respectiv momentul de strângere a inelului filetat

□ din punct de vedere experimental concluziile analizei numerice pot fi confirmate prin evaluarea calitativă a imaginii formate de un sistem optic supus la tensiuni mecanice. Încercările s-au extins pe un domeniu de solicitare mărginit superior de valoarea încărcării la care deteriorarea globală a imaginii, conținând efectele cumulate ale birefringenței și abaterilor geometrice, devine perceptibilă pentru receptorul natural, ochiul.

Contribuțiile originale cuprinse în prezenta teză sunt subliniate prin următoarele realizări:

□ *sinteza cu un grad ridicat de condensare a informației dintr-un material extrem de vast, cu pronunțat caracter interdisciplinar, care vizează selectarea și corelarea elementelor de interes din domeniul științei materialelor, rezistenței materialelor și ingineriei optice*

□ *asocierea unor elemente vizând execuția și montajul sistemelor optomecanice, în vederea stabilirii influenței acestora asupra calității*

imaginii, printr-un demers interdisciplinar dificil, care are ca scop realizarea unei conexiuni coerente în lanțul: algoritm de proiectare optic – prescriere a toleranțelor de execuție și montaj pe criteriul calității imaginii – prescriere a solicitărilor mecanice admise la montaj

□ *stabilirea factorilor de influență asupra calității imaginii și a efectelor acestora, din perspectiva corelării procesului de montaj cu starea de tensiune și deformație permanentă a componentelor optomecanice*

□ *demonstrarea stării triaxiale de tensiune în cazul lentilelor și desfășurarea unui raționament care conduce la concluzia adecvanței teoriei a cincea de rezistență (criteriul energiei specifice modificatoare de formă) și a tensiunilor von Mises ca cel mai semnificativ element de caracterizare globală pentru problema de elasticitate generalizată formulată*

□ *proiectarea unui dublet acromat original, limitat la difracție*

□ *modelarea sistemului optomecanic dublet-montură-inel filetat în programul de element finit Abaqus*

□ *simularea comportării structurii în trei cazuri de încărcare*

□ *analiza efectului de birefrință cauzat de tensionarea în masă a lentilelor și recomandarea limitării solicitării exterioare la valori determinate direct funcție de sortul de sticlă optică și geometria componentei*

□ *determinarea numerică a curbelor generatoare ale suprafețelor deformate datorită solicitării mecanice*

□ *modelarea matematică a generatoarelor deformate prin curbe conice, pentru care s-au determinat expresiile analitice în forma canonică și constanta conice pentru compatibilizarea analizei calității imaginii cu programul OSLO*

□ *evaluarea influenței abaterilor de la forma sferică nominală asupra parametrilor de calitate a imaginii, cu ajutorul programului OSLO*

□ *recomandarea privind limitarea presiunii de contact lentilă-inel la $p=2\text{MPa}$, pentru păstrarea caracterului limitat la difracție al sistemului pe*

85% din apertură

- modelarea unui sistem optomecanic real, afectat de erori de montaj, prin generarea fișierelor grafice în AUTOCAD și importarea în Abaqus. Modelarea numerică necesită o precizie foarte ridicată, având în vedere că descentrarea și înclinarea au fost impuse la valori de 0.02mm, respectiv 0.1°, conform abaterilor maxime determinate pe criterii optice*
- simularea comportării structurii pentru două cazuri de încărcare, corespunzătoare presiunilor de contact $p=2\text{MPa}$ și $p=5\text{MPa}$*
- modelarea matematică a generatoarelor deformate prin curbe conice, de tipul parabolei, pentru care s-au determinat expresiile analitice în forma canonică și constanta conice pentru compatibilizarea analizei calității imaginii cu programul OSLO*
- evaluarea influenței asferizării, descentrării și înclinării asupra parametrilor de calitate a imaginii, cu ajutorul programului OSLO*
- interpretarea rezultatelor analizei OSLO privind evoluția negativă a distorsiunii, aberațiilor cromatice și funcției optice de transfer*
- evaluarea reducerii zonei de liniaritate a sistemului optic*
- elaborarea recomandării generale privind prescrierea momentului de strângere a inelului filetat având în vedere factorii sensibili ai sistemului: sortul de sticlă (prin coeficientul tensiunii optice), geometria lentilelor (prin curbura efectivă care influențează aria nominală de contact lentilă-inel), poziția lentilei în șirul de componente care formează sistemul (având în vedere distribuția neuniformă a tensiunilor pe componente) și gabaritul radial al subansamblului optic*
- proiectarea și realizarea unui experiment practic, care să pună în evidență calitativ scăderea calității imaginii prin tensionarea mecanică a componentelor optice.*

