

STUDIUL PROCESELOR DE AMBUTISARE ADÂNCĂ UTILIZÂND METODE NUMERICE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ
de către

Ing. Adrian Birlan

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing Mihai Jădăneanț

Referenți științifici: Prof.univ.emerit dr.ing. Mircea Bejan
Prof.univ.dr.ing.Gilbert-Rainer Gillich
Prof.univ.dr.ing. Dumitru Țucu

Ziua susținerii tezei: 19.11.2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2012

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Apărută ca o necesitate odată cu dezvoltarea industriilor și mai ales a industriei constructoare de mașini, ambutisarea reprezintă în contextul economic actual o posibilitate importantă de a satisface cerințele mondiale în diferitele domenii de activitate începând cu produsele finite simple până la cele mai complexe. Tehnologiile avansate de ambutisare ca efect al cercetării și inovării, își găsesc aplicabilitatea și utilitatea pentru principalul dezirat al industriei actuale: competitivitatea.

Se poate aprecia că tehnologia de ambutisare pentru obținerea în final a parametrilor optimi la ambutisarea cu reținere este o îmbinare a mai multor domenii de cercetare științifică și anume: mecanică, matematică, informatică, etc. cu produsele soft de analiză și simulare computerizată.

Teza de doctorat "Studiul proceselor de ambutisare adâncă utilizând metode numerice", prin studiile și experimentele efectuate, fundamentează fenomenele care stau la baza procesului de ambutisare adâncă, cu precădere ambutisarea cu inel de reținere. În realizarea lucrării am fost ajutat și susținut de cadrele didactice ale catedrei TMT-AR și Rezistența materialelor din Facultatea de Mecanică a Universității "Politehnica" din Timișoara cu care împart rezultatele și cărora le mulțumesc.

Mulțumesc în primul rând lui Dumnezeu că încă de la începutul școlii doctorale mi-a îndreptat pașii către domnii profesori conducători și îndrumători.

Doresc să-mi exprim caldă recunoștință și considerație față de conducătorul științific al tezei de doctorat domnul Prof.univ.Dr.Ing. Mihai Jădăneanț, pentru sprijinul, încrederea, răbdarea și înțelegerea acordată, pentru sfaturile competente pe întreg parcursul ciclului de doctorat.

Mulțumesc domnului Prof.univ.Dr.Ing. Nicolae Faur pentru colaborarea, sprijinul și ajutorul susținut, acordat pe parcursul anilor de studiu.

De asemenea, mulțumesc domnului Ș.L.Dr.Ing. Nicolae Ciobotaru pentru ajutorul acordat pe parcursul redactării prezentei lucrări.

Adresez mulțumiri domnului asistent Dr.Ing. Cristian Neș și domnului tehnician de laborator Iosif Covacs pentru sprijinul acordat.

Adresez sincere mulțumiri referenților științifici oficiali: Prof.univ. emerit Dr.Ing. Mircea Bejan, Prof.univ.Dr.Ing. Gilbert-Rainer Gillich și Prof.univ.Dr.Ing. Dumitru Țucu pentru acceptarea și solitudinea cu care au realizat recenzia lucrării.

În final îndrept un gând de dragoste și recunoștință către familia mea, în special soției mele Cosmina, pentru sprijinul și devotamentul lor în vederea aducerii la bun sfârșit a acestei lucrări.

Timișoara, 30 octombrie 2012

Ing. Adrian Birlan

"Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din grantul strategic POSDRU/88/1.5/S/50783, Proiect ID50783 (2009), cofinanțat din Fondul Social European "Investește în oameni", în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltare Resurse Umane 2007-2013"

Dedic această lucrare
Familiei și tuturor prietenilor mei;
Tuturor colaboratorilor mulțumiri pentru sprijinul acordat

Birlan Adrian

**STUDIUL PROCESELOR DE AMBUTISARE ADÂNCĂ UTILIZÂND METODE
NUMERICE**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 48, Editura Politehnica, 2012, 170 pagini,
116 figuri, 5 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN:978-606-554-521-2

Cuvinte cheie: Path, Mesch, Simulare numerică, Model numeric implementat,
Tensiune instantanee, Deformație instantanee, Frame, Step, Load, Assemblz

Rezumat,

Teza de doctorat abordează un domeniu de actualitate din România, anume acela al predicției numerice acoperitoare, utilizând un model numeric implementat care este rulat cu ajutorul unui program de simulare numerică. Tehnologia propusă este aceea de a crea condițiile reale de lucru a unui proces dinamic care este simulat prin intermediul unui model numeric realizat înainte. Scopul cercetării constă în capacitatea validării modelului numeric prin compararea rezultatelor numerice din simulare cu rezultatele din experiment. S-a realizat și sistematizarea stadiului actual al cunoașterii precum și a tehnologiilor de simulare utilizate. Concluziile desprinse din simularea numerică în urma rulării modelului realizat m-au condus la realizarea din punct de vedere dimensional și practic a unui stand experimental concretizat sub forma dispozitivului de ambutisare.

În urma fazei experimentale se urmăresc două variabile tensiunea și deformația instantanee care sunt supuse comparației ca valoare cu omoloagele acestora din studiul simulativ. Se obține o eroare de lucru de 2,6% între variabilele studiate din simulare respectiv experiment. Astfel ne încadrăm în eroarea inginerească de 3%, putând astfel să validez modelul numeric. Cu modelul numeric valid se recurge la modificare unor serii de parametrii activi de lucru și se verifică pe seturi de câte trei măsurători variabilele parametrice din experiment, răspunsul fiind unul optim scontat.

În partea de contribuții personale se scot în evidență avantajele unei economii substanțiale de consum de material metalic sub formă de tablă și de încercări reale de setare a parametrilor de lucru ai mașinii de ambutisat.

CUPRINS

1. Introducere. Obiectivele tezei	7
1.1. Introducere.....	7
1.2. Obiectivele tezei de doctorat.....	10
1.3. Programul de cercetare. Etape.....	11
2. Stadiul actual al cercetării privind ambutisarea la rece	12
2.1. Stadiul actual al cercetărilor numerice în cazul ambutisării adânci.....	12
2.2. Concluzii.....	22
3. Crearea algoritmului informatic pentru ambutisare în Abaqus 6.8-1	25
3.1. Modelul numeric implementat pentru simularea procesului de ambutisare.....	25
3.1.1. Secțiunile de rulare a modelului cu programul Abaqus 6.8-1 ...	25
3.1.2. Elemente de simplificare în modelul numeric și în secțiunile programului pentru procesul de ambutisare adâncă.....	28
3.1.3. Secțiunea Part din modelul de simulare implementat.....	32
3.1.4. Secțiunea Property din modelul de simulare implementat.....	34
3.2. Concluzii.....	57
4. Exemplu de calcul al tensiunilor și deformațiilor utilizând modelul numeric	58
4.1. Obiective.....	58
4.2. Ipoteze simplificatoare a procesului de ambutisare privind reducerea dimensionalității elementelor de lucru.....	58
4.2.1. Domenii și condiții limită în faza inițială a simulării procesului de ambutisare.....	59
4.2.2. Schimbări în condițiile limită, o dată cu mișcarea poansonului ..	62
4.2.3. Condițiile limită la matriță și la poanson în regiunea profilului razei poansonului.....	63
4.2.4. Algoritm de contact.....	65
4.2.5. Descrierea modelului implementat în procesul de ambutisare...	66
4.2.6. Lubrefierea la ambutisare.....	72
4.2.7. Fenomene întâlnite în procesul de ambutisare.....	73
4.3. Calculul numeric al tensiunilor și deformațiilor.....	75
4.4. Tensiuni și deformații în cazuri speciale de ambutisare.....	103
4.5. Concluzii.....	109
5. Cercetări experimentale în scopul validării modelului numeric de simulare	111
5.1. Obiective.....	111

6 Cuprins

5.2. Proiectarea și execuția dispozitivului de ambutisare.....	111
5.3. Încercări experimentale	123
5.3.1. Determinare curbei de tracțiune sigma-epsilon a materialului foii tablei	123
5.3.2. Încercări experimentale la ambutisare	125
5.3.2.1. Introducere	125
5.3.2.2. Implementarea dispozitivului de ambutisare în standul experimental	125
5.3.2.3. Fazele procesului de ambutisare	132
5.4. Concluzii	137
6. Validarea modelului numeric.....	138
6.1. Obiective	138
6.2. Validarea modelului numeric de simulare.....	138
6.3. Schema logică de rulare a modelului	147
6.4. Concluzii	149
7. Contribuții personale și elemente de continuitate a studiului de față	151
7.1. Concluzii finale	151
7.2. Contribuții personale	151
7.3. Perspective de dezvoltare a temei	154
7.3.1. Dezvoltarea cercetărilor teoretice	154
7.3.2. Dezvoltarea cercetărilor experimentale	155
8. Bibliografie	156
Lista de figuri.....	164
Lista de tabele	167
Lista de notații	168

LISTA DE NOTAȚII

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	[°]	- unghiuri de înclinare după axe de coordonate;
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[MPa]	- Tensiuni normale după axele de coordonate;
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	[MPa]	- Tensiuni tangențiale după axele de coordonate;
$\Delta Ax, \Delta Ay, \Delta Az$	[m ²]	- Suprafața de acțiune a efortului după axele X,Y,Z
T_σ	[-]	- Tensorul tensiunilor;
W_f	[J]	- Energie potențială de deformare;
ϵ_t	[-]	- Deformația specifică totală;
ϵ_e	[-]	- Deformația specifică elastică;
ϵ_p	[-]	- Deformația specifică plastică;
ϵ_x	[-]	- Deformația specifică logaritmică după axa X;
ϵ_y	[-]	- Deformația specifică logaritmică după axa Y;
ϵ_z	[-]	- Deformația specifică logaritmică după axa Z;
σ_{oct}	[MPa]	- Efort unitar normal octaedric;
τ_{oct}	[MPa]	- Efort unitar tangențial octaedric;
$D_{\sigma=}$	[-]	- Deviatorul eforturilor unitare;
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MPa]	- Eforturi normale principale;
$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$	[MPa]	- Invariantii eforturilor unitare;
W_f	[J]	- Energie potențială de deformare;
V	[m ³]	- Volumul materialului supus deformării;
D	[mm]	- Diametrul semifabricatului;
d	[mm]	- Diametrul reperului finit;
H	[mm]	- Înălțimea reperului nou format;
Q	[N]	- Forță de apăsare pe inelul de reținere;
d_p	[mm]	- Diametrul de trecere al inelului de reținere;
d_{pl}	[mm]	- Diametrul interior al matriței;
A_i	[mm]	- Abatere inferioară;
A_s	[mm]	- Abatere superioară;
T_p	[mm]	- Toleranță poanson;
T_{pl}	[mm]	- Toleranță matriță;
j_a	[mm]	-Joc activ între poanson și matriță;

1. INTRODUCERE. OBIECTIVELE TEZEI

1.1. Introducere

Procedeele de prelucrare prin deformare plastică la rece, împreună cu procedeele de prelucrare prin aşchiere, reprezintă cele mai răspândite și utilizate metode de generare a formei pieselor finite în domeniul construcției de mașini.

Cele două mari grupe de procedee de prelucrare și-au împărțit astfel domeniul, stabilindu-se și o distribuție implicită a necesității de utilizare a uneia sau alteia: prelucrări prin aşchiere pentru obținerea pieselor de dimensiuni medii și mici, în condiții de mare precizie și prelucrări prin deformare plastică la rece pentru obținerea unor piese de dimensiuni mari și forme complexe.

Această distribuție a fost influențată în principal de industria constructoare de autovehicule, „locomotiva” industriei prelucrătoare, piesele reprezentative pentru cele două tipuri de procedee de prelucrare fiind piesele din construcția motoarelor pentru aşchiere, respectiv elementele de caroserie, pentru deformarea plastică la rece, mai exact ambutisare adâncă.

Făcând o mică paranteză pe marginea acestui subiect al deformațiilor plastice la rece, țin să amintesc puțin și în context istoric vorbind, că tehnologia de ambutisare a fost inițiată de englezul Alexander Parker (1813-1890), care în anul 1857 a patentat ambutisarea unei table din cupru, iar în anul 1859 în colaborare cu Bessemer, a realizat cu succes ambutisarea unei piese de 11 cm diametru și 10 cm înălțime, dintr-o tablă de oțel de 12 cm diametru și 0.75 mm grosime.

Aceste paradigme au fost însă serios zdruncinate de evoluțiile din domeniul tehnic și economic din ultimii ani. Pe de o parte, cercetările din domeniul prelucrărilor prin deformare plastică la rece au extins mult zona de aplicabilitate a acestora, ambutisarea fiind unul dintre procedeele care permit realizarea unor piese în condiții de dimensiuni, forme, precizii și costuri care erau cu puțin timp în urmă accesibile doar prelucrărilor prin aşchiere. Pe de altă parte, criza economico-financiară, care se manifestă la nivel global, a obligat firmele să-și regândească strategiile de producție și să investească în tehnologii de prelucrare cu grad ridicat de noutate. Tehnologiile de prelucrare prin deformare plastică au beneficiat intens de acest lucru, literatura de specialitate de ultimă oră abundând de rezultate în acest domeniu, un loc important fiind ocupat de ambutisarea adâncă la rece.

De asemenea, industria constructoare de autovehicule și-a redus rolul dominant în industria prelucrătoare, în favoarea industriei bunurilor de consum și a industriei bio-medicale.

Acest fapt nu a condus la o scădere a gradului de utilizare a tehnologiilor de prelucrare prin deformare plastică la rece, ci dimpotrivă, dar a implicat în principal găsirea unor soluții la următoarele provocări: reducerea dimensiunilor pieselor realizate prin aceste procedee, creșterea complexității formei și creșterea gradului de flexibilitate a procedeeului de generare a formei pieselor.

Simularea numerică a procesului de ambutisare adâncă la rece, studiat în cadrul lucrării, răspunde acestor provocări, în domeniul deformațiilor plastice și mai presus de atât aduce ca noutate o vedere de ansamblu asupra tuturor fenomenelor fizice ce au loc în piesele realizate îndeplinind toate cerințele amintite mai sus.

Prin tehnicile de simulare ale unor programe consacrate pe această ramură a deformațiilor plastice la rece, s-au obținut o serie de facilități tehnico-economice care permit utilizatorului să optimizeze foarte bine consumul de material metalic cât și uzura mașinilor de prelucrat prin deformare plastică la rece, respectiv optimizarea încă de la început a condițiilor de realizare a deformațiilor plastice la rece pentru a avea rezultatul dorit. Multe programe de simulare ca LS Dyna, Dynaform, Catia V5, Ansis, Fluent respectiv Abaqus 6.8-1 și Abaqus 9.3-1 redau multe caracteristici fizice ale elementelor studiate atât static cât și dinamic, însă cu puține programe se poate face o cercetare de simulare dinamică în care să rezulte p o predicție real acoperitoare a simulării față de cazul real de experiment.

Cu toate acestea, procedeul are încă un grad ridicat de noutate, existând încă multe întrebări de natură științifică și tehnologică care își așteaptă încă răspunsul.

Cercetările asupra procedeeului de simulare numerică pe baza unui model de lucru a procesului de ambutisare adâncă la rece au un grad ridicat de dificultate, existând câteva motive principale ale acestui fapt.

În primul rând baza materială pentru aceste cercetări este una foarte complexă, fiind necesare echipamente pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor utilizate, echipamente pentru măsurarea deformațiilor, echipamente pentru achiziții de date, echipamente tehnologice pentru realizarea propriu-zisă a proceselor. De asemenea, sunt necesare pachete software pentru simulare, analiză tehnică, prelucrare și interpretare a datelor.

O estimare aproximativă, dar cu un grad relativ ridicat de acuratețe, relevă faptul că suma necesară dezvoltării unui laborator de cercetări în domeniul procedeelelor moderne de prelucrare prin deformare plastică la rece depășește 500.000 EUR. Nu în ultimul rând trebuie avută în vedere resursa umană implicată în aceste cercetări care trebuie să aibă un nivel extrem de ridicat de instruire. Studiile asupra ambutisării adânci la rece necesită cunoștințe din domeniul mecanicii teoretice, studiului și tehnologiei materialelor, teoriei plasticității, tehnologiei construcțiilor de mașini, tehnicilor CAD/CAE/CAM, automatizărilor industriale și programării mașinilor unelte cu comandă numerică.

În consecință, tematica lucrării a fost aleasă în contextul prezentat mai sus, legat de dezvoltarea noilor procedee de prelucrare prin deformare plastică la rece, iar cercetările teoretice și experimentale abordate pe parcursul elaborării lucrării au fost realizate beneficiind de baza materială a laboratorului de rezistența materialelor din cadrul Facultății de Mecanică, de competența, experiența în domeniu și rezultatele anterioare obținute de membrii colectivului de cercetare al acestuia, și, nu în ultimul rând, de sprijinul, sfaturile și îndrumarea competentă a conducătorului științific al lucrării.

Prin relațiile de calcul, programele de calcul computerizat elaborate, materialul grafic, recomandările și aplicațiile numerice pe care le conține, autorul apreciază că lucrarea va constitui un instrument de interes și mare utilitate la îndemâna cadrelor tehnice de specialitate din domeniu. De asemenea, ea va reprezenta material de referință pentru un cerc larg de ingineri mecanici care activează în sectoarele de cercetare, proiectare, fabricare și exploatare. Lucrarea este dezvoltată de-a lungul a 7 capitole al căror conținut rezumat este prezentat în cele ce urmează.

În capitolul 1 sunt prezentate aspecte generale ale cercetării științifice din domeniul industriei prelucrătoare prin deformare plastică la rece legate de creșterea performanțelor acestora, concomitent cu optimizarea unor procese de

ambutisare plastică la rece utilizând modele numerice de simulare în urma cărora au loc o serie de predicții acoperitoare.

În acest context, prin lucrarea elaborată, autorul a urmărit să-și aducă contribuția, teoretică și practică, la optimizarea modelelor de simulare numerică și a procesului de ambutisare adâncă la rece, care să răspundă dezideratelor de mai sus, urmărind atingerea obiectivelor de cercetare propuse.

În capitolul 2 se prezintă stadiul actual al cercetării în domeniul deformațiilor plastice la rece cu implicații directe asupra procesului de ambutisare adâncă. Acest capitol arată modurile de evoluție a cazurilor actuale de predicție a unor procese de deformare plastică la rece și nu numai, servindu-i autorului ca bază bibliografică solidă.

În conținutul capitolului sunt evidențiate cele mai bune metode de cercetare simulativă numerică și de asemenea condițiile și elementele tehnice ce sunt necesare unui astfel de studiu. Sunt redată soluții concrete atât pentru o gamă variată de tipuri de modele numerice pentru simularea proceselor de deformare plastică la rece, cât și moduri clare de implementare ale acestora în experiment.

Tot în acest capitol mai sunt reliefate, o serie de anumite calități și variante de îmbunătățire a semifabricatelor metalice supuse deformărilor plastice, ca răspuns la prelucrarea datelor din rularea modelelor numerice axate pe deformații plastice la rece.