BIBLIOGRAFIE

- 1 [B1] Bodea R., Gruescu, C., Străuți-Negru G., *Resolution, Contrast and Image Quality of Endoscopes Using Optical Fibers, Part I*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, CD-ROM Edition, Vol. III (XIII), 2004, ISSN 1583-0691
- 2 [B2] Bodea R., Gruescu, C., Străuți-Negru G., *Resolution, Contrast and Image Quality of Endoscopes Using Optical Fibers, Part II*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, CD-ROM Edition, Vol. III (XIII), 2004, ISSN 1583-0691
- 3 [B3] Boreman, G.D., *Transfer Function Techniques*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- 4 [B4] Băcescu, D., *Construcția și perfecționarea obiectivelor sistemelor optice de măsurare*, Teza de doctorat, UP București, 1996
- 5 [B4] Bodea, R., *Contribuții privind sinteza subansamblurilor optice corectate la aberații cromatice și spectru secundar*, Teza de doctorat, UPT, 2004
- 6 [B5] Bodea R., Hule V., **Hora H.** *Study Regarding the Prescription of Clearance for Optomechanical Fits*, Annual Session Of Scientific Papers IMT ORADEA – 2009 Oradea, Felix Spa, May 28-29th, 2009
- 7 [C1] Calciu, M., ș.a., *Utilajul și tehnologia confecționării lentilelor și prismelor*, E.D.P., București, 1973
- 8 [C2] Crețu, E., Tomiuc, L., *Optică tehnică*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1993
- 9 [C3] Crețu, E., ș.a., *Aplicații în calculul și proiectarea sistemelor optice*, Ed. Academiei Tehnice Militare, București, 1995
- 10 [C4] Crețu, E., Câmpeanu, M., *Tehnici de laborator în optica tehnică și construcția aparatului artileristic*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1994
- 11 [C5] Curatu, E., *Calitatea sistemelor optice. Funcția optică de transfer*, Ed. Academiei Române, București, 1992
- 12 [D1] Davidescu A., Gruescu C., *Diagrama spot – criteriu de calitate a imaginii*, A XXVIII-a Sesiune de Comunicări Științifice cu participare internațională, Academia Tehnică Militară, București, 1999
- 13 [D2] Dodoc, P., *Calculul și construcția aparatelor optice*, E.D.P., București, 1983

- | | | | |
|----|-------|--|---|
| 14 | [D3] | Duma, V.F., | <i>Contribuții la analiza și sinteza sistemelor de scanare</i> , Teza de doctorat, UP Ymișoara, 2001 |
| 15 | [D3] | Duma, V.F., Nicoară, I., | <i>Some Optical Characteristics of Centered Optical Systems</i> , Buletinul Științific al UPT, Tom 39(53), 1994 |
| 16 | [D4] | Dumitru, I., Neguț, N., | Elemente de elasticitate, plasticitate și rezistența materialelor, vol.I, Editura Politehnica, 2003 |
| 17 | [D5] | Deutsch, I., | <i>Rezistența materialelor</i> , E.D.P., București, 1979 |
| 18 | [G1] | Goodman, D.S., | <i>General Principles of Geometric Optics</i> , in Handbook of Optics, vol.II, ch. 1, McGraw Hill Inc., NY,1995 |
| 19 | [G2] | Gruescu, C., | <i>Elemente de optică tehnică și aparate optice</i> , Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000 |
| 20 | [G3] | Gruescu, C., Nicoară, I., | <i>The cemented achromat – a critical view</i> , Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), seria Mecanică, 1999 |
| 21 | [G4] | Gruescu, C., Strauți Negru, G., Nicoara I. | <i>Aspects concerning the influence of execution errors of optical components upon the image quality</i> , The VI th international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov, 2002, volume 1-20a, p 281-284 |
| 22 | [G5] | Gruescu, C., | <i>Analiza aberației sferice și a comei sagitale pentru lentile singulare</i> , Analele Universității Aurel Vlaicu Arad, 2000, Mecanică, p.252-255 |
| 23 | [G6] | Gruescu C., Balaban, G., | <i>Analyse of transverse spherical aberration of a tilted lens</i> , The 8.th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmissions with international participation, Timișoara, 2000, p.143-148 |
| 24 | [G7] | Gruescu, C., Nicoară, I., | <i>Study on image quality in respect with the lens position errors</i> , Sesiunea de Comunicări cu participare internațională, Agenția de Cercetare pentru Tehnologii Militare, București, 2001 |
| 25 | [G8] | Gruescu, C., Nicoară, I., | <i>Considerations on eyeglasses image quality</i> , Proceedings of the VIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2 |
| 26 | [G9] | Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., | <i>Image Quality Optimization of an Achromatic Doublet Using Defocusing and Methods Based on OPD</i> , Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600 |
| 27 | [G10] | Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., | <i>Glass Choise for Achromatic Optical Systems</i> , Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600 |
| 28 | [G11] | Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., | <i>Image Quality Optimization of an Achromatic Triplet Using Defocusing and Methods Based on OPD</i> , Proceedings of COMEFIM '7, The 7-th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering, Bucharest, 2004, p.263 |
| 29 | [G12] | Gruescu C., Negru-Strauți-G., Bodea R., | <i>Application of Electra Method on Optical Products Choice</i> , Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara România, Tom 48 (62) |