În capitolul 3 se prezintă forma conceptuală detaliată a unui model numeric dinamic specializat pe ambutisarea adâncă la rece. Are loc examinarea problemei funcție de mărimea nodurilor și a gradului de discretizare a rețelei cristaline a foii de tablă în vederea simulării numerice, și adoptarea din punct de vedere hardware a unui sfert de foaie de tablă. Sunt expuse elementele active de lucru: matrița, poansonul, inelul de reținere sub formă simplificată pentru cazul unei ambutisări adânci la rece, respectiv a foii de tablă supuse ambutisării în secțiunea de construcție a uneltelor de lucru și asamblarea virtuală în secțiunea assembly din program a acestora conform cazului real de ambutisare.

Sunt declarate în modelul numeric entitățile nedeformabile și atribuite elementelor de lucru active, respectiv sunt declarate elementele deformabile și atribuite foii de tablă supusă solicitării de ambutisare. Sunt definite în modelul numeric condițiile de contact între foaia de tablă și elementele active de lucru, apoi crearea pașilor sau fazelor de acțiune pentru poanson și inelul de reținere, respectiv modul de răspuns a foii de tablă în vederea realizării ambutisării conform cazului real.

Sunt realizate condițiile reale de desfășurare ale procesului de ambutisare la rece, cum ar fi: avansul, jocul dintre elementele active de lucru, forțe de strângere a inelului asupra tablei, de înaintare a poansonului, gradul de ecrusare a materialului și calitatea acestuia din curba de tracțiune prelevată și adâncimea finală.

Are loc în continuare definirea elementelor implicite care rezultă în urma simulării prin rularea modelului numeric cu programul Abaqus, apoi crearea modului de răspuns și vizualizare a procesului de ambutisare în cadrul modelului.

În capitolul 4 sunt prezentate o serie de ipoteze simplificatoare cu privire la elementele active de lucru și foaia de tablă, este expus calculul matematic al acțiunii elementelor de lucru asupra tablei de material metalic. Sunt expuse cazurile implicite redată cu ajutorul modelului numeric pentru tensiunile și

deformațiile instantanee, în urma cărora s-au ridicat mai multe grafice de dependență între tensiuni și adâncimea de ambutisare, respectiv între deformații și adâncimea de ambutisare.

Tot în acest capitol au fost redată și cazurile în care ambutisarea nu a putut avea loc, rezultând din rularea modelului fisurarea sau ruperea reperului. Respectiv s-au pus în lumină cazuri de comparație atât pentru tensiunile instantanee cât și pentru deformațiile instantanee, funcție de două grosimi diferite ale aceluiași material al foii de tablă supusă ambutisării, rezultând astfel concluziile aferente studiului.

În capitolul 5 este prezentat proiectul dispozitivului de ambutisare ca parte componentă de bază a standului experimental; este descris standul experimental și componența acestuia, apoi este prezentat experimentul de laborator al ambutisării adânci ținând cont de condițiile din simularea numerică, implementând dispozitivul de ambutisare în cadrul standului experimental pe mașina de tracțiune de 100 tf datorită lipsei unei mașini de ambutisat cu dublă acțiune.

În capitolul 6 este prezentată validarea modelului numeric de simulare și posibilitățile de utilizare a rulării modelului numeric valid prin intermediul unei scheme logice.

În capitolul 7 sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile proprii și elementele de originalitate din teză, respectiv o schemă logică de lucru cu modelul numeric ca modalitate de predicție a tensiunilor și deformațiilor instantanee pentru orice tip de material ambutisabil, orice grosime, orice adâncime de ambutisare pentru una sau mai multe treceri. Sunt prezentate și o serie de perspective de continuare a lucrării de față.

1.2. Obiectivele tezei de doctorat

- 1 Stadiul actual al cercetărilor în cazul ambutisării adânci;
- 2 Crearea unui algoritm informatic în Abaqus varianta 6.8-1 specializat pe evidențierea în regim dinamic a tensiunilor și deformațiilor ce apar în procesul de ambutisare la rece a tablelor;
- 3 Utilizarea algoritmului de simulare numerică în faza de proiectare a procesului tehnologic de ambutisare;
- 4 Determinarea caracteristicilor geometrice, fizice și mecanice reale ale semifabricatului sau a tablei de ambutisat;
- 5 Implicarea algoritmului informatic sau a modelului numeric în determinarea tensiunilor instantanee în regimuri dinamice;
- 6 Implicarea algoritmului informatic sau a modelului numeric în determinarea deformațiilor instantanee în regimuri dinamice;
- 7 Schema logică a itinerarului în implementarea în programul Abaqus 6.8-1 a cazurilor concrete de realizare a diverselor forme de ambutisare și soluțiilor de depășire a blocajelor determinate de erori de implementare;
- 8 Realizarea standului experimental și a elementele de execuție implicate în realizarea experimentului. Validarea modelului numeric și implicații ale acestuia în contribuțiile autorului.

1.3. Programul de cercetare. Etape

1. Studiul teoretic general al proceselor de deformare plastică, (6 luni)
2. Cercetări privind studii de deformare plastică la rece făcute de alți cercetători, (4 luni)
3. Stadiul actual al cercetărilor privind ambutisarea la rece: (4 luni)
 - cercetări experimentale pe modele reale și pe mini-modele,
 - cercetări teoretice statice și în regim dinamic cu modele numerice,
4. Cunoașterea componentelor cu caracter aplicativ, utilizarea și introducerea corectă a datelor pentru rularea modelului și asimilarea completă a noțiunilor de baza a programului Abaqus 6.8-1, (6 luni)
5. Construcția, corecțiile, modificările și eliminările pentru buna funcționare a modelului numeric implementat cu programul Abaqus 6.8-1, (6 luni)
6. Proiectarea și execuția dispozitivului de ambutisare cu dimensiunile și parametrii utilizați în modelul numeric de ambutisare, (2 luni)
7. Cercetări experimentale cu privire la validarea modelului numeric de simulare, (3 luni)
8. Corecții aduse modelului numeric luând în considerare gradul de eroare rezultat din suprapunerea studiilor teoretice cu cele experimentale, (2 luni)
9. Concluzii generale și finale, respectiv elaborarea propriilor contribuții, (3 luni)
10. Tehnoredactarea tezei, corectarea ei, confruntarea cu referenții, corectarea și prezentarea în departament și susținerea publică. (4 luni)

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PRIVIND AMBUSISAREA LA RECE

Obiectivul acestui capitol este acela de a reda studiul actual al cercetărilor în cazul ambusisării adânci și a unor procese care folosesc din punct de vedere numeric elemente de calcul asemănătoare pentru evidențierea tensiunilor și deformațiilor instantanee

2.1. Stadiul actual al cercetărilor numerice în cazul ambusisării adânci

Tehnologia de ambusisare a fost inițiată de englezul Alexander Parker (1813-1890), care în anul 1857 a patentat ambusisarea unei table din cupru iar în anul 1859 în colaborare cu Bessemer, a realizat cu succes ambusisarea unei piese de 11 cm diametru și 10 cm înălțime, dintr-o tablă de oțel de 12 cm diametru și 0.75 mm grosime.

Procesul de ambusisare a fost analizat de diferiți cercetători de-a lungul timpului fie prin experiment fizic, fie prin experiment numeric. Ambusisarea este prelucrarea prin deformare plastică prin care un semifabricat plan este transformat într-o piesă cavă, sau se continuă deformarea unui semifabricat cav. În urma deformării se pot modifica, forma, dimensiunile, cât și grosimea semifabricatului. Prin ambusisare se execută o gamă foarte largă de piese, diferite atât prin forma lor, cât și prin dimensiuni.

În procesul de ambusisare întâlnim foarte multe noțiuni complexe din teoria elasticității cât și cea a plasticității. Toate solicitările întâlnite în procesul de ambusisare nu sunt pur elastice sau pur plastice ci combinate

Spre deosebire de teoria elasticității al cărei istoric numără aproape trei secole, teoria plasticității este o disciplină științifică mai nouă. *Jean Claude Barré de Saint Venant* și *M. Levy* au fost autorii primelor lucrări (1870) referitoare la teoria corpurilor perfect plastice. În următorii 30 de ani interesul a fost infim. Mai târziu se remarcă una dintre lucrările lui *Maximilian Titus Huber* (1878-1950) care în anul 1904 a formulat condiția energetică a plasticității. Aceeași condiție sub o formă puțin diferită a fost propusă de *R. von Misses* (1913) și *H. Hencky* (1924). [33]

Un pas important în teoria plasticității îl reprezintă lucrările lui *A. Nadai* (1930), *L. Prandtl* (1924) și *E. Reuss* (1930), lucrări ce se referă la torsiunea plastică, la geometria liniilor de alunecare pentru starea plană de deformare și la ideea considerării în ecuațiile fundamentale, pe lângă deformațiile plastice și a efectelor elastice. [33]

În zilele noastre simularea numerică cu elemente finite are un impact foarte puternic asupra modului de realizare a proceselor mecanice, termice, electrice și combinații ale acestora, cât mai apropiate de modul de obținere în realitate. Cu ajutorul programelor de simulare numerică și a modelelor numerice bine implementate se pot face predicții tehnice referitoare la modul de desfășurare a procesului respectiv, a produsului finit obținut dacă este conform, deci o piesă finită este bună sau rebut.

Programele folosite acoperă o plajă consistent de mare de necesități tehnice din zilele noastre, însă un lucru important este acuratețea obținută. De aceea

calitatea programului folosit și bineînțeles corectitudinea modelului implementat duc la o predicție, respectiv o simulare cât mai apropiată de realitatea care o oferă experimentul. În multe cazuri experimentul este doar o constatare a predicției stipulate prin simulare și de ce nu, și o verificare a modelului de calcul implementat în simulare. Sunt situații des întâlnite în practică, mai ales în cazul prelucrărilor mecanice la rece, cum e și cazul ambutisării adânci a pieselor cilindrice simple, când doar după mai multe încercări se poate fixa la mașina de ambutisat o serie de parametri tehnici și tehnologici care duc la bun sfârșit procesul de ambutisare, rezultând un produs finit bun. Rolul major al simulării este acela de a pregăti în prealabil acești parametri, fără a mai fi nevoie de încercări reale. Acesta ar fi un aspect din multe altele pe care o oferă această oportunitate.

Ca o definiție mai mult empirică, simularea numerică ar putea fi exprimată ca fiind imitarea procesului mecanic sau termic, sau combinat, la o scară redusă în care se regăsește întreg procesul cu toți factorii de influență și respectiv etapele parcurse pentru finalizarea acestuia.

Ștanțarea este o tehnologie importantă în prelucrarea metalelor din industria auto, aeronautică și alte industrii. În general, tablele metalice se află în formă policristalină. Structura lor este formată din grăunți cu orientări diferite. Textura cristalografică a tablelor metalice, rezultată din re-orientarea rețelei cristaline în timpul deformării plastice, contribuie la formarea lor. Pe baza teoriei plasticității cristalelor, în ultimii ani, au fost făcute progrese considerabile cu privire la modelarea evoluției texturii și a efectelor acesteia asupra deformării plastice a materialelor policristaline.

Oțelurile folosite tot mai des în industria auto în principal datorită avantajului greutateii sunt oțelurile cu duritate mare. Dezavantajul utilizării acestora este ductilitatea scăzută care ridică numeroase probleme de prelucrare. Una dintre ele este așa numita "rupere la forfecare" care se poate observa des la procesul de matrițare la unghiuri mici.

Odată cu apariția conceptelor tradiționale, precum diagrama formării limitei, e imposibil să prevedem asemenea ruperi. Au fost făcute eforturi mari pentru a dezvolta criterii de rupere care să prezică ruperile la forfecare. În această direcție, un criteriu recent dezvoltat la ruperea ductilă este Modified Mohr-Coulomb (MMC). Acesta s-a adoptat pentru analiza ruperii oțelului bifazic la o încercare de întindere-încovoiere.

Ruperea plastică și ductilă la tabla prezentată este pe deplin caracterizată de modelul ortotropic Hill`48 și un model de rupere MMC. Modelele elementului finit cu 3 tipuri de elemente (3d, membrană și efort de suprafață) au fost create pentru testarea unei simulări la întindere. În această testare au fost introduse 4 valori diferite pentru raza ștanței R/t (standardizată de grosimea plăcii).

S-a arătat că simularea cu elemente 3d și membrane poate prezice ruperi locale. De asemenea s-a constatat că deplasările încărcării superioare răspund la fel de bine ca și solicitările peretelui la unghiul de atac al rupturii pentru toate valorile lui R/t. Chiar mai mult, s-au efectuat și s-au cercetat o serie de studii a parametrilor pe: modelul elementului 3D, efectul nivelului tensiunii (prinderii la distanță), frecarea sculei, mărimea discretizării în elemente finite, locul ruperii, modul ruperii și răspunsul la încărcări-deplasări.

Folosirea oțelurilor de duritate mare în industria auto a crescut considerabil în ultimul deceniu datorită potențialului lor de a reduce greutatea mașinii și reducerea costurilor în cazul accidentelor.

Proprietățile mecanice ale acestor oțeluri sunt de obicei modificate de schimbarea microstructurii, în special a volumului de martensită, ceea ce îi dă duritate mare dar ductilitate scăzută.

Deci, cât timp industria continuă să caute duritate mare, formabilitatea oțelurilor de duritate mare este compromisă. S-au ridicat probleme diverse la procesele de prelucrare a oțelurilor de duritate mare.

O problema tipică care s-a văzut în mare măsură la presă este ruperea care se întâlnește la unghiuri mici pentru poanson și raza de ștanțare în procesul de matrițare. Acest tip de rupere este orientată perpendicular pe direcția de întindere în plan. Aceasta expune o mică gătuire locală, prezintă o spărtură în forma de pantă la 45° în grosime, și e așa numită "rupitura la forfecare" în industrie.

Procesul de încovoiere al unei table de metal peste o rază cu tensiune plasată superior este recunoscut ca un mod important de deformare pentru tabla de metal.

Marciniak și Duncan (1992) [84] au analizat problema pentru modele diferite de material, și au dezvoltat un echipament special pentru întinderea-încovoierea unei bucăți de metal cunoscut sub numele de Modified Duncan-Shabel (MDS). Recent, comunitatea a arătat un mare interes pentru această zonă datorită ruperii la forfecare la matrițarea oțelurilor de duritate mare.

Un lucru important în studiul întinderii-încovoierii unei table de metal este inexactitatea măsurărilor, precum Diagrama formării limitei (FLD). Din aceasta cauză, programul care rulează modelul implementat nu poate să prevadă rupturi la forfecare la unghi de strângere mic (Sriram et al., 2003)[114].

Ca urmare s-au depus eforturi mari pentru a găsi o alternativă care să prezică asemenea rupturi.

Pe partea experimentală, Gotoh et al. (1997) [39] a efectuat o serie de încercări la tragere-încovoiere pe Cu-0, și a arătat o tranziție clară de la rupturile la forfecare pe raza ștanței la ruperile extensiilor pe partea peretelui când raportul R/t (raza matriță /poanson la grosimea tablei) crește.

De asemenea, au fost făcute eforturi în industrie pentru a corela ruperile la solicitări cu raportul R/t și astfel se obține raportul empiric R/t pentru rupturi la forfecare la mai multe oțeluri de duritate mare prin efectuare MDS sau teste similare (Sriram et al. 2003 [114]; Walp et al. 2006 [126]; Shih et al. 2008 [116]; Shih 2009 [115] [117]).

Pe partea analitică, Bai and Wierzbicki (2008) [13] au dedus forma apropiată, o soluție pentru răspunsul ambelor forțe globale: efortul local și starea solicitării în cazul testului de întindere-încovoiere MDS, ținând cont de condiția de efort în secțiunea planului.

Issa (2009) [50] a extins soluția lui Bai prin încorporarea legii de călire având în vedere istoria încărcării. Printre puținele lucrări, care conțin simulări numerice, existente în literatura de specialitate, se numără: (Bai and Wierzbicki, 2008 [13]; Kim et al., 2009 [67]; Wagoner et al., 2009 [128]).

Având în vedere inexactitatea diagramei formării limitei, se caută o metodă numerică de încredere pentru prevederea ruperilor în cazul întinderii-încovoierii.

S-a cercetat realizarea unei rupturii ductile, formând o procedură numerică detaliată de la plasticitate la ruptură, și apoi validând modelul prin simularea unei încercări de întindere-încovoieri reale pe o tablă de oțel bifazic.

Cu scopul de a alege un model de rupere ductilă propice pentru problema noastră, e necesară o scurtă trecere în revistă a modelelor existente.

Din punct de vedere microscopic, mecanismul de bază al ruperii ductile este lipsit de interes. În această privință, un volum mare de studii despre ruperea ductilă se concentrează pe relația dintre distorsiunea plastică și micro-golurile lipsă.

În ultimele 4 decenii, s-au ivit numeroase micro-mecanisme bazate pe modele de rupere, a căror apăsare (sau solicitare triaxială η) este un parametru cheie pentru controlul ductilității.

Aceste lucrări includ ambele formulări clasice (McClintock, 1968 [86]; Rice and Tracey, 1969 [108]; Gurson, 1975 [40]; Tvergaard and Needleman, 1984 [122]) și dezvoltări recente (Leblond et al., 1995 [76]; Pardoent and Hutchinson, 2000 [102]; Benzerga et al. 2004 [15]; Nahshon and Hutchinson, 2008 [88]).

Între timp, din punct de vedere macroscopic, fisura produsă de micro-goluri poate fi de asemenea modelată de: solicitarea locală dirijată și componentele de efort. Drept consecință, un grup de fisuri continue a modelelor mecanice s-a dezvoltat sub cadrul termodinamicii (Lemaitre, 1985 [71]; Chaboche, 1988a,b [25], [26]; Voyiadjis and Dorgan, 2007 [123]). Din punct de vedere al industriei, creșterea cererilor pentru simularea numerică a proceselor de formare a tablei de metal și a coliziunii vehiculelor au dus la necesitatea creării unui model de rupere exact, care poate fi ușor calibrat din testele fizice și implementat eficient în codul FE de simulare.

În aparență, cele mai multe dintre modelele de rupere prezentate mai sus nu îndeplinesc această cerință. De exemplu, ca și modelele fizice ale lui Gurson [40] care de obicei au prea mulți coeficienți care trebuie determinați și majoritatea oțelurilor de duritate mare nu sunt poroase. Conceptul „fully-coupled damaged mechanics” nu are o bază fizică solidă în spărtura formării mecanismului, iar disiparea potențială folosită pentru evoluția fisurilor nu e bine stabilită pentru uz practic. Deci, se vede o cerere clară pentru un model care obține o balanță între complexitatea care stă la baza fizicii și simplitatea necesară pentru aplicațiile practice în industrie. Datorită problemei prezentate mai sus, modelele fenomenologice par a fi cele mai potrivite pentru aplicațiile industriale. De obicei e știut faptul că rupturile se produc când ponderea acumulativă echivalentă efortului plastic ajunge la o valoare critică C (Bao and Wierzbicki, 2004 [16]). Bao and Wierzbicki au performat un studiu comparativ pe 8 modele din aceasta clasă, alături de funcția ponderată din McClintock (1968) [86], Rice and Tracey (1969) [108], Leroy et al. (1981) [72], Clift et al. (1990) [27] și criteriul Cockroft și Latham modificat (1968) [28] de Oh et al. (1979) [97].

Ei au analizat aplicabilitatea fiecărui model și au propus o funcție ponderată cu 3 ramuri care lucrează peste o gama largă de solicitări triaxiale η .

În timp ce modelele de rupere ductilă clasică folosesc un singur parametru de stare a solicitării care controlează ductilitatea, recent studiile (Zhang et al. 2001 [137]; Kim et al. 2004 [68]; Coppola et al. 2009 [29]) au arătat că limita rupturii ductile depinde de asemenea de abaterea stării solicitării, reprezentată de parametrul Lode.

Xue (2007 a,b) [130], [131] a introdus parametrul Lode în funcția ponderată și a format un model de rupere ductilă general încorporând efectul celor 3 solicitări invariante în evoluția fisurilor. Recent, Bai și Wierzbicki au obținut o funcție ponderată transformând criteriul la ruperea prin solicitarea Mohr-Coulomb (MMC) în perioada solicitării triaxiale, parametru Lode și efortul echivalent plastic.

Modelul fenomenologic al rupturii ductile rezultat este numit „Modified Mohr-Coulomb” (MMC), care poate prevedea triaxialitatea și dependența unghiului Lode. Acest model este o extensie a criteriul de rupere la forfecare maxim și este bine echilibrat astfel încât poate să prevadă ruptura la forfecare care a fost arătată ca

fiind ruperea majoră a unei table de metal în condiții de diverse încărcări. În plus, criteriul MMC are doar 3 parametri liberi care trebuie să fie calibrați fiind astfel alegerea ideală pentru aplicațiile industriale (Luo și Wierzbicki, 2009 [73]; Li et al. 2010 [74]). În consecință, în acest studiu, rupura MMC este modelul care trebuie ales pentru a capta comportamentul la rupere al oțelului de duritate ridicată la încercarea de întindere - încoviere.

Cele mai multe dintre lucrările privind simularea procesului prelucrării tablelor de metal descriu dependența ratelor de forfecare din sistemele de alunecare. În teoria plasticității cristalelor [99], [100], [4], planurile de alunecare depind de tensiuni și de rezistența la deformare.

Dacă sunt determinate planurile de alunecare, ratele de alunecare pot fi ușor determinate. Nakamachi [89-92] a dezvoltat un program elasto-policristalin de modelare cu element finit, bazat pe un model de rată a vâscoplasticității cristalului și a studiat prelucrabilitatea tablelor de metal cu structură cubică, cu fața centrată (CFC) și cu volum centrat. Anand [3] a dezvoltat un set de ecuații constitutive pentru un singur cristal și pentru materialele policristaline elasto-vâscoplastice, simulând fenomenul de urechere în timpul procesului de ambutisare.

Zhao și Raabe [121], [122], [93] au implementat în ABAQUS un model al ratei de dependență pentru materialele policristaline, simulând procesul de obținere al unei căni. Choi [20] și Li [69] au introdus un model de dependență policristalină în ABAQUS și au studiat evoluția texturii în timpul unui proces de ambutisare. Activitatea planurilor de alunecare în timpul procesului de deformare plastică nu poate fi determinată doar pe baza legii lui Schmid. Pentru a obține o soluție unică, sunt necesare unele ipoteze suplimentare pentru a determina dacă un plan de alunecare este activ sau nu.

Knockaert [59] a rezolvat problema apariției planurilor de alunecare prin metoda pseudo-inversiunii. Schmidt-Baldassari [110] a propus un algoritm de integrare pe baza principiului de disipare a energiei din materialul plastic. Miehe și

Schotte [77], [78] au îmbunătățit algoritmul de determinare a plasticității multiplicative pentru materialele monocristaline și policristaline, aplicându-l cu succes pentru a anticipa apariția fisurilor într-un proces de ambutisare. O soluție alternativă a fost dezvoltată de Takahashi [118], [119], [120].

El a propus o metodă de integrare succesivă astfel că, în cazul în care tensiunea de forfecare obținută într-un plan de alunecare este mai mare decât tensiunea limită, tensiunea obținută în acest plan de alunecare este acumulată. Această abordare nu necesită determinarea în prealabil a planurilor de alunecare active / non-active. Această metodă este asemănătoare cu modelul de dependență a plasticității cristalelor și poate eluda problema nedeterminării ratei de independență din teoria plasticității cristalelor. În studiul de față, o rată independentă de plasticitate a modelului de cristal și un element de membrană sunt determinate cu ajutorul metodei elementelor finite. Metoda integrării succesive propusă de Takahashi [118], [119], [120]. este utilizată pentru a calcula ratele de forfecare din planurile de alunecare.

Orientările cristalelor sunt determinate din funcția de distribuție (ODF) și integrate cu ajutorul metodei cu element finit.

S-a realizat un model elasto-plastic pentru a simula procesele de ștanțare a tablelor de aluminiu cu ajutorul unor poansoane cu formă cilindrică și pătrată. Pentru validarea metodei de simulare propuse, rezultatele calculului simulate sunt comparate cu cele obținute experimental.

Producția unor produse de înaltă calitate, într-un timp scurt și la un cost redus, reprezintă un obiectiv final în producție. Pentru a atinge acest obiectiv, sunt

realizate progrese continue în domeniul proiectării în atelierele de producție. Etapele de cercetare și dezvoltare în CAD/CAM/CAE, în raport cu analiza și proiectarea unor piese, pot fi observate în mai multe lucrări publicate în cadrul unor congrese internaționale [42],[11],[51].

Pentru a evita erorile din timpul procesului de fabricație sau defectele (fisuri, cute), simularea procesului de ambutisare este tot mai des utilizată în industrie. Cercetările sunt îndreptate către îmbunătățirea metodelor cu element finit pentru analiza proceselor de obținere a produselor, atunci când condițiile de formare sunt definite.

Metodele de simulare cu element finit sunt bazate pe elemente solide, luând în considerare solicitările statice sau dinamice. Aceste instrumente de analiză pot fi foarte precise dacă sunt folosite de ingineri bine pregătiți, dar sunt consumatoare de timp și necesită resurse costisitoare. Acestea pot fi foarte atractive și utile în procesul de obținere a produselor finale, de exemplu pentru a defini dimensiunile inițiale (grosime, contur și suprafață), unii parametri de proces (condițiile la limită, forțele de exploatație, condițiile de ungere, tipurile de poziții, etc.) și proprietățile materialului (limita de curgere, duritatea, anizotropia, etc.). Acest lucru a fost recunoscut de centrele de cercetare industrială și academică.

Prin urmare, o serie de metode au fost dezvoltate în ultimele decenii. Acestea se bazează în principal pe faptul că forma dorită este cunoscută. Apoi este realizată o comparație pentru a estima deformarea produsului final, luând în considerare ecuații constitutive simple și ipoteze cu privire la influența sculelor de lucru. Aceste proceduri simplificate pot fi: "metoda de cartografiere geometrică [52]," formări simple și mai multe etape de ambutisare "[60]," un singur set de soluții [79], teoria formării ideale " [61], "metoda inversă "(IA) [53], [54], [132], [43], [93] și" metoda simplificării "[129].

Metoda inversă se bazează pe discretizarea piesei finale, prin împărțirea piesei în elemente triunghiulare în plan. Pentru un număr mare de aplicații industriale, efectele membranei sunt dominante, fiind necesar să se ia în considerare și efectele solicitării de încovoiere, folosind un element simplu Kirchhoff [35], [55], [34]. Au fost făcute ipotezele în ceea ce privește acțiunea sculelor (ștanță, poanson) la sfârșitul procesului de formare. Au fost luate în considerare tensiunile și deformarea totală de plasticitate. Acest lucru conduce la un set de ecuații neliniare. Aceste ecuații pot fi rezolvate prin intermediul relaxării dinamice sau prin algoritmul dinamic.

Pot fi întâlnite dificultăți de convergență în situații practice care presupun ambutisarea adâncă (cu pereți aproape verticali) și un nivel scăzut de plasticitate. S-a realizat un model simplificat pentru a estima o parte din fisurarea piesei în timpul ambutisării pentru o formă dată, plată sau curbată. Metoda inversă a fost evaluată continuu prin compararea rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale, obținute prin metode elementare. Această metodă este foarte eficientă și destul de precisă în faza preliminară de proiectare. Metoda inversă a fost combinată cu tehnici matematice de programare pentru proiectarea optimă a pieselor 3D.

Spre exemplu în forjare, materialul este deformat plastic între două sau mai multe matrițe, astfel încât să-i dea forma și dimensiunea dorită. În procesul de forjare liberă, înălțimea piesei este redusă prin comprimarea între două poansoane plate, numite plăci de contact. În cazul forjării, când reperul se obține prin închiderea completă a părților active, forma dorită a piesei este obținută prin utilizarea matrițelor. Acest tip de forjare este considerat ca fiind cea mai simplă metodă de forjare. Probleme apărute în cazul acestui procedeu sunt similare cu cele

des apărute în cazul solicitării de compresiune întâlnit la ambutisare. Cu toate acestea, în cele două cazuri există diferențe semnificative între stările de deformare și tensiune. În cazul forjării libere, frecarea la interfața dintre matriță-piesă de lucru determină o ne-uniformitate a procesului de deformare, precum și a distribuției tensiunii. Procesul de forjare a fost analizat prin metoda semifabricatelor [2], metoda alunecării [44], [36], precum și prin metoda limitei superioare [62], [6], în principal pentru a determina modul de distribuție al presiunii de contact. Cu toate acestea, pentru determinarea detaliată a deformării și a câmpurilor de tensiune, a fost utilizată metoda elementului finit (FEM).

Aplicațiile FEM pentru rezolvarea problemelor ce apar în cadrul procesului de forjare s-au bazat pe metoda incrementală propusă de Lee și Kobayashi [75]. Metoda folosește matricea elastic-plastic / efort-deformație ca și în cazul ambutisării și este bazată pe ecuațiile Prandtl-Reuss. Chiar dacă matricea efort-deformație și geometria sunt actualizate după fiecare pas, sunt utilizate numai ecuațiile liniarizate elementare. Frecarea la interfață este modelată cu ajutorul factorului de frecare, prin introducerea unui coeficient de viteză. Această metodă a fost aplicată în cazul unui cilindru solid [111], inel de compresie [21] și pentru estimarea defectelor ce pot să apară [94]. Întrucât Lee și Kobayashi [75] au utilizat viteza ca element necunoscut, Hartley et al. [45, 46] au propus o metodă incrementală utilizând deplasarea elementară ca element necunoscut. Ei au folosit numai ecuațiile liniarizate elementare și au îmbunătățit matricea efort-deformație și geometria după fiecare pas.

În formularea lor, factorul de frecare este încorporat prin metoda de rigiditate beta [45]. Shima et al. [112] au utilizat ecuația constitutivă plastic / rigid, bazată pe teoria plasticității metalelor poroase și pe modelul de frecare Coulomb, pentru a studia refularea unui cilindru circular, validând experimental rezultatele. Metoda elementului finit, care implică măsurarea tensiunilor, a fost dezvoltată de către Kobayashi et al. [63], Rowe et al. [106] și Hartley et al. [47].

Metoda propusă de Scalda et al. [12], care implică rezolvarea ecuațiilor non liniare elementare printr-un sistem iterativ, precum metoda Newton-Raphson, a fost aplicată (cu sau fără luarea în calcul a efectelor elastice) la problemele axi-simetrice din cadrul procesului de forjare de către Dadrás și Thomas [32] și Carter și Lee [22]. Toate aceste metode se bazează pe ecuațiile non-liniare incrementale. Michel și Boyer [82] au efectuat analiza elasto-vâscoplastică cu element finit a unui proces de forjare la rece și au validat rezultatele prin măsurarea tensiunilor reziduale într-un proces de găurire. Aceștia au măsurat și au calculat variațiile tensiunilor reziduale la capătul plat al cilindrului.

Au folosit modelul factorului de frecare pentru a determina frecarea interfacială. Zhao et al. [136] au folosit simularea cu element finit pentru a proiecta preforme în procesele de forjare. Joun et al. [56] au propus o tehnică de simulare cu element finit a procesului de forjare cu o matriță cu arc atașat poansonului. Această metodă controlează fluxul de metal astfel încât defectele sunt înlăturate și este îmbunătățită calitatea produselor. Kim et al. [64] au aplicat metoda rigid-vâscoplastică cu elemente finite în cazul forjării la rece a unui aliaj de aluminiu pentru a studia ruperile ductile. Pentru a prezice ruperea, a fost folosit criteriul Cockcroft și Latham. Yang et al. [133] au dezvoltat un sistem inteligent al metodologiei de proiectare completă a procesului de forjare prin integrarea FEM cu sisteme expert și proiectarea asistată de calculator (CAD).

Gupta et al. [37] au determinat ruperile în procesele de forjare axi-simetrice folosind criteriul tensiunii hidrostatice, precum și valoarea critică a parametrului

ruperii. Modelul este evaluat cu ajutorul ruperii continue din teoria mecanicii. Mungi et al. [81] au studiat tensiunile remanente în procesul de forjare axisimetrică.

În cazul tehnologiei de ambutisare adâncă, piesa sub forma unei foi, alunecă între matriță și inelul de reținere. De obicei, este utilizat un suport pentru a preveni orice ridare care ar putea avea loc în flanșă. Procesul este realizat fără suport numai dacă nu există nici o posibilitate de ridare, și anume, fie foaie este groasă sau deformarea este mică.

În regiunea flanșei (de exemplu, pe suprafața matriței), materialul este comprimat pe direcția tangențială și întins pe direcția radială. Astfel, distribuțiile deformării și tensiunii sunt destul de complexe. Având în vedere că procesul de ambutisare adâncă implică o deformare complexă, procesul complet nu a fost analizat prin tehnici simple, cum ar fi: metoda simplă, metoda plăcii superioare sau metoda liniilor de alunecare. Numai analiza regiunii flanșei a fost realizată folosind tehnici simple [57], [23].

În simularea proceselor de prelucrare a tablelor de metal, au fost propuse mai multe modele 3D cu element finit, cum ar fi: membrane și membrane cu solide. Modelul membrane este cel mai simplu. Toh și Kobayashi [121] au folosit această metodă pentru a determina forma optimă în procesul de ambutisare a unei cutii pătrate. Ei au folosit ca element finit pro formulare sau valoare a deformației sau a deplasării unuia din elementele active de lucru, neaplicând forța de apăsare pe inelul de reținere. Saran și Samuelsson [113] au modelat comportamentul materialelor foi de tablă prin elemente triunghiulare. Ei au folosit modelul hipoeastic/vâscoplastic cu criteriul anizotrop al lui Hill, legea de variație a forței și modificarea în timp a deformației. Majlessi și Lee [82] au utilizat de asemenea, elemente de membrană pentru a analiza procesul de ambutisare nonaxisimetric. Modelul membrană neglijează variația tensiunii pe grosime. Ca urmare, acest model nu poate fi utilizat în cazul procesului de ambutisare adâncă, unde deformarea prin compresiune este semnificativă. Onate și Saracibar [95] au utilizat elemente cu consistență vâscoasă și au propus o metodă cu element finit pentru prelucrarea tablelor de metal. În modelul membrană, numai suprafața de mijloc a foi este considerată ca fiind domeniu de lucru. În acest caz, devine dificilă luarea în considerare a condițiilor de contact la interfața poansonului și a matriței cu foaia de metal deoarece aceste condiții se aplică la suprafețele exterioare ale foi.

Condițiile de contact pot fi mai ușor simulate folosind modelul solid. Menezes și Teodosiu [83] au utilizat opt elemente solide pentru a simula procesul de ambutisare. Metoda lor se bazează pe metoda Lagrangiana, tensorul de tensiuni, rata Jaumann și Green-Lagrange. Aceștia au raportat că deformarea obținută folosind elemente solide este mult mai aproape de cea reală. În plus, numărul de elemente necesare pentru a obține un rezultat realist este mai mic utilizând modelul 3-D decât modelul membrană. Colgan și Monaghan [24] au utilizat programul AutoForm FEA (care utilizează elemente solide), pentru a modela procesul de proiectare al unei căni. Ei au încercat să determine cei mai importanți factori care influențează procesul de proiectare, utilizând experimente și analize statistice.

Principalele defecte care apar în timpul procesului de ambutisare adâncă sunt reprezentate de cutarea flanșelor și de subțierea și ruperea pereților. În multe cazuri, este posibilă eliminarea acestor defecte prin alegerea adecvată a forței care controlează fluxul de material în cavitatea matriței. Osakada et al. [96] au propus un algoritm de control în programul FEM pentru a determina forța optimă necesară procesului, astfel încât să se evite ridarea și subțierea tablei de metal. Lorenzo et al. [70] au sugerat un control în buclă închisă, sistem bazat pe logica fuzzy, care este interfața cu un cod de FEM. Sistemul de control monitorizează continuu parametrii

relevanți procesului de ajustare și determină valoarea optimă a forței, astfel încât să se obțină o înălțime maximă, fără apariția cutelor sau fisurilor. Atunci când tabla de metal este anizotropă, forma finală nu este uniformă. Acest fenomen este numit „urechere”. Determinarea formei martor optime este o parte importantă a proiectării inițiale. Există diverse tehnici pentru a obține forma inițială optimă. Dintre acestea, abordarea inversă este o metodă care localizează pozițiile punctelor de material din forma inițială la pozițiile lor corespunzătoare produsului final. Guo et al. [38] au propus această metodă pentru a evalua tensiunile plastice în cazul procesului de ambutisare. Aceștia au folosit teoria deformării plastice.

Kim și Huh [65] au aplicat metoda inversă a procesului de ambutisare în mai multe etape, pentru a determina forma optimă inițială, ca în final să se obțină forma dorită. Ku et al. [66] au aplicat algoritmul metodei inverse a procesului de ambutisare în elemente 3D solide. Pegada et al. [101] au utilizat pachetul LS-DYNA aplicând algoritmul de urmărire înapoi pentru a obține forma optimă inițială. În procesul de ambutisare piesa de lucru în forma unei foi de tablă este forțată într-o matriță cu ajutorul unui poanson pentru a forma o componentă tubulară. De regula suportul de prindere a tablei este folosit pentru a preveni orice cutare a tablei din flanșă. Procesul este realizat fără dispozitivul de prindere numai în cazul în care nu este nici o posibilitate de ridare sau tabla este groasă sau deformarea este mică. În acest proces materialul se îndoaie peste poanson și razele matriței, se lungeste între contactul cu poansonul și contactul cu matrița și este tras peste suprafața matriței. În regiunea flanșei (peste suprafața matriței), materialul este comprimat tangențial și întins în direcție radială. Încercarea de încovoiere cu întindere – prin care o bandă de tablă este îndoită după o suprafață cilindrică și supusă în același timp la întindere – reprezintă modalitatea prin care de-a lungul anilor s-au reprodus în laborator condițiile de la raza matriței (Ranta-Eskola et al., 1982 [109]).