- 2003, Fascicola 1,2 Management. Economic Engineering. Transportation Engineering
- 30 [G13] Gruescu, C., Pommersheim, A., *Optică tehnică*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- 31 [G14] Gruescu, C., Zsivanov, D., *Aparate spectrale și fotometrice*, Lito, UPT, 1997
- 32 [G15] Gruescu., C. Nicoară, I. *Aparate optice. Analiza și sinteza sistemelor optice lenticulare*.Ed. Politehnica Timișoara 2004, ISBN 973-625-158-6
- 33 [G16] Gruescu, C., Nicoară, I., **Hora, H.** *Study Regarding The Influence Of Mounting Clearance On Image Quality Of Optomechanical Systems*, 2nd VIDA International Conference, Poznan, 2005
- 34 [G17] Gruescu, C. Nicoara I. Popov, D., **Hora, H.** *Optical Glass Compatibility For the Design of Achromatic Systems*, Science of Sintering, 40 (2008) 131-140, doi: 10.2298/SOS0802131G UDK 666.3-128:621.315.612
- 35 [G18] Gruescu C., **Hora H.**, Costache, M. *Analysis of the composition law for the fourier parameters of a complex optical system – numerical modeling and simulation*, COMEFIM8, The 8th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering, Cluj-Napoca, 2006, Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics 49, Vol.IV, p.909-916
- 36 [G19] Gruescu C., **Hora, H.**, Nicoara, I. *Influence of Mechanically Induced Birefringence*, Proceedings of the 6th International Conference of DAAAM Baltic, Industrial Engineering, Tallinn, 2008, ISBN 978-9985-59-783-5, p.239-244
- 37 [G20] Gârbea, D., *Analiza cu elemente finite*, Editura Tehnică, București, 1990
- 38 [G21] Gafițanu, M., ș.a., *Elemente finite și de frontieră cu aplicații în calculul organelor de mașini*, Editura Tehnică, București, 1990
- 39 [H1] Halvorson, M., Gygmyr, D., *Learn Basic Now*, Microsoft Press, 1989
- 40 [H2] Hecht, E., *Optics* 3rd ed., Eddison Wesley Longman, Inc., NY, 1998
- 41 [H3] Hütte *Manualul inginerului*, Fundamente, E.T., București, 1995
- 42 [H4] Homei, D., *Contribuții la optimizarea unor parametri specifici aparatului artileristice, opto-mecanice și optoelectronice*, Teza de doctorat, ATM București, 2003
- 43 [H4] Hodam, F., *Technische Optik*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965
- 44 [J1] Johnson, B.R., *Lenses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch.1, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 45 [J2] Jones, R.V., *Instruments and Experiences*, John Wiley, New York, 1988
- 46 [K1] Kingslake, R., *Lens design fundamentals*, Academic Press, N.Y.,1978
- 47 [L1] Luca, E., ș.a., *Fizica generală*, E.D.P., București, 1981

- 48 [L2] Lytle, J.D., *Polymeric Optics*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 49 [M1] Malacara, D., Malacara, Z., *Optical Metrology*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 29, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 50 [M2] Mihalca, I., *Optică*, partea I, Lito IPT, 1981
- 51 [M3] Mîrzu, M., Crețu, E., Nicoară, I., *Optica ondulatorie și Fourier*, ED. Academiei Tehnice Militare și ED. Pro Transilvania, București, 1996
- 52 [M4] Moisil, G., Curatu, E., *Optică, Teorie și aplicații*, E.T., București, 1986
- 53 [M5] Marian, A.M., *Contribuții privind parametrizarea fenomenului cromatic*, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2002
- 54 [M6] Mazăre, P., *Contribuții la studiul reflectorilor cu diagrama de directivitate $\cos^2(\theta)$* , Teza de doctorat, ATM București, 2004
- 55 [N1] Naumann, A., Schroder, G., *Bauelemente der Optik. Taschenbuch der technischen Optik*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1992
- 56 [N2] Nicoară, I., *Calculul și construcția aparatelor optice*, vol.I, II, Lito I.P.T., 1987
- 57 [N3] Nicoară, I., ș.a., *Calculul și construcția aparatelor optice*, Îndrumător de proiectare, Lito IPTVT, 1984
- 58 [N4] Nicoară, I., ș.a., *Aparate optice, Tehnici de laborator*, Ed. Mirton, Timișoara, 1996
- 59 [N5] Nicoară, I., Gruescu, C., ș.a. *Aparate optice*, vol I, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000
- 60 [N6] Nicoară, I., ș.a., *Considerations on Eyeglasses Image Quality*, Proceedings of the VIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- 61 [N7] Nossiter, J., *Microsoft Excel 97*, Ed. Teora, București, 1998
- 62 [O1] O'Shea, D.C., *Elements of Modern Optical Design*, John Wiley&Sons, New York, 1985
- 63 [O2] O'Shea, D.C., Harrigan, E., *Aberration Curves in Lens Design*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 64 [O3] Olariu, V., ș.a., *Modelare numerică cu elemente finite*, Editura Tehnică, București, 1986
- 65 [O4] Okruhlik, M., *Finite Element Homework and Programming Applications*, IFToM, p. 3161-3165, Politehnica di Milano, 1995
- 66 [P1] Pommersheim, A., *Optica tehnică*, curs pentru subingineri, vol.I, Lito I.P.T.,1989
- 67 [P2] Pommersheim, A. ș.a., *Optica tehnică*, Lucrări de laborator, Lito UTT, 1995
- 68 [P3] Pommersheim, A., Gruescu, C., *Metoda pentru calculul unui dublet acromatic corectat la aberația de sfericitate*, Analele Universității din Oradea, 1992
- 69 [P4] Pommersheim, A., Gruescu, C., *Metoda de proiectare a unui triplet apalanat*, Analele Universității din Oradea, 1994

- | | | | |
|----|-------|---------------------------------|--|
| 70 | [P5] | Popescu, I.I., Toader, I., | <i>Optica</i> , E.S.T., București, 1989 |
| 71 | [P6] | Popescu, I.M., | <i>Teoria electromagnetică macroscopică a luminii</i> , Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1986 |
| 72 | [P7] | Popovici, V., Nicoară, I., | <i>Sisteme optice laser</i> , Ed. Mirton, Timișoara, 1998 |
| 73 | [P8] | Plummer, W.T., | <i>Precision: How To Achieve A Little More Of It, Even After Assembly</i> , Polaroid Corporation, 38 Henry Street, Cambridge, MA 02139 USA |
| 74 | [P9] | Plummer, W.T., | <i>Fast Automatic Lens Testing of Extended-Field Image Quality</i> , Appl. Optics 15(3),805-810(1976) |
| 75 | [P10] | Ponomariov, S.D., ș.a., | <i>Calculul de rezistență în construcția de mașini</i> , vol I-III, Editura Tehnică, București, 1963 |
| 76 | [R1] | Reimelt, C., ș.a., | <i>Program for the Automated Design of Aphotical Optical Systems</i> , The VI th international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov 2002, vol. 3-21a, p 195-202 |
| 77 | [R2] | Reimelt, C., | <i>Aplicarea tehnicilor de proiectare orientate pe obiecte în construcția aparatelor și echipamentelor</i> , Teza de doctorat, UP Timișoara, 2003 |
| 78 | [R3] | Rojișteanu, C., | <i>Contribuții la studiul parametrilor de sistem optimi ai telemetrelor laser</i> , Teza de doctorat, ATM București, 2003 |
| 79 | [S1] | Schröder, G., | <i>Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen</i> . Vogel Buchverlag Würzburg. 1990 |
| 80 | [S2] | Shannon, R.R., | <i>Optical Specification</i> , in Handbook of Optics, vol.I, ch.34, McGraw Hill Inc., NY,1995 |
| 81 | [S3] | Shannon, R.R., | <i>Tolerancing Techniques</i> , in Handbook of Optics, vol.I, ch.36, McGraw Hill Inc., NY,1995 |
| 82 | [S4] | Sinclair, D.C., | <i>Optical Design Software</i> , in Handbook of Optics, vol.I, ch. 34, McGraw Hill Inc., NY,1995 |
| 83 | [S5] | Străuți-Negru, G., Gruescu, C., | <i>Application of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) on Optical Products Domain</i> , Al VII-lea Simpozion International de Management SIM 2003 "Managementul Organizațiilor Performante la începutul Mileniului 3", Timisoara – Romania 12-13 decembrie, 2003, suport CD-ROM |
| 84 | [S6] | Smith, W.J., | <i>Modern Optical Engineering</i> , 3 rd ed., McGraw Hill, NY, 2000 |
| 85 | [S7] | Smith, W.J., | <i>Techniques of First-Order Layout</i> , in Handbook of Optics, vol.I, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY,1995 |
| 86 | [S8] | Sterian, P., Stan., M., | <i>Fizica</i> , E.D.P., București, 1985 |
| 87 | [S9] | Subbarao, M.M | <i>The Optical Transfer Function of Diffraction-limited System for Polychromatic Illumination</i> , State University. NY |
| 88 | [S10] | STAS 3003-79 | <i>Optica geometrică. Terminologie și simboluri</i> |
| 89 | [S11] | STAS 4702-88 | <i>Desene tehnice. Desene de execuție pentru piese optice</i> |
| 90 | [S12] | SR ISO 9334 - 95 | <i>Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Definiții și relații matematice</i> |