Literatura de specialitate conține numeroase investigații experimentale referitoare la degradarea suprafeței în zona razei matriței după operații de încovoiere cu întindere repetate sau continue.

De exemplu, în două studii independente (Mortensen et al. (1994) [87], Hortig and Schmoeckel (2001) [49] and Attaf et al. (2002) [5]), cu condiții de încercare și materiale diferite, s-au observat degradări ale suprafeței la raza matriței localizate în două regiuni. Examinări mai detaliate ale suprafețelor degradate din zona razei matriței, prin măsurarea durității suprafețelor (Christiansen and De Chiffre, 1997 [30]), determinarea adâncimii uzurii respectiv prin analiza cu microscop electronic (Boher et al., 2005) [17], au confirmat la rândul lor existența unor zone similare de uzură locală.

În completarea analizelor experimentale, în cadrul studiilor amintite (Mortensen et al. (1994) [87], Hortig and Schmoeckel (2001) [49] Attaf et al. (2002) [5]) s-a efectuat și câte o simulare cu elemente finite a procesului de încovoiere cu întindere. În toate cazurile, simulările cu elemente finite au prezis existența unor vârfuri distincte ale presiunii de contact pe raza matriței, fiind totodată în bune corelații cu zonele de degradare observate. Folosind senzori in situ, unii cercetători (Hanaki and Kato (1984) [48] Coubrough et al. (2002) [31]) au demonstrat pe cale experimentală că, pe parcursul încercării de încovoiere cu întindere, există vârfuri similare ale presiunii de contact în anumite locații pe raza matriței, aflate în vecinătatea zonelor de intrare și ieșire a foi de tablă și respectiv din matriță. Cu toate că au luat în considerare o gamă largă de materiale pentru matriță (acoperite și neacoperite), condițiile de lubrifiere, duritatea suprafețelor, gradul de încovoiere și materialul semifabricatului, în fiecare dintre studiile amintite

s-au găsit distribuții similare ale presiunii de contact, etalând două vârfuri caracteristice, respectiv zone localizate de-a lungul razei matriței unde s-a constatat uzura suprafeței. Aceste rezultate, respectiv relația matematică dintre uzură și forța de apăsare în cazul contactelor alunecătoare, indică importanța primară pe care o are presiunea de contact în determinarea gradului de uzură.

Condițiile de contact pe parcursul procesului de ambutisare a tablelor nu au fost atât de intens studiate pe cât cele ce apar pe parcursul încercării de încovoiere cu întindere. În urma unor simulări cu elemente finite a proceselor de ambutisare adâncă axisimetrică, unii cercetători (Mortensen et al. (1994) [87] and Jensen et al. (1998) [58]) au identificat condiții de contact dependente de timp pe raza matriței, față de condițiile staționare ((Hortig and Schmoeckel, 2001) [49]) în cazul încercării de încovoiere cu întindere. Unele studii numerice recente (Pereira et al. (2007, 2008) [103], [104]) asupra procesului de ambutisare ale unor profile, au scos de asemenea în evidență caracterul dependent de timp al condițiilor de contact. S-a constatat că apar condiții complexe de contact în zona razei matriței, manifestându-se prin zone cu presiuni mari de contact puternic localizate. În studii recente (Pereira et al. (2007, 2008) [103], [104]) s-a utilizat analiza cu elemente finite pentru determinarea presiunii de contact din zona cu rază a unei matrițe în decursul unui proces de ambutisare profiluri. O tablă de oțel de înaltă rezistență, având grosimea de 2 mm a fost ambutisată folosind o matriță cu raza R5 mm ($R/t = 2.5$), cu o cursă a poansonului de 50 mm. Evoluția presiunii de contact a fost reprezentată la trei momente în Figura 2.1.

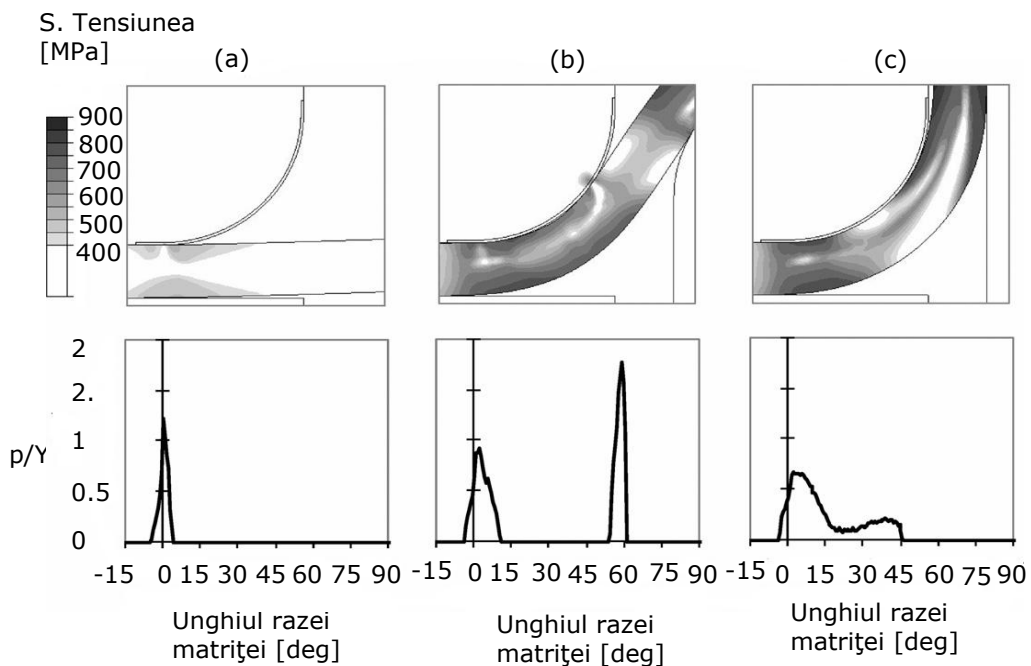


Figura 2.1. Contururi ale tensiunii echivalente și distribuțiile normalizate ale presiunii de contact determinate prin analiză cu elemente finite pentru cele trei etape distincte ale unui proces de ambutisare. Regiunile având culoarea albă în conturile von Mises indică valori ale tensiunilor sub limita de curgere a semifabricatului.

În această figură presiunea de contact p este normalizată cu constanta Y , care poate fi considerată drept tensiunea de curgere a materialului semifabricatului, dacă se adoptă o comportare perfect plastică a materialului (Marciniak et al. (2002) [73]). Drept urmare, utilizarea presiunii de contact normalizate permite o comparare mai bună între o analiză care consideră un material care se întărește considerabil la deformare (figura 2.1) și analiza unui material care nu are această proprietate.

Rezultatele lui Pereira et al. (2007, 2008) [103], [104] confirmă faptul că primele două etape ale procesului de ambutisare cauzează cele mai mari și localizate presiuni de contact (figura 2.1). Prezintă că în zonele unde contactul este liniar, vârfurile presiunii de contact depășesc cu mult valoarea lui Y .

Mai exact, valoarea maximă a presiunii de contact s-a identificat în etapa intermediară, fiind aproximativ de 3 ori mai mare decât limita de curgere inițială a materialului (Pereira et al., 2008).

Analiza reprezentărilor tensiunii echivalente von Mises din figura 2.1 confirmă ipoteza plasticității împiedicate în zonele cu contact liniar, datorită zonelor localizate cu presiune de contact mare și tensiuni hidrostatice de compresiune mari.

Rezultatele din figura 2.1c confirmă ipoteza că presiunea de contact este redusă semnificativ în etapa stabilă, amplitudinea presiunii fiind sub Y datorită zonei de contact mai extinse. Rezultatele analizelor cu elemente finite mai arată că unghiurile maxime de contact dintre semifabricat și raza matriței, în etapele intermediară și stabilă, sunt de aproximativ 80° respectiv 45° (Pereira et al., 2008) [104]. Acest fapt confirmă existența zonei de contact exclusiv intermediar, corespunzător zonei dintre $45^\circ < \theta \leq 80^\circ$, pentru cazul analizat.

Rezultate selectate ale analizei cu elemente finite sunt prezentate în figura 2.1, unde este pus în evidență caracterul dinamic al distribuției presiunii de contact. Mai mult, reprezentarea tensiunii echivalente von Mises arată deformațiile corespunzătoare ale semifabricatului și indică zonele unde apare curgerea. Din graficele p/Y în funcție de unghiul de pliere a tablei după raza matriței se pot observa palierele de curgere a materialului tablei, paliere care se observă pe graficele din figura 2.1 ca fiind palierele în care graficul coboară spre 0 și părțile cu tensiune aproape nulă. Spre exemplu, pentru primul grafic începând de la o înclinare a plierii tablei puțin peste 0 grade și max. 5 grade, apoi pentru graficul 2 14-48 grade și 60-90 grade iar pentru graficul 3 de la 45-90 grade își face apariția curgerea.

Cu toate că studiile efectuate în această direcție pun în evidență caracterul dependent de timp al condițiilor de contact, nu se dă o explicație pentru apariția acestui caracter. Analiza amănunțită a acestui aspect nu se găsește în literatura de specialitate.

2.2. Concluzii

Ruperea plastică și ductilă la o tablă este pe deplin caracterizată de modelul ortotrop Hill`48 și un model de rupere MMC. Modelele elementului finit cu 3 tipuri de elemente (3d, membrană și efort de suprafață) au fost create pentru testarea unei simulări la întindere. În această testare au fost introduse 4 valori diferite pentru raza stației R/t (standardizată de grosimea plăcii).

S-a arătat că simularea cu elemente 3d și membrane poate prezice ruperi locale. De asemenea s-a constatat că deplasările încărcării superioare răspund la fel de bine ca și solicitările peretelui la unghiul de atac al rupturii pentru toate valorile lui R/t . Chiar mai mult, s-au efectuat și s-au cercetat o serie de studii a parametrilor

pe: modelul elementului 3D, efectul nivelului tensiunii (prinderii la distanță), frecarea sculei, mărirea discretizării în elemente finite, locul rupei, modul rupei și răspunsul la încărcări-deplasări.

Din punct de vedere al industriei, creșterea cererilor pentru simularea numerică a proceselor de formare a tablei de metal și a coliziunii vehiculelor au dus la necesitatea creării unui model de rupere exact, care poate fi ușor calibrat din testele fizice și implementat eficient în codul FE de simulare.

Deci, se vede o cerere clară pentru un model care obține o balanță între complexitatea care stă la baza fizicii și simplitatea necesară pentru aplicațiile practice în industrie. Datorită problemei prezentate mai sus, modelele fenomenologice par a fi cele mai potrivite pentru aplicațiile industriale. De obicei e știut faptul că rupturile se produc când ponderea acumulativă echivalentă efortului plastic ajunge la o valoare critică C (Bao and Wierzbicki, 2004 [16]). Bao and Wierzbicki au performat un studiu comparativ pe 8 modele din aceasta clasă, alături de funcția ponderată din McClintock (1968) [86], Rice and Tracey (1969) [108], Leroy et al. (1981) [72], Clift et al. (1990) [27] și criteriul Cockroft și Latham modificat (1968) [28] de Oh et al. (1979) [97].

Ei au analizat aplicabilitatea fiecărui model și au propus o funcție ponderată cu 3 ramuri care lucrează peste o gamă largă de solicitări triaxiale η .

În timp ce modelele de rupere ductilă clasică folosesc un singur parametru de stare a solicitării care controlează ductilitatea, recent studiile (Zhang et al. 2001 [148]; Kim et al. 2004 [68]; Coppola et al. 2009 [29]) au arătat că limita rupturii ductile depinde de asemenea de abaterea stării solicitării, reprezentată de parametrul Lode.

Xue (2007 a,b) [130], [131] a introdus parametrul Lode în funcția ponderată și a format un model de rupere ductilă general încorporând efectul celor 3 solicitări invariante în evoluția fisurilor. Recent, Bai și Wierzbicki au obținut o funcție ponderată transformând criteriul la ruperea prin solicitarea Mohr-Coulomb (MMC) în perioada solicitării triaxiale, parametrul Lode și efortul echivalent plastic Modelul fenomenologic al rupturii ductile rezultat este numit "Modified Mohr-Coulomb" (MMC), care poate prevedea triaxialitatea și dependența unghiului Lode.

Cele mai multe dintre lucrările privind simularea procesului prelucrării tablelor de metal descriu dependența ratelor de forfecare din sistemele de alunecare Zhao și Raabe [134], [135], [136] au implementat în ABAQUS un model al ratei de dependență pentru materialele policristaline, simulând procesul de obținere al unei căni. Pentru a evita erorile din timpul procesului de fabricație sau defectele (fisuri, cute), simularea procesului de ambutisare este tot mai des utilizată în industrie. Cercetările sunt îndreptate către îmbunătățirea metodelor cu element finit pentru analiza proceselor de obținere a produselor, atunci când condițiile de formare sunt definite. Prin urmare, o serie de metode au fost dezvoltate în ultimele decenii. Acestea se bazează în principal pe faptul că forma dorită este cunoscută. Apoi este realizată o comparație pentru a estima deformarea produsului final, luând în considerare ecuații constitutive simple și ipoteze cu privire la influența sculelor de lucru. Aceste proceduri simplificate pot fi: "metoda de cartografiere geometrică [52]," formări simple și mai multe etape de ambutisare "[60]," un singur set de soluții [79], teoria formării ideale [61], "metoda inversă" (IA) [53], [54], [131], [43], [93] și "metoda simplificării" [129].

Pot fi întâlnite dificultăți de convergență în situații practice care presupun ambutisarea adâncă (cu pereți aproape verticali) și un nivel scăzut de plasticitate. S-a realizat un model simplificat pentru a estima o parte din fisurarea piesei în timpul ambutisării pentru o formă dată, plată sau curbată. Metoda inversă a fost

evaluată continuu prin compararea rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale, obținute prin metode elementare. Această metodă este foarte eficientă și destul de precisă în faza preliminară de proiectare. Metoda inversă a fost combinată cu tehnici matematice de programare pentru proiectarea optimă a pieselor 3D. Literatura de specialitate conține numeroase investigații experimentale referitoare la degradarea suprafeței în zona razei matriței după operații de încovoiere cu întindere repetate sau continue.

De exemplu, în două studii independente (Mortensen et al. (1994) [87], Hortig and Schmoeckel (2001) [49] and Attaf et al. (2002) [5]), cu condiții de încercare și materiale diferite, s-au observat degradări ale suprafeței la raza matriței localizate în două regiuni. Examinări mai detaliate ale suprafețelor degradate din zona razei matriței, prin măsurarea durității suprafețelor (Christiansen and De Chiffre, 1997 [30]), determinarea adâncimii uzurii respectiv prin analiza cu microscop electronic (Boher et al., 2005) [17], au confirmat la rândul lor existența unor zone similare de uzură locală.

În completarea analizelor experimentale, în cadrul studiilor amintite (Mortensen et al. (1994) [87], Hortig and Schmoeckel (2001) [49] Attaf et al. (2002) [5]) s-a efectuat și câte o simulare cu elemente finite a procesului de încovoiere cu întindere. În toate cazurile, simulările cu elemente finite au prezis existența unor vârfuri distincte ale presiunii de contact pe raza matriței, fiind totodată în bune corelații cu zonele de degradare observate

Acest model este o extensie a criteriului de rupere la forfecare maxim și este bine echilibrat încât poate să prevadă ruperea la forfecare care a fost arătată ca fiind ruperea majoră a unei table de metal în condiții de diverse încărcări. În plus, criteriul MMC are doar 3 parametri liberi care trebuie să fie calibrați fiind astfel alegerea ideală pentru aplicațiile industriale (Luo și Wierzbicki, 2009 [73]; Li et al. 2010 [74]). În consecință, în acest studiu, ruperea MMC este modelul care trebuie ales pentru a capta comportamentul la rupere al oțelului de duritate ridicată la încercarea de întindere - încovoiere.

3. CREAREA ALGORITMULUI INFORMATIC PENTRU AMBUTISARE ÎN ABAQUS 6.8-1

Obiectivul acestui capitol îl reprezintă crearea unui algoritm informatic în Abaqus varianta 6.8-1, specializat pe evidențierea în regim dinamic a tensiunilor și deformațiilor ce apar în procesul de ambutisare la rece a tablelor. (a se folosi la crearea modelului)

3.1. Modelul numeric implementat pentru simularea procesului de ambutisare

Programul în care am rulat modelul este Abaqus varianta 6.8-1. Programul prezintă mai multe secțiuni sau etape prin care o simulare trebuie să treacă. În primul rând programul poate determina teoretic foarte multe date legate de rezistența materialelor, respectiv legate de mecanica și statica sau dinamica unui reper din cadrul unui proces bine determinat, fie de acțiunea unor evenimente asupra unui singur element solitar sau încadrat într-un studiu de caz.

3.1.1. Secțiunile de rulare a modelului cu ajutorul programului Abaqus 6.8-1

Secțiunile sau etapele pe care trebuie să le urmeze un reper pentru a i se putea determina teoretic o mulțime de variabile din punct de vedere al rezistenței materialelor și din punctul de vedere al mecanicii statice și dinamice, sunt foarte bine determinate și presupun realizarea unui model de simulare care să respecte cerințele programului pas cu pas. Modelul numeric implementat pentru o simulare numerică nu este altceva decât adaptarea din punctul de vedere al cerințelor programului de simulare ca și etape de parcurs a desfășurării unor procese sau a unor acțiuni așa cum au loc ele în timp real. Modelele de simulare de obicei pot fi statice sau dinamice.

Modelele statice de simulare tratează modul de răspuns al unui reper fără ca reperul să aibă vreo mișcare impusă de un proces și acțiunile ce se exercită asupra reperului au o valoare setată în prealabil care în timp nu se mai modifică.

Modelele dinamice de simulare tratează modul de răspuns al unui reper cu condiția ca reperul să aibă o mișcare impusă de un proces și acțiunile ce se exercită asupra reperului au o valoare setată în prealabil care în timp se modifică, doar la sfârșitul procesului respectiv a acțiunii este setată o valoare terminus.