- 91 [S13] SR ISO 9335 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Principii și proceduri de măsurare*
- 92 [S14] Strong, J., *Procedures in Applied Optics* pp. 63-69, Marcel Dekker, New York, 1989
- 93 [S15] Sinclair, D.C., *Whither Optical Design?*, Optics and Photonics News, June 2000
- 94 [S16] Străuți-Negru, G., *Corelarea parametrilor de calitate a imaginii cu erorile de execuție și montaj ai sistemelor optomecanice*, Teza de doctorat, UPT, 2005
- 95 [T1] Toader, E., Spulber, V., *Optică pentru tehnicieni*, E.T., București, 1985
- 96 [T2] Tropf, W.J., ș.a., *Properties of Crystals and Glasses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- 97 [T3] Trufașu, A.O., *Cercetarea și realizarea unor noi utilaje optice pentru mașini-unelte de înaltă precizie*, Teza de doctorat UP București, 1997
- 98 [T4] Tufiș, M., *Contribuții la studiul transmisiei imaginilor prin fibre optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2004-08-02
- 99 [T5] Timoshenko, S.P., ș.a., *Theory of Elasticity, 3rd ed.*, McGraw Hill Co., 1970
- 100 [Z1] Zsivanov, D., ș.a., *Analiza asistată de calculator a sferocromatismului sistemelor optice*, Analele Universității Oradea, 1995, Fascicola Mecanică, p.7-14
- 101 [Z2] Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*, McGraw-Hill Co., 1977
- 102 [V1] Vedinaș, I., *Contribuții la studiul stabilității imaginii prin sisteme optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2002
- 103 [W1] www.optikos.com *How to Measure MTF and other Properties of Lenses*
- 104 [W2] www.alma.com *Alignment Tolerances for ALMA Optics, ALMA Memo 395 by B. Lazareff*
- 105 [W3] www.edmundoptics.com *Lenses, prisms*
- 106 [W4] www.homeschooloffish.com *Lenses*
- 107 [W5] www.OptiCentric.com *Tools for Production and Lab*
- 108 [W6] www.oss.org/bios/fellows-wjsmith.htm
- 109 [W7] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/index.html
- 110 [W8] www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasindex.html
- 111 [W9] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/index.html
- 112 [W10] www.sff.net/people/Jeff.Hecht/history.html
- 113 [W11] www.ee.umd.edu/~taylor/optics.htm
- 114 [W12] www.occfiber.com/
- 115 [W13] www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Abbe.html
- 116 [W14] www.OSLO.com
- 117 [W15] www.Interoptik.ro
- 118 [W16] www.sinopt.com
- 119 [W18] jsfejes@swva.net
- 120 [W19] www.atmsite.org/keyword.html

121 [W20] www.wtpoptics.com/Assembly.html

122 [W22] www.sinopt.com/learning1/optsoft/whither/whither.htm