De precizat faptul că în cadrul unui proces de simulare dinamic întră majoritatea proceselor active în care fie se obțin repere noi fie au loc retezări sau decupări fie mișcările reperului supus acțiunilor din timp real nu sunt limitate de o valoare fixă setată sau fie mișcare este una repetitivă în care reperul preia noi poziții în timp

Programul Abaqus acționează pe două direcții mari: Model (Model) și Results (Rezultate) figura 3.1:

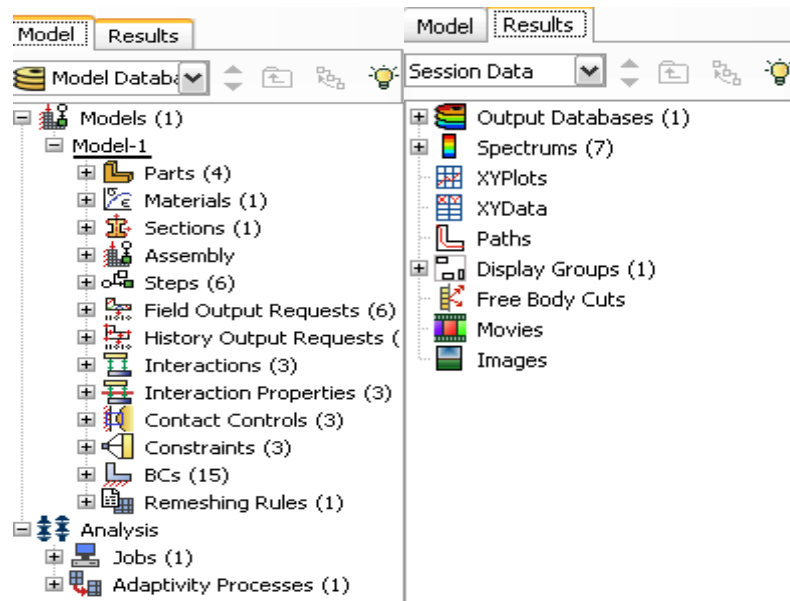


Figura 3.1. Căile de lucru ale programului Abaqus Model și Results

După cum le și spune numele, Model este direcția în care se realizează modelul propriu-zis iar Results este direcția care servește la prelucrarea datelor obținute din rularea modelului și la vizualizarea rezultatelor obținute prin rulare. Ca și descriere din punct de vedere al interfeței programului aceasta este o altă direcție care nu corespunde cu direcția de cercetare și nu intru în amănunte.

Etapele programului Abaqus prin care modelul trebuie trecut (rulat) și să respecte condițiile tehnice impuse de program sunt în număr de 17 etape sau pași. Dintre acești 17 pași există un număr de 9 secțiuni sau pași de lucru ai programului care sunt secțiunile efective de lucru a programului cu modelul ce trebuie implementat. Aceste 9 secțiuni sunt redată mai jos (din cele 17 secțiuni mari): Parts, Property, Assembly, Steps, Interactions, Load, Mesch, Jobs, Vizualization.

Etapele care trebuie parcurse în mod obligatoriu la realizarea modelului sunt: Parts, Materials, Sections, Assembly, Steps, Field Output Requests, History Output Requests, Interactions, Interactions Properties, Contact Controls, Constraints, Load, Mesch, BCs, Remesching Rules, Jobs, Vizualization o parte din acestea se pot vedea și în figura 3.1 partea de model. Înainte de a trece efectiv la prima etapă de realizare a modelului vom face niște explicații a unor termeni cu care ne vom întâlni pe parcursul realizării modelului.

Part - este secțiunea din program care se ocupă cu crearea elementelor 3D, sau 2D, sau suprafețe, în vederea realizării simulării.

Property - este secțiunea din program care se ocupă cu crearea materialului din care sunt alcătuite elemente 3D sau 2D sau suprafețe în vederea realizării simulării și respectiv în această secțiune se pot realiza și impune materialului o serie de caracteristici de rezistență mecanică elastică și plastică, respectiv o serie de acțiuni impuse de procesele și acțiunile supuse simulării.

Assembly - este secțiunea din program care se ocupă cu poziționarea și asamblarea din punct de vedere tehnic a elementelor 3D sau 2D create în secțiunea

Part, astfel încât să servească la desfășurarea simulării în condiții optime și corecte din punct de vedere a funcționalității procesului supus simulării.

Step - este secțiunea din program care se ocupă cu transpunerea la crearea unui model de simulare a unor succesiuni de evenimente care trebuie să fie conforme cu succesiunea evenimentelor și acțiunilor care se petrec pentru un proces sau acțiune care urmează a fi simulate.

Interaction - este secțiunea din program care se ocupă cu transpunerea la crearea unui model de simulare a unor interacțiuni contacte diferite restricții respectiv implicații în model ale elementelor active și pasive ale unui proces, zone de apăsare, respectiv impuneri de acțiuni asupra elementelor 3D sau 2D create conforme cu procesul ce se pretează a fi studiat.

Load - este secțiunea din program care se ocupă cu transpunerea la crearea unui model de simulare a unor încărcări cu forțe sau a unor încărcări cu forțe rezultate din deplasări ale elementelor active de lucru.

Mesch - este secțiunea din program care se ocupă cu crearea unei discretizări de lucru a elementului 2D sau 3D, prin discretizare înțelegându-se împărțirea elementului 2D sau 3D studiat supus simulării în elemente mici de studiu de formă cubică sau tetraedrică.

Job - este secțiunea din program care se ocupă cu asistarea simulării propriu-zise și în care se realizează atât supervizarea corectitudinii realizării modelului de simulare, cât și posibilitatea de realizare a simulării proceselor, evenimentelor, respectiv a acțiunilor implicate ca urmare a implicării modelului creat.

Vizualization - este secțiunea din program care se ocupă cu redarea rezultatelor simulării propriu-zise obținute prin rularea modelului creat și în care se realizează atât confirmarea corectitudinii realizării modelului de simulare, cât și posibilitatea de prelucrare a datelor simulării proceselor, evenimentelor, respectiv a acțiunilor implicate ca urmare a implicării modelului creat. Confirmarea și corectitudinea modelului este dată de o serie de mesaje adiționale pe care le aduce programul pe interfața calculatorului, mesaje care în funcție de conținutul lor pot bloca sau lăsa să meargă programul în simulare.

În ceea ce privește celelalte secțiuni 8 la număr pe care nu le-am amintit mai sus ca și descriere, acestea servesc la o serie de optimizări ce se fac cu modelul pe parcursul creării lui, respectiv servesc la obținerea și prelucrarea datelor necesare sau care ni le dorim a le studia în simulare.

Direct răspunzătoare de prelucrarea datelor cu caracter teoretic și informațional sunt secțiunile *Field Output Requests și History Output Requests*.

Interactions Properties, Contact Controls, Constraints BCs Remesching Rules sunt secțiuni care concură la buna desfășurare a procesului sau evenimentului sau acțiunii studiate în simulare.

Interactions Properties - este secțiunea din program care este subsidiară secțiunii principale Interaction și care poate oferi informații referitoare la elementele active de lucru care duc la crearea unor condiții asemănătoare cu realitatea, mai bine zis această secțiune crează condițiile din timpul real în cadrul modelului pentru ca în cadrul simulării să se țină cont de condițiile reale și posibilitățile de realizare a proceselor evenimentelor respectiv a acțiunilor implicate în simulare.

Contact Controls, Constraints Remesching Rules sunt secțiuni care sunt implicate de obicei în cadrul proceselor active dinamice care se ocupă cu menținerea stabilității condițiilor reale de lucru în timpul simulării procesului sau

evenimentului de studiu. Joacă un rol important deoarece dacă simularea nu se realizează corespunzător cu o eroare de lucru globală de 3% din condițiilor reale conforme cu procesul sau evenimentul de studiu programul oprește simularea propriu-zisă.

3.1.2. Elemente de simplificare în modelul numeric și în secțiunile programului pentru procesul de ambutisare adâncă

În urma prelucrării unor date scoase din practică referitoare la desfășurarea procesului de deformare plastică cu ajutorul modelului implementat în program se poate face o predicție a procesului de ambutisare reducând considerabil timpii de încercare a ambutisărilor și respectiv consumul de metal foaie de tablă (material de sacrificiu) necesar pentru fixarea parametrilor optimi de lucru, respectiv de asemenea de o mare importanță implicarea modelului obținut în mentenanța mașinilor unelte folosite la ambutisări.

Pornind de la definiția procesului de ambutisare simplificările care se fac sunt următoarele:

- poansonul, matrița și respectiv inelul de reținere vor fi elemente de tip shell discret rigide (suprafețe foi rigide nedeformabile) R3D4,
- foaia de tablă va fi solid extrudat deformabil C3D4.

Foaia de tablă ca și construcție 3D în model va fi realizată doar ca un sfert dintr-un cilindru de înălțime foarte mică, înălțimea fiind dată de fapt de grosimea tablei (0.5-1mm). Construcția tablei se face pe un sfert dintr-un cerc din considerente tehnice ale programului și calculatorului folosit. O foarte mare parte din resursele programului și respectiv ale calculatorului sunt implicate în simulare. Sub influența modelului impus programului calculatorul lucrează cu matrici inerțiale, matrici care sunt date de numărul de elemente ale materialului supus deformării.

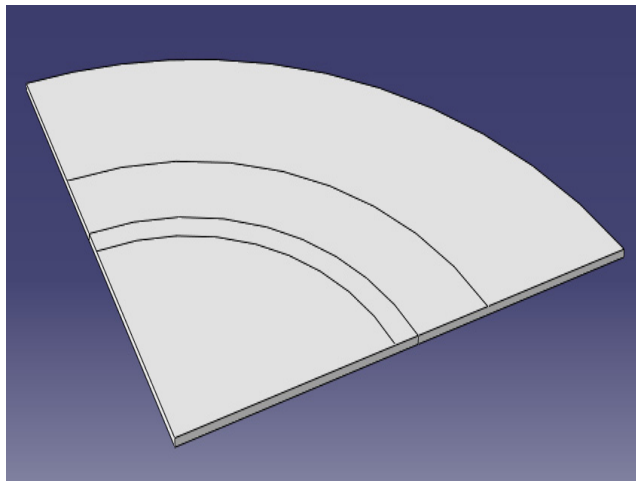


Figura 3.2. Foaia de tablă simplificată

Elementele din care va fi alcătuită foaia de tablă de tipul C3D4 sunt sub forma unor tetraedre regulate și sunt foarte multe ca număr. Pentru a face posibilă simularea, se studiază procesul de ambutisare doar pe un sfert de cilindru (figura

3.2). Elementele de tipul C3D4 care fac parte din construcția tablei supuse ambutisării se observă foarte bine în figura 3.3, elemente obținute de altfel într-o fază distinctă a modelului, faza discretizării în elemente finite.

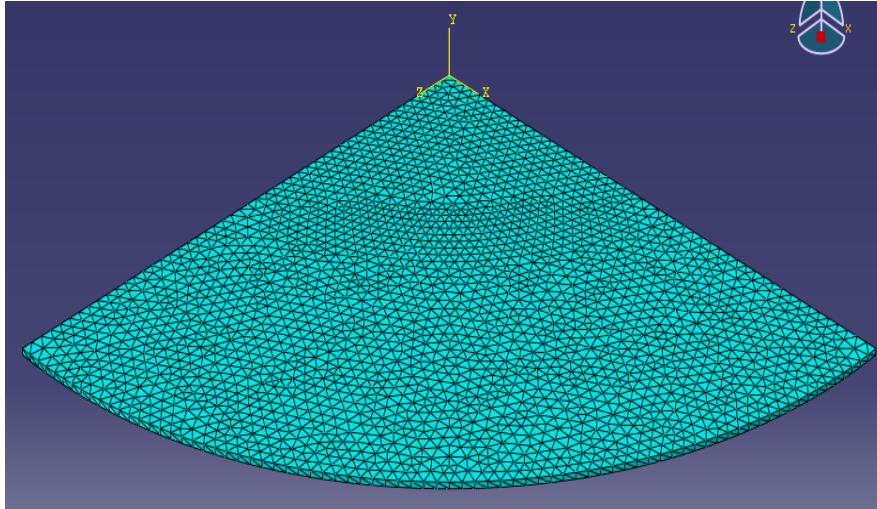


Figura 3.3. Discretizarea în elemente finite a foii de tablă.

Procesul de ambutisare va fi aplicat întregii foi de tablă, nu doar unei părți, aceasta putându-se face prin condițiile pe contur aplicate foii de tablă, condiții pe contur de simetrie față de axa z și față de axa x. Prin condițiile de simetrie pe contur aplicate după cele două axe, programul va realiza că foaia de tablă este una circulară reducându-se astfel erorile de blocare ale programului datorită numărului mare de elemente cu care ar fi trebuit să lucreze, figura 3.4.

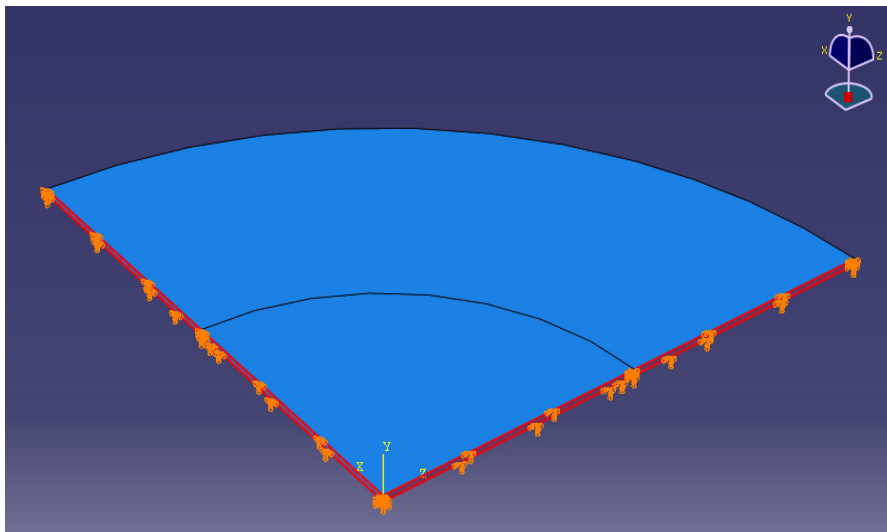


Figura 3.4. Condițiile de simetrie impuse pe contur.

La poanson, matriță și inelul de reținere lucrurile snt mai simple deoarece sunt elemente nedeformabile care ca și resurse nu iau așa de mult fiind construite din elemente de tip R3D4 nedeformabile rigide.[10] Actiunea forțelor asupra poansonului când are loc deplasarea pe verticală pe adâncimea h , respectiv asupra inelului de reținere când are loc apăsarea pentru a evita cutarea tablei se face printr-un punct *rigid point* (RP). În procesul de ambutisare matrița este fixă, fixarea acesteia făcându-se tot printr-un rigid point (RP). Rigid point-ul face parte încă din construcția elementului, respectiv la creerea lui s-a marcat cu roșu, așa cum se arată în figura 3.5 a,b,c.

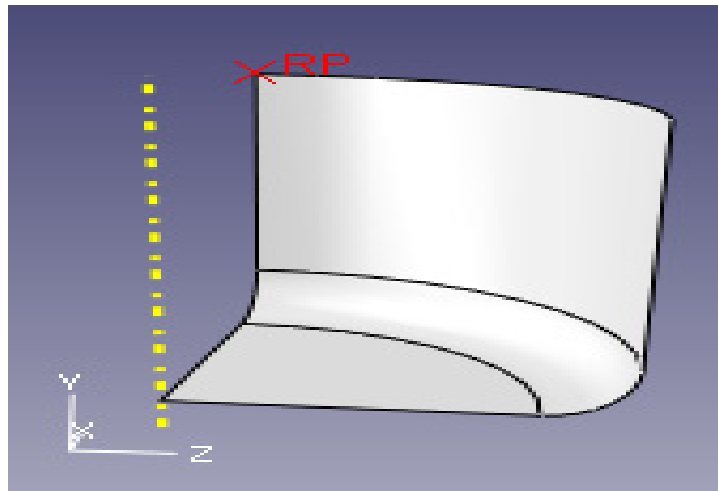


Figura 3.5.a Poansonul simplificat, cu punctul de aplicație al forței de ambutisare (RP)

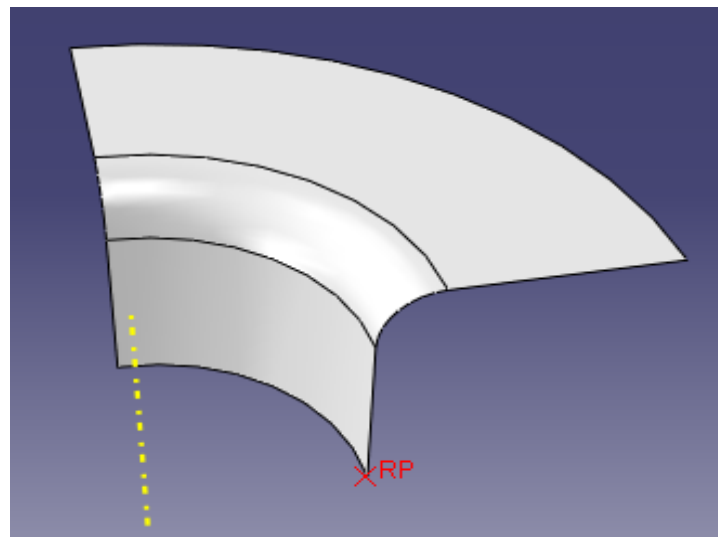


Figura 3.5.b Matrița simplificată cu punctul de aplicație (RP) ca și fixare a acesteia

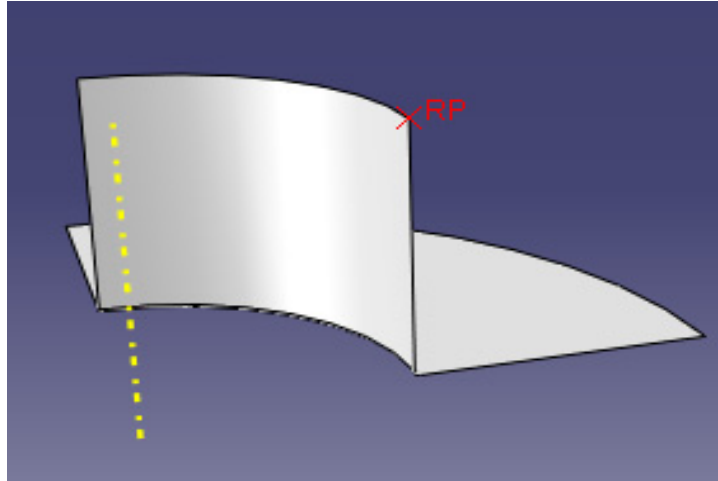


Figura 3.5.c Inel de reținere simplificat cu punctul de aplicație a forței pentru întinderea tablei (RP)

Ansamblul poansonului cu matrița și cu inelul de reținere și foaia de tablă pe un sfert de cerc simbolizează principal procesul ambutisării la rece sub formă simplificată (figura 3.6).

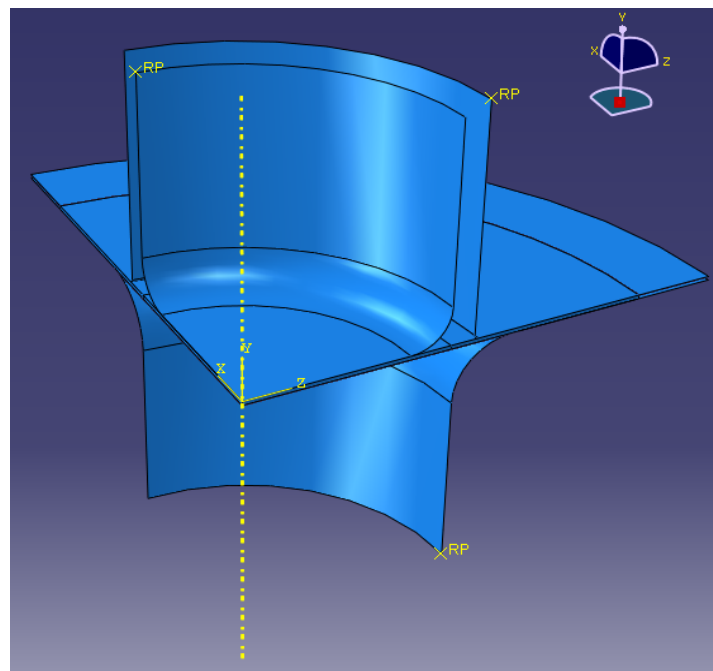


Figura 3.6. Procesul ambutisării la rece sub ipoteza simplificării.

3.1.3. Secțiunea Part din modelul de simulare implementat

În această secțiune s-au realizat atât elementele active ale procesului de ambutisare cât și foaia de tablă din figura 3.7 supusă ulterior deformării cu ajutorul poansonului.

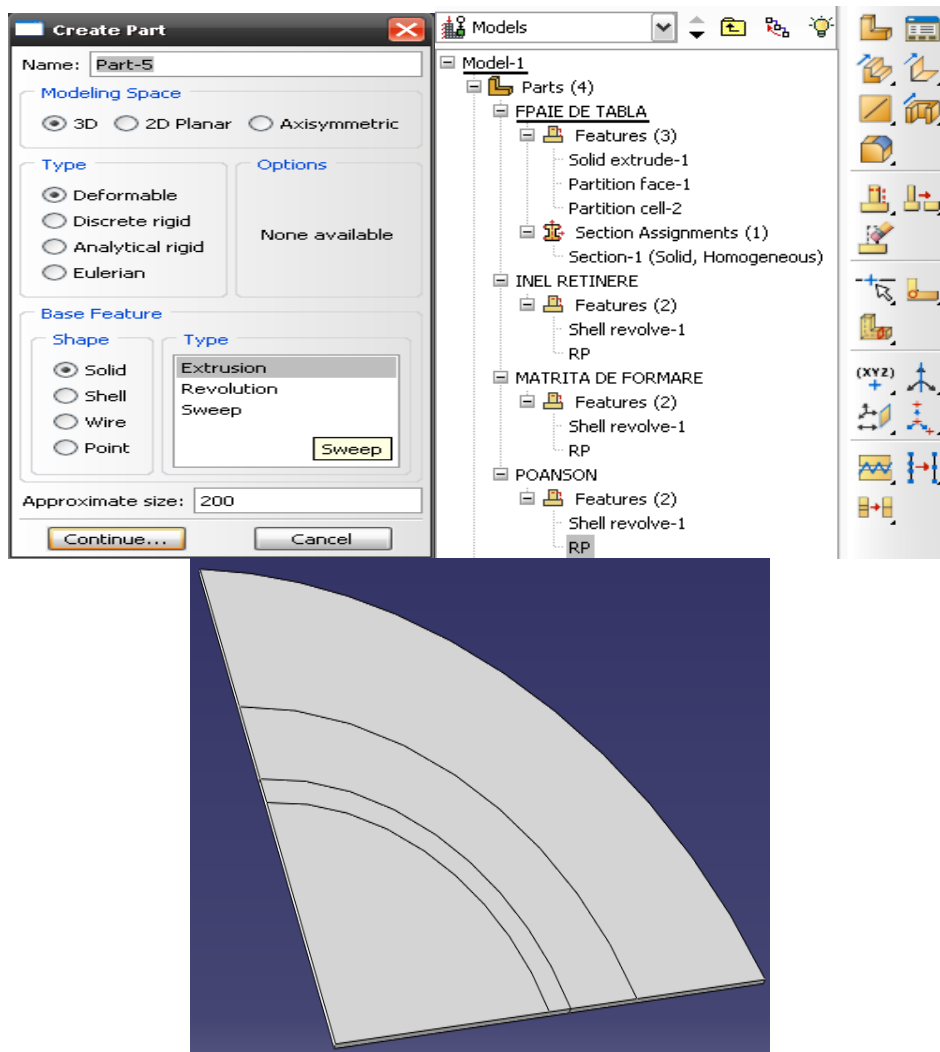


Figura 3.7. Crearea foii de tablă cu arborele de lucru al modelului.

După cum se observă din figura 3.7, în arborele de lucru al modelului din partea stângă se observă că foaia de tablă are 3 elemente de construcție: Solid extrude - 1, Partition face - 1, respectiv Partition cell - 2.

Primul element de construcție se referă la realizarea ca element solid al foii de tablă. Cele două partiționări au rolul de a demarca pe foaia de tablă zonele de acțiune a poansonului și a inelului de reținere, respectiv zona de acțiune a matriței

asupra foii de tablă.

Aceste zone de acțiune se vor detalia mai târziu în cadrul secțiunii interaction. Tot din arborele de lucru se observă că și elementele active de lucru au câte două elemente de construcție, fiecare având un shell revolve și un RP (punct de rigiditate-rigid point). Elementele active de lucru, poansonul cu matrița și cu inelul de reținere fiind elemente 3D deformabile se vor executa în secțiunea part din model din membrane revolute pe 90 de grade de forma shell revolution (exemplu în figura 3.8 realizarea inelului de reținere).

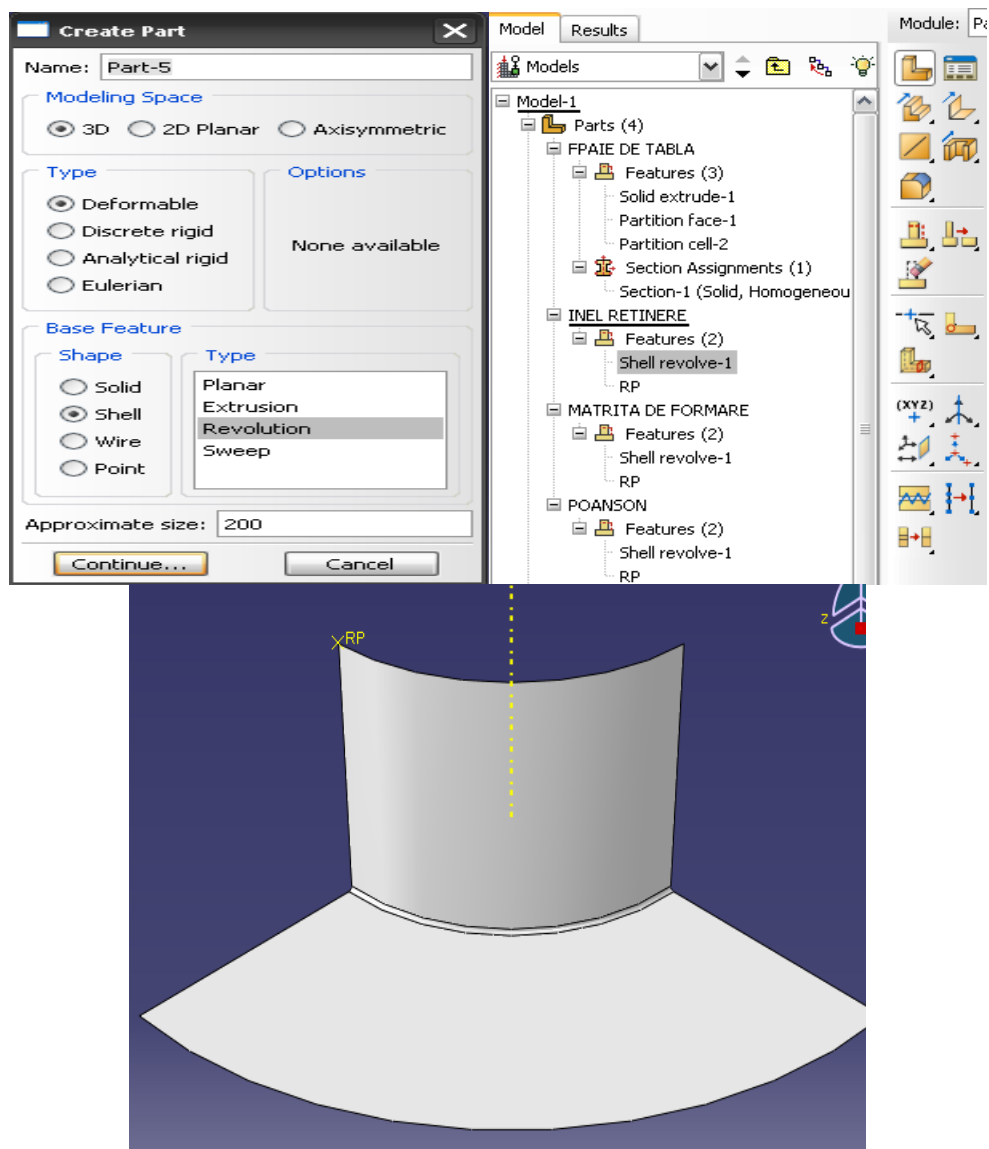
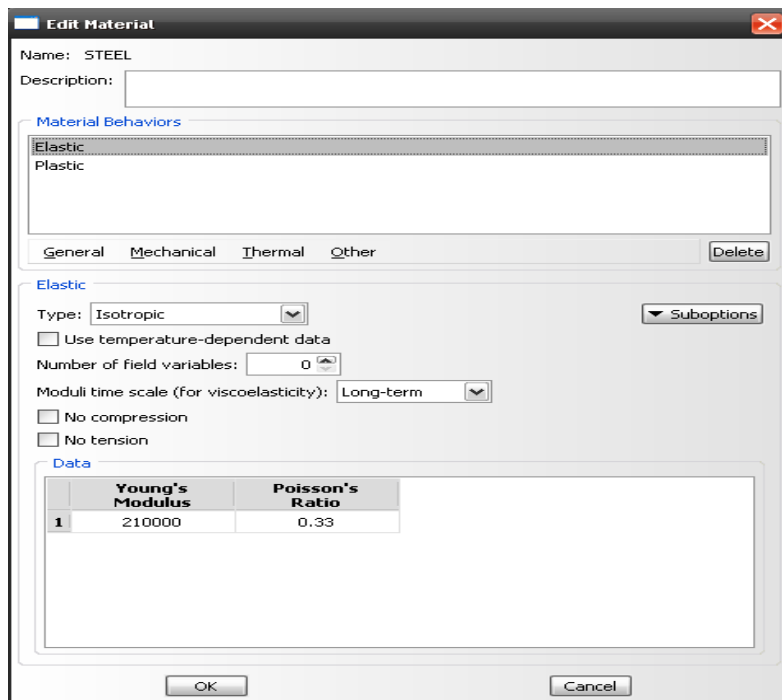


Figura 3.8. Crearea unui element activ de lucru (inelul de reținere) cu arborele de lucru al modelului.

În mod asemănător se realizează și celelalte elemente active de lucru. Spre deosebire de foaia de tablă, la elementele active de lucru apare așa numitul RP (rigid point) care este un punct rigid care face parte din corpul elementelor active de lucru prin intermediul căruia se pot măsura și aplica în secțiunea load forțele respectiv se pot măsura forțele de reacțiune din poanson, matriță și inelul de reținere. Acestea se observă foarte bine în figura 3.6, punctele marcate cu scris galben RP. Ca și construcție a RP-urilor ține de experiența de lucru a operatorilor cu programul Abaqus.

3.1.4. Secțiunea Property din modelul de simulare implementat

Este secțiunea unde se definește materialul foii de tablă OLC 10, definire care se face atât din punct de vedere elastic introducând modulul de elasticitate și coeficientul lui Poisson, cât și din punct de vedere plastic selectând 50 de valori ale tensiunii în funcție de deformația caracteristicii de pe curba caracteristică convențională pentru OLC 10. În figura 3.9 se observă modul de definire elastic și plastic a materialului foii de tablă folosind secțiunea Property.



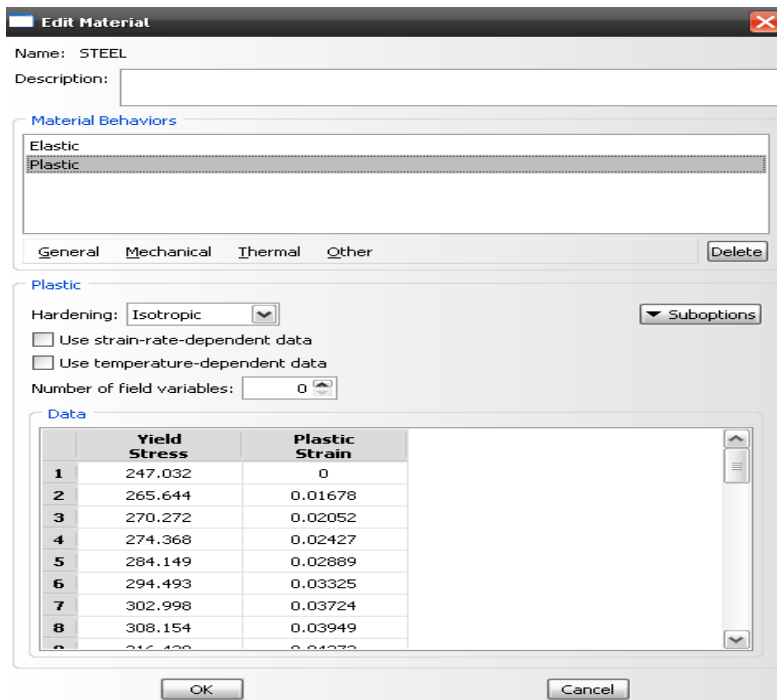


Figura 3.9. Crearea materialului foii de tablă în modelul de simulare.

În ceea ce privește secțiunea property aș insista puțin la partea de introducere a datelor pentru domeniul plastic. În figura 3.9 se observă că în casetele de dialog de la Edit material avem la domeniul Material behavior scris cu albastru domeniul elastic și plastic.

La domeniul elastic este clar că se introduce doar modulul de elasticitate Young, respectiv coeficientul lui Poisson. După cum se observă din figură la introducerea datelor în număr de 50 de valori pentru tensiune și deformație punctele de pe curba caracteristică se iau unele după altele din fiecare palier al curbei de pe cel crescător apoi din palierul în care avem deformarea în domeniul plastic și doar câteva valori, maximum 5 de pe palierul în care materialul curge cu rupere sau se și rupe la un moment dat.

Secțiunea Assembly nu o voi mai trata, deoarece este pur și simplu poziționarea geometrică în care avem concentricități între piesele active și așezări la anumite cote unele față de altele sau realizarea contactelor cu foaia de tablă a elementelor active de lucru. Tot din figura 3.6 unde este prezentat procesul de ambutisare simplificat se poate vedea și modul cum trebuie să arate la final ansamblul pregătit de simulare. În ceea ce privește partea de Assembly, aici avem 4 sub-secțiuni care se pot vizualiza în formatul electronic al modelului elaborat și aceste 4 sub-secțiuni țin strict de cunoașterea lucrului cu programul Abaqus.

În caz general vorbind, fiecare secțiune tratată de către autor are o serie de probleme care se ridică din punct de vedere al cerințelor programului. Pe undeva abordarea directă a unei probleme de simulare a unei ambutisări cilindrice, conice, paralelipipedice sau stanțări cu decupare sau cu retezare se poate realiza respectând pas cu pas această anexă, însă apar probleme pentru cei ne-

familiarizați cu acest soft.

Secțiunea Step pentru cazul ambutisării comportă 5 pași, plus pasul inițial generat de program. În pasul inițial se impun condițiile tipului de simulare dinamică sau statică. Pentru cazul nostru avem simulare dinamică la viteză constantă, deoarece nu avem șocuri sau accelerații, iar deformarea plastică pentru ambutisare are loc cu viteză constantă. Este foarte important faptul că modelul are ca mare noutate determinarea tensiunilor instantanee pe tot parcursul ambutisării, respectiv determinarea deformațiilor instantanee, toate acestea la diferite adâncimi de citire ale acestor variabile presate anterior. În funcție de aceasta se poate vedea influența acestor tensiuni și deformații instantanee asupra procesului de ambutisare respectiv modul de răspuns al foii de tablă la finalul ambutisării și oferă posibilitatea de a face o predicție asupra problemelor care pot să apară atât pe parcursul ambutisării cât și la finalul acesteia, totodată cu posibilitățile de evitare a acestor probleme (fisuri, rupturi, subțieri pronunțate, ondulări, etc).

În faza inițială pasul implementat automat de program reprezintă pe scurt itinerarul primei faze a ambutisării. În prima fază inelul de reținere se apropie de materialul foii de tablă fără să apese, la fel și matrița se consideră fixată încă din construcție în contact cu foaia de tablă.

În pasul 1 are loc apropierea poansonului de foaia de tablă până la contactul dintre acesta și foaie fără ca acesta să exercite vreo presiune asupra foii, respectiv inelul de reținere care servește la reținerea materialului foii ca să nu se cuteze adoptă o poziție de start pentru pasul următor. În toți pașii matrița rămâne pe poziție nemișcată și nu se rotește absolut deloc. Din motive de notație a programului pasul doi nu este existent în arborele de lucru, deoarece este un pas adițional pentru calcularea păstrării sau nu a stabilității procesului, deși el este existent în desfășurarea procesului. Mai departe de vor descrie pașii 3, 4, 5 și 6.

Pasul 2 mai servește pentru program ca pas matematic în care se pregătește lucrul matriceal tensorial al tensiunilor instantanee implicate și a deformațiilor și în funcție de acest lucru simularea continuă dacă nu se rupe materialul din calculele programului sau se poate opri simularea dacă materialul prezintă subțieri, ondulări, fisuri, rupturi prea mari ca procesul să mai continue.

În pasul 3 are loc setarea primului contact de apăsare a poansonului asupra foii de material, apăsare care nu are o valoare stabilită, ci este de ordinul micronilor, dată de program marcând astfel începutul ambutisării.

În pasul 4 are loc desfășurarea procesului de ambutisare completă pornind de la 0 mm – 100 mm, la care se adaugă cota de adaos a avansului poansonului pentru a ajunge la cota de 100 mm adâncime ambutisată.

Pasul 5 este pasul de dinaintea finalizării ambutisării, care după cum am spus mai sus este dedicat realizării cotei de adaos a avansului poansonului pentru a ajunge la cota de 100 mm adâncime ambutisată.

Pasul 6 este pasul de retragere a poansonului din matriță și de relaxare a materialului foii de tablă, deoarece materialul deși lucrează în bună parte în domeniul plastic prezintă și o revenire elastică.

În figura 3.10 a,b,c este prezentată caseta de dialog pentru crearea unui pas (step) 3.

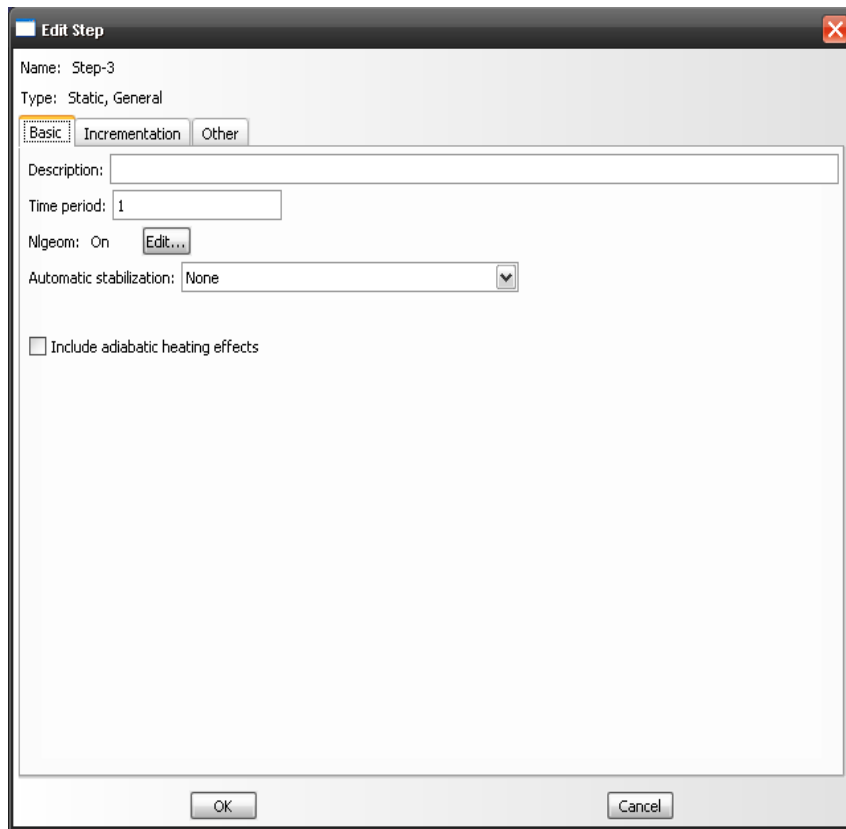


Figura 3.10.a Crearea pasului 3 sub-secțiunea basic din cadrul modelului de simulare al ambutisării

În figura 3.10 a,b,c se prezintă ca și schelet de ghidare și pentru celelalte stepuri subsecțiunile Basic, Incrementation, Other pentru fiecare step în parte având o serie de valori, aceleași sau altele în funcție de cerințele procesului

Pentru cazul pasului 3 avem în caseta basic figura 3.10 a Time period 1, la caseta Incrementation figura 3.10.b Type este automatic iar increment size are o valoare inițială de 0,01 un minim 1E-010 respectiv Maximum de 1 și în cele din urmă pentru sub-secțiunea Other figura 3.10.c bifăm la Equation Solver Direct și Unisymmetric la Solution technique Full Newton și valorile pentru numărul de iterații 8, Factorul de ajustare 1 maximul numărului de contacte pe iteratii 30. La Default Load with variation time avem bifat Ramp linearly over step si extrapolatia linear. La celelalte stepuri pot să apară o serie de diferențe la sub-secțiunile prezentate care vor fi detaliate la fiecare step în parte și totodată putem să nu avem modificări numai la câte o sub-secțiune.

La pasul 4 modificări avem doar la sub-secțiunea basic figura 3.11, sub-secțiunile celelalte fiind identice ca cele de la figura 3.10.b respectiv 3.10.c.

Step-urile 5 și 6 vor fi tratate împreună deoarece sub-secțiunile basic, incrementation respectiv Other sunt identice și prezintă o aceeași configurație a step-urilor (a se vedea figura 3.12.a,b,c).

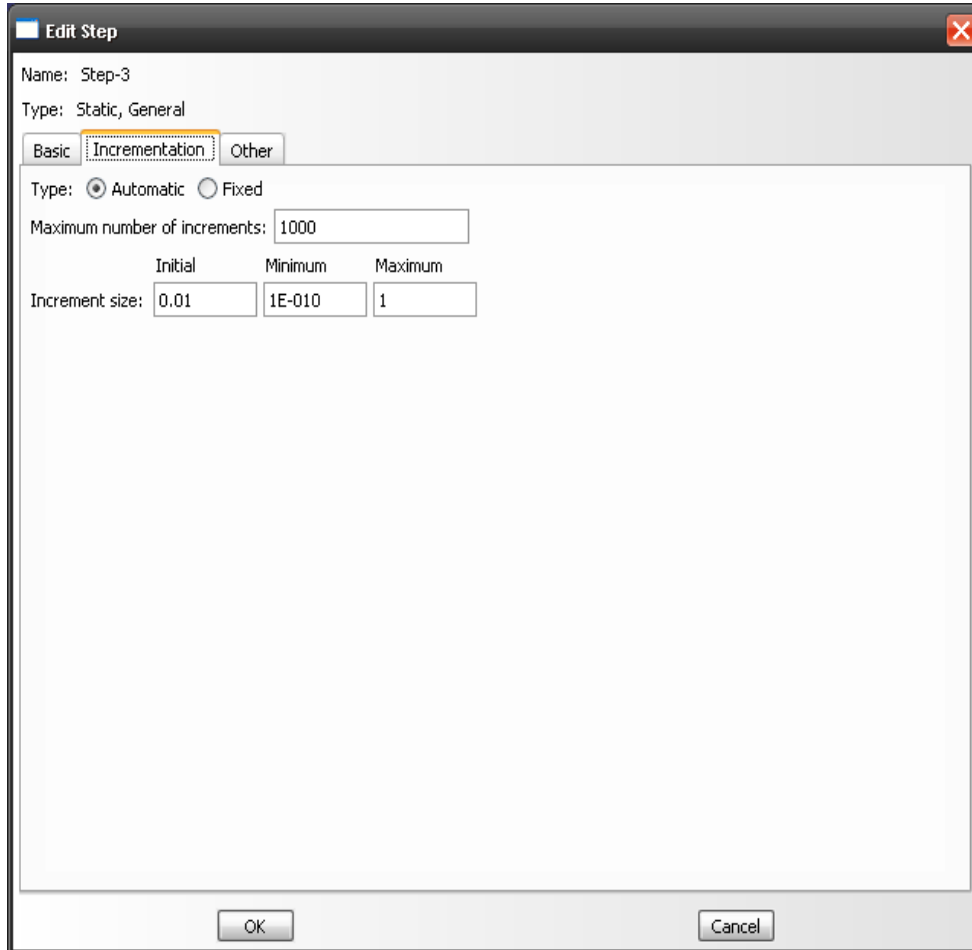


Fig 3.10.b. Crearea step-ului 3 sub-secțiunea Incrementation din cadrul modelului de simulare al ambutisării

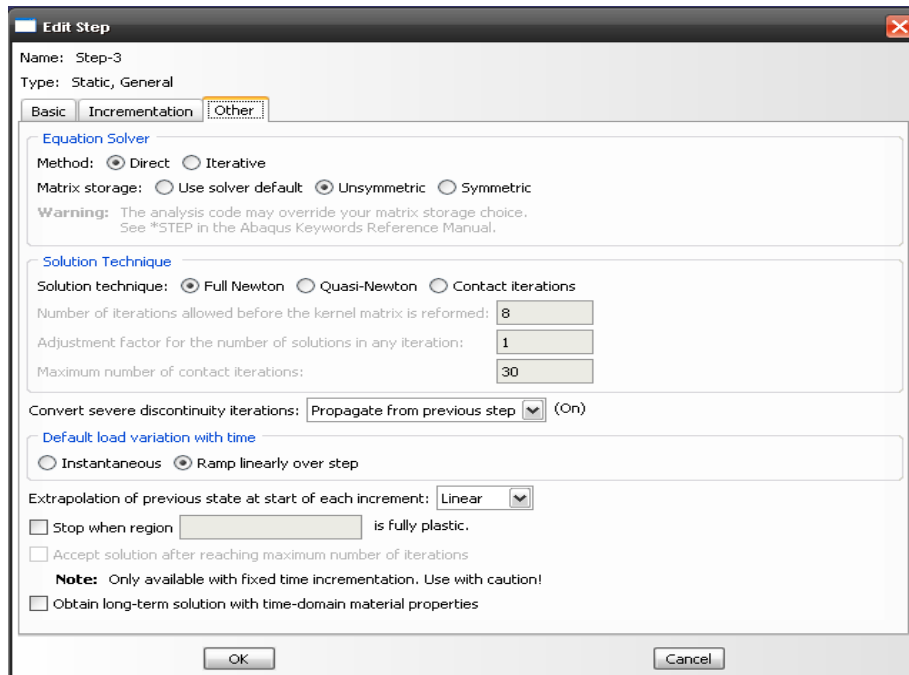


Figura 3.10.c. Crearea step-ului 3 sub-secțiunea Other din cadrul modelului de simulare al ambutisării

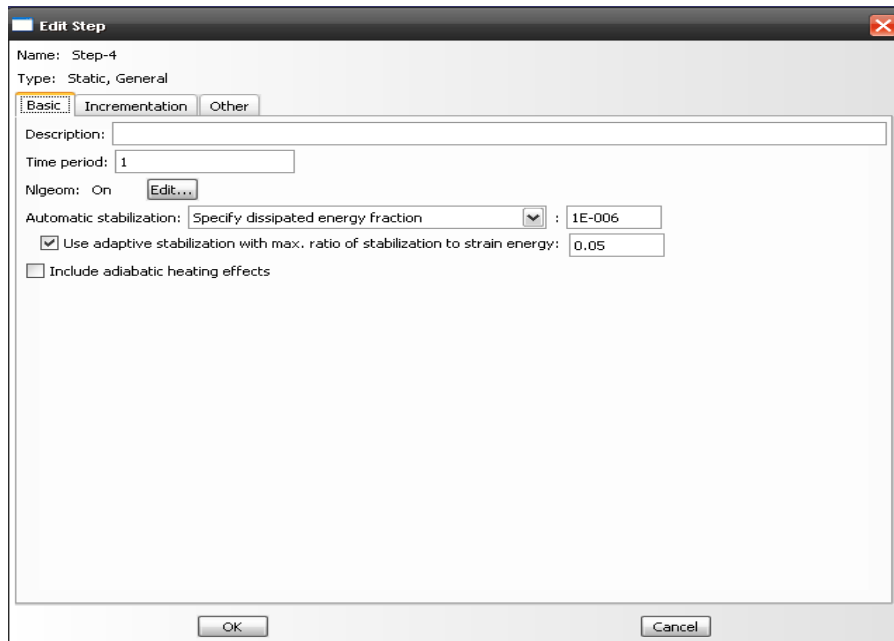


Figura 3.11. Crearea step-ului 4 sub-secțiunea Basic din cadrul modelului de simulare al ambutisării

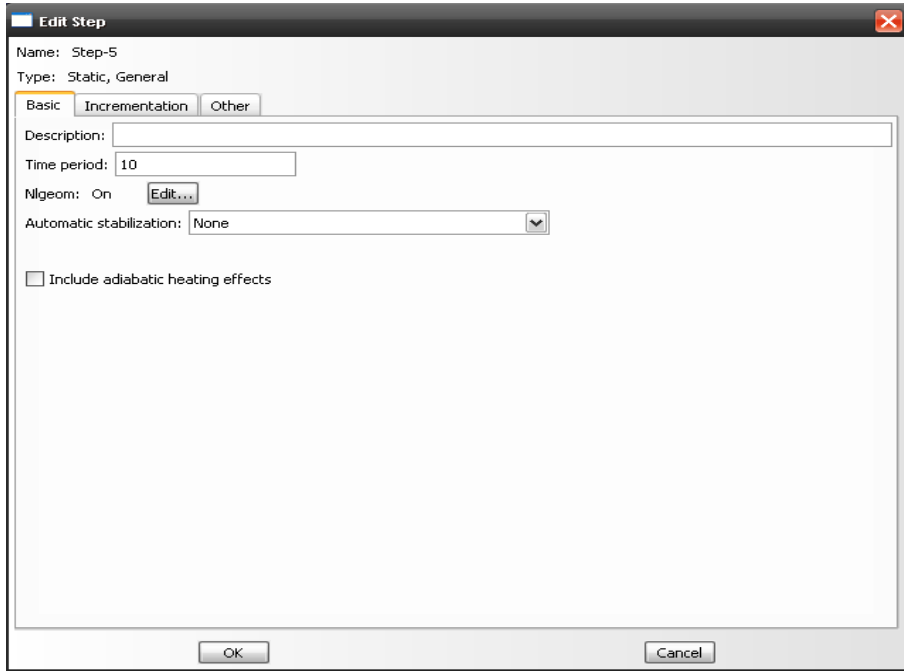


Figura 3.12.a. Crearea step-ului 5 și 6 sub-secțiunea Basic din cadrul modelului de simulare al ambutisării

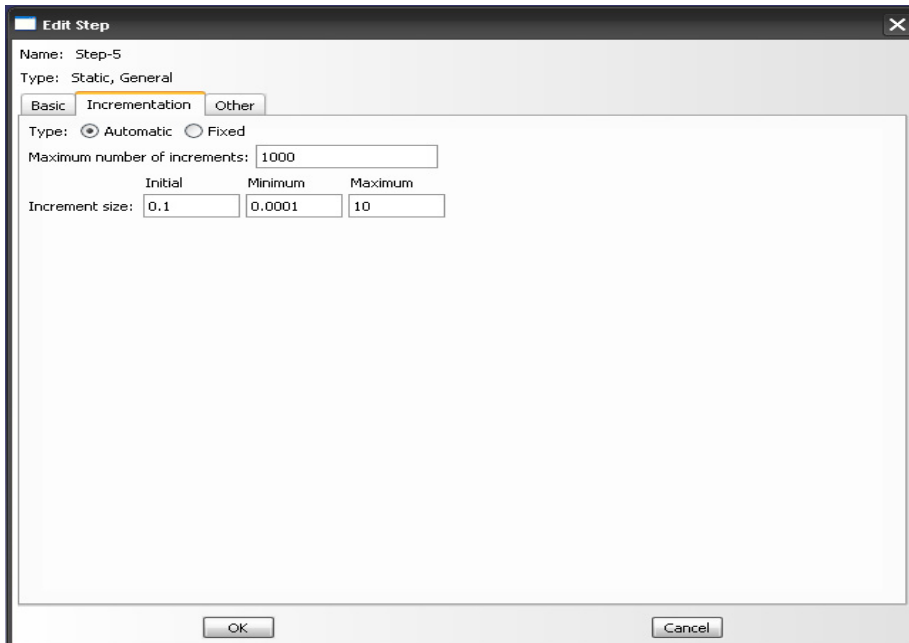


Fig 3.12.b. Crearea step-ului 5 și 6 sub-secțiunea Incrementation din cadrul modelului de simulare al ambutisării

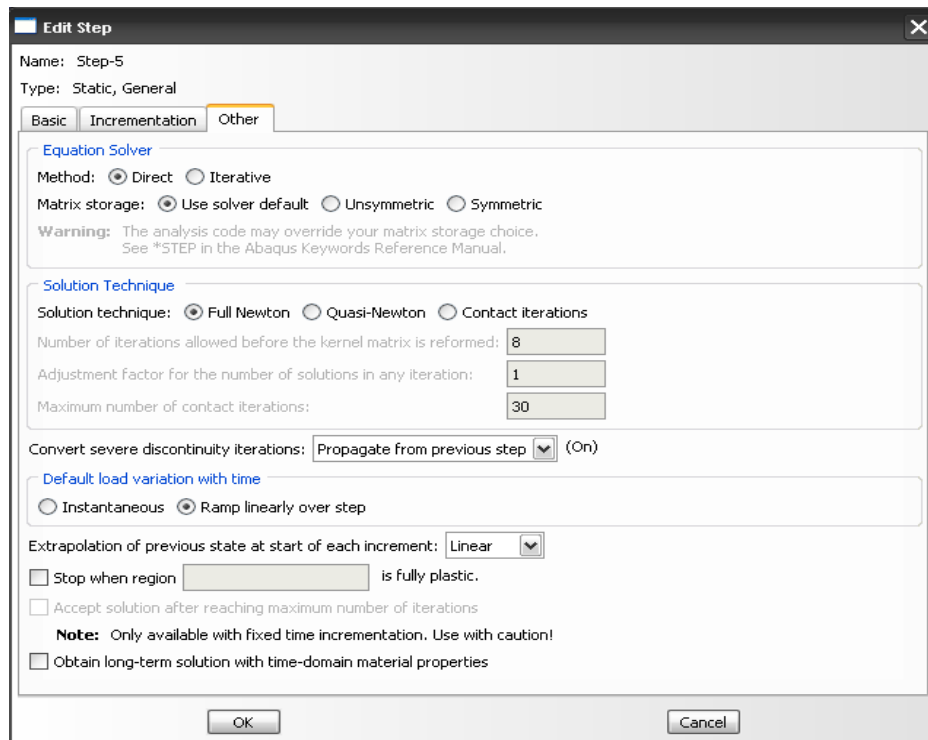


Figura 3.12.c. Crearea step-ului 5 și 6 sub-secțiunea Other din cadrul modelului de simulare al ambutisării

În cele ce vor urma voi detalia foarte succint *Field Output Requests, History Output Requests*. Ambele secțiuni tratează pentru cunoscătorii programului Abaqus problemele de prelucrare a datelor și modurile de inducere a vizualizării. Din Field Output Request se poate seta ca la modul de distribuții din vizualizări să avem ca mod de vizualizare elementele setate în Field Output Request, respectiv History Output Request este răspunzător cu realizarea graficelor în funcție de timp pentru setările introduse de operator. Tratarea detaliată a acestor sub-secțiuni este redată și în exemplul electronic al modelului de rulat.

Secțiunea interaction pentru cazul nostru de ambutisare tratează efectiv zonele în care avem apăsare, respectiv contact dintre elementele active și foaia de tablă. Un prim contact sau interacțiune avem între inelul de reținere și foaia de tablă (figura 3.13).

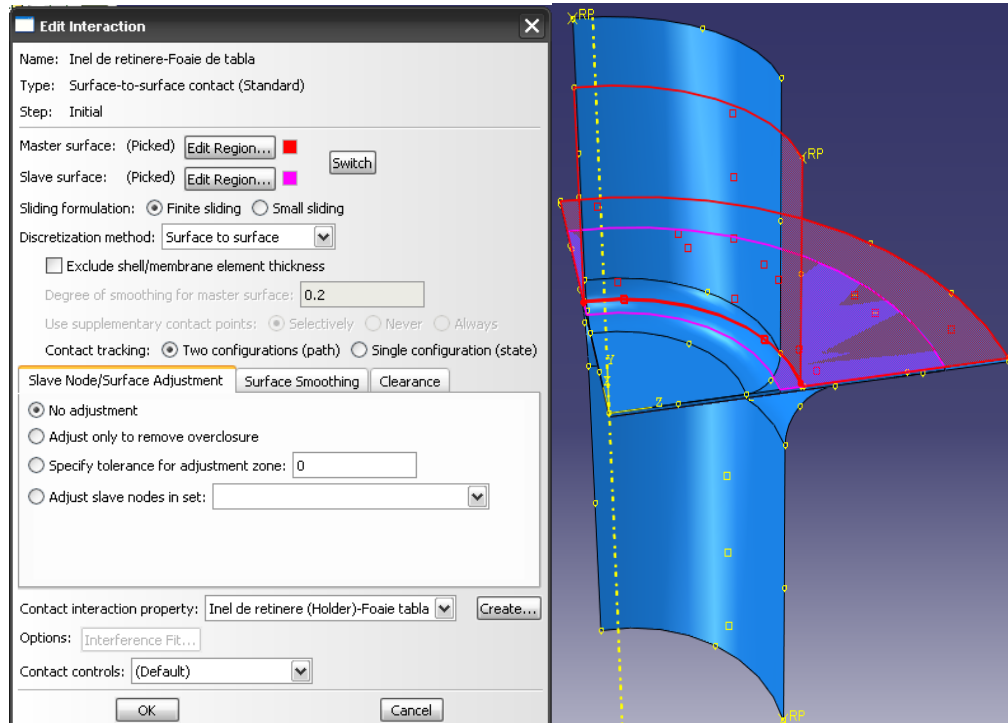


Figura 3.13. Interacțiunea dintre inelul de reținere și foaia de tablă.

După cum se observă și din caseta de dialog suprafața inelului de reținere este una master, iar cea a foii de tablă este una slave, de unde rezultă că se impune ca foaia de tablă să se supună acțiunilor inelului de reținere. Și la celelalte interacțiuni avem asemănător cu ce s-a prezentat în figura 3.13, pentru interacțiunea matriță-foaie de tablă a se vedea figura 3.14, respectiv pentru poanson-foaie de tablă a se vedea figura 3.15.

La proprietățile interacțiunilor dintre elementele active și foaia de tablă va fi frecare între poanson și foaie și se va seta un coeficient de 0,90 și frecare vom avea și între inel și foaia de tablă; frecare foarte ușoară datorită lubrifiantului undeva la $0,15-0,25 \mu\text{m}$. Ca și dimensiuni ale foii de tablă avem un diametru de 100mm respectiv o grosime de 1mm. Pentru inelul de reținere figura 3.16.a, matriță figura 3.16.b și poanson figura 3.16.c, aceste cote vor fi detaliate mai explicit și în exemplul electronic al modelului de simulare.

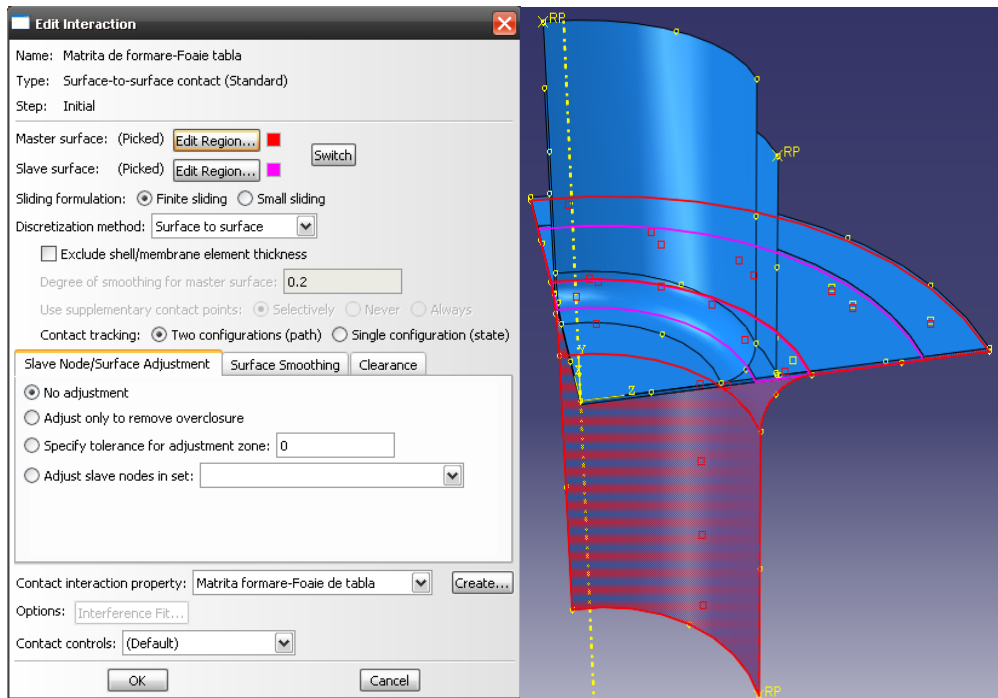


Figura 3.14. Interacțiunea dintre matriță și foaia de tablă.

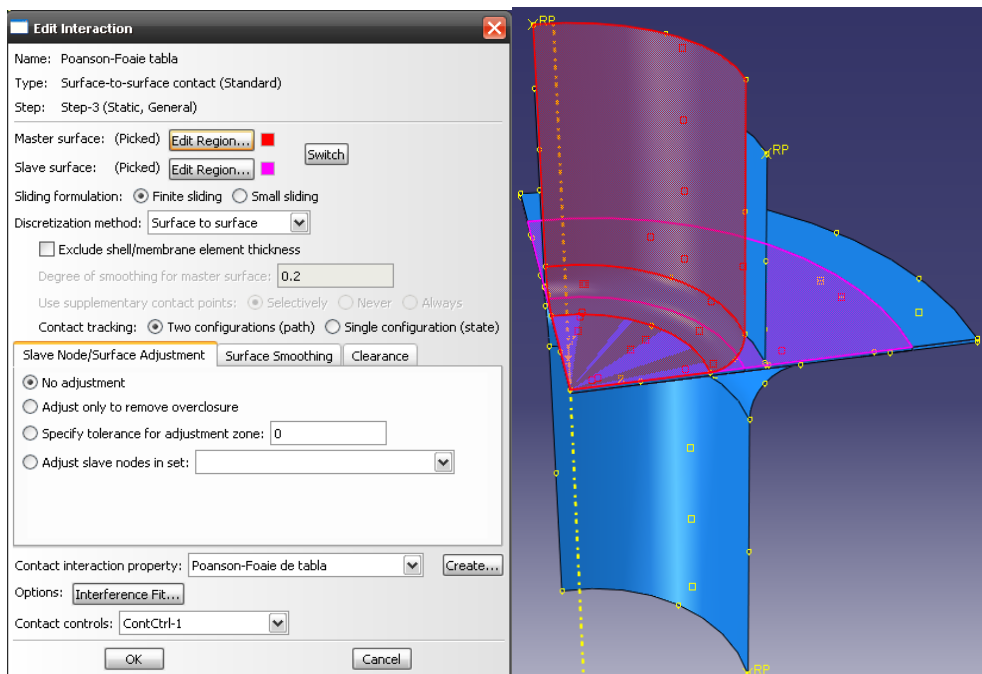


Figura 3.15. Interacțiunea dintre poanson și foaia de tablă.

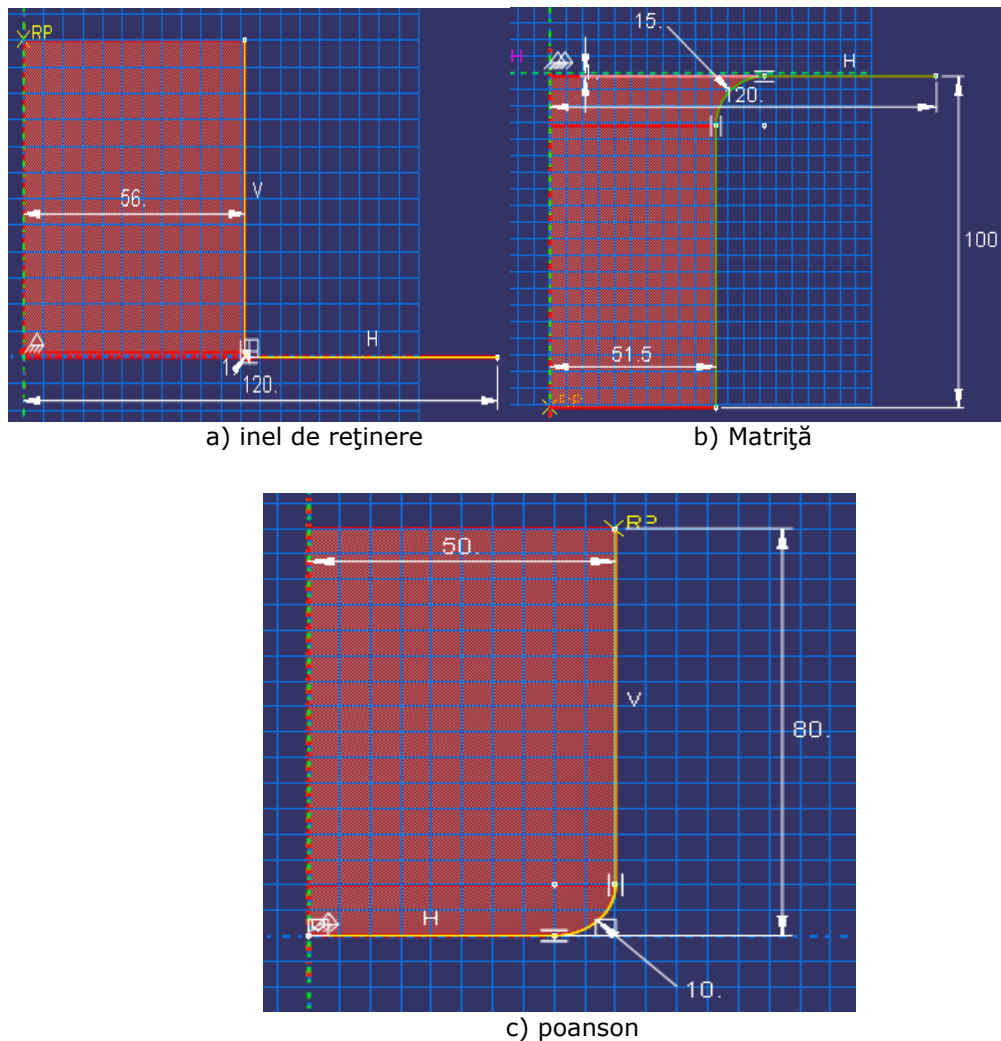


Figura 3.16. Reprezentarea grafică constructivă a elementelor active implicate în ambutisare: a) inel de reținere, b) matriță, c) poanson

Partea cea mai interesantă din cadrul modelului implementat este cea în care nu avem forțe implicate în proces, ci doar deplasări cu anumite valori ale poansonului. Desfășurarea procesului de ambutisare propriu-zis având loc în step-ul 4, cu avansarea poansonului cu un avans de 0.3 mm/s până la atingerea adâncimii de ambutisare de 100,3mm cu adaosul de relaxare a materialului pentru a ajunge la cota de 100mm cotă de adâncime ambutisată. Deplasările poansonului cu avansul pre setat la 0.3mm/s viteză setată astfel încât să nu rupem foaia de tablă, avans respectiv viteză setată prin încercări repetate până când programul nu a dat nici o eroare, deplasări care se vor trata în secțiunea BCs (condițiile de echilibru definite de program).

În continuare voi aborda secțiunea Mesch. După cum am discutat și la partea de ipoteze simplificatoare, pentru ca programul să ruleze modelul, acesta

este supus unei împărțiri în elemente mici tetraedrice sau cubice. Foaia de material este împărțită în elemente tetraedrice, iar elementele active rigide nedefromabile în elemente cubice.

Foaia de tablă figura 3.17.a are ca și configurație elemente tetraedrice de tip C3D4, în număr total de 50484 elemente pentru toată foaia și un număr total de 17496 de noduri. Inelul de reținere are 616 elemente de tip R3D4 care sunt elemente de tip rigid de formă cubică (uneori pătrată cazul nostru a se vedea ansamblul din figura 3.17.b) și un număr de 1220 noduri, matrița are 704 elemente cubice de tipul R3D4 și un număr de 816 noduri, pe când poansonul are 372 elemente R3D4 și un număr de 444 noduri.

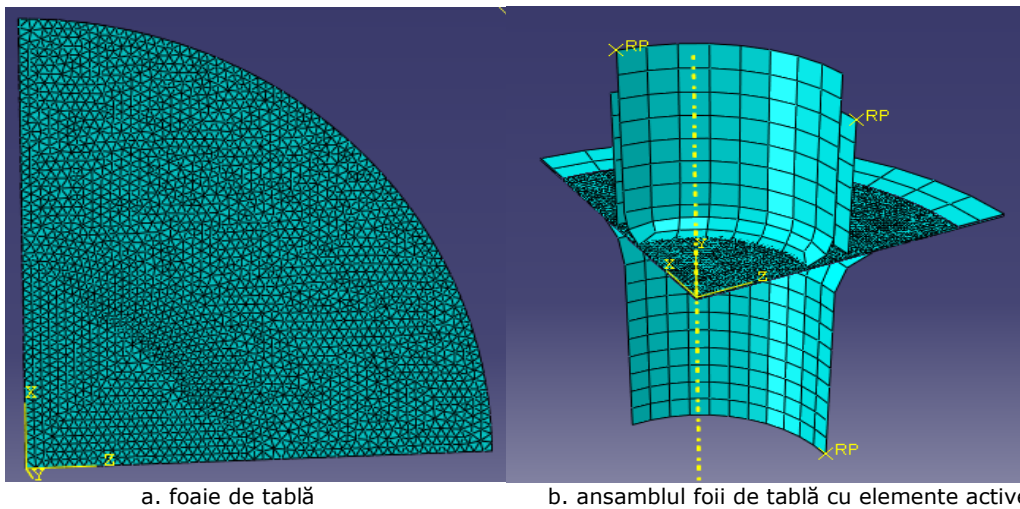


Figura 3.17. Reprezentarea discretizării foii de tablă pe un sfert de foaie și a elementelor active implicate în ambutisare.

După cum am discutat mai înainte, avansul poansonului în matriță este redat complet pentru fiecare step în secțiunea BCs.

Deplasarea completă a poansonului de la suprafața de contact cu tabla de ambutisat până la adâncimea de ambutisare de 100mm s-a făcut în secțiunea BCs sub forma a 15 condiții de deplasare. În urma condițiilor active de deplasare a poansonului a rezultat o serie de forțe și tensiuni atât în materialul foii de tablă, cât și în elementele active care au putut fi observate în secțiunea vizualization după rularea modelului în secțiunea job.

Datorită faptului că mărimea problemei de studiat depășea capacitatea calculatorului pe care am lucrat, am optat pentru studiul problemei pe un sfert din foaia de tablă, deși programul recunoștea toată foaia de tablă. Acest lucru s-a realizat prin intermediul BCs-urilor.

BCs-1 este o condiție de echilibru pe contur de simetrie față de axa Z a sistemului de axe de lucru implementat și atașat modelului, condiție care nu-i permite foii de tablă să se deplaseze după direcția axei Z, inducând condiția că în partea negativă a axei Z există material metalic al foii de tablă (figura 3.18).

BCs-2 este o condiție de echilibru pe contur de simetrie față de axa X a sistemului de axe de lucru, implementat și atașat modelului, condiție care nu-i permite foii de tablă să se deplaseze după direcția axei X, inducând condiția că în

partea negativă a axei X există material metalic al foii de tablă (figura 3.19).

BCs-3 este o condiție de echilibru pe contur în care sunt blocate toate rotirile posibile ale inelului de reținere pe cele trei axe de coordonate ale sistemului de axe de lucru implementat și atașat modelului condiție care nu îi permite inelului de reținere să se rotească după direcția axelor X,Y,Z (figura 3.20). După cum am observat, elementele active de lucru prezintă la una din extremități un RP (rigid point) de fapt acest rigid point se pune pentru a marca locul de acțiune a forțelor implicate în proces; cu alte cuvinte RP-urile joacă un rol foarte important în a duce la buna desfășurare a procesului pe de o parte, iar pe de altă parte au rolul de a introduce în modelul de simulare condițiile reale ale desfășurării procesului de ambutisare. În aceste puncte în History output request se vor atașa seturile de măsurare care sunt sub-secțiuni ale secțiunii assembly, seturi în care se măsoară tensiuni instantanee, presiuni de strivire instantanee, respectiv deformații instantanee. Fără aceste elemente simularea se realizează, însă nu putem culege și preleva nici o dată numerică, și nici nu putem induce condițiile reale de lucru sau itinerarul de desfășurare a procesului în toate fazele lui de acțiune.

BCs-4 este o condiție de echilibru pe contur în care sunt blocate toate rotirile și deplasările posibile atât pentru poanson cât și pentru matriță pe cele trei axe de coordonate ale sistemului de axe de lucru implementat și atașat modelului condiție care obligă ca atât poansonul cât și matrița să fie fixe rigide în această fază (figura 3.21).

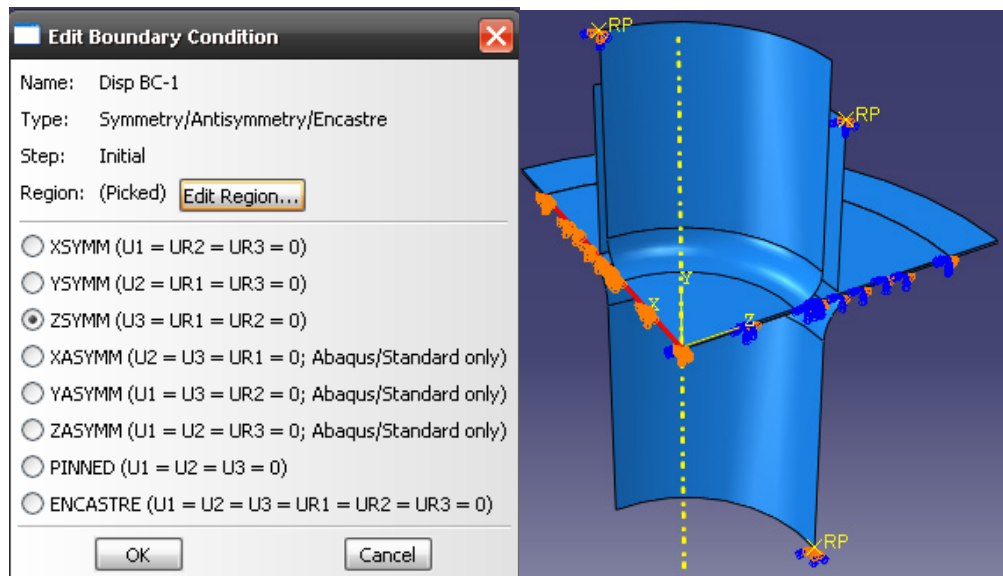


Figura 3.18. Reprezentarea BCs-ului 1 pentru foaia de tablă pe un sfert de foaie (condiție delimitată de culoarea rosie a dungii foii respectiv semnul de acțiune tip săgeată a condiției colorat în portocaliu)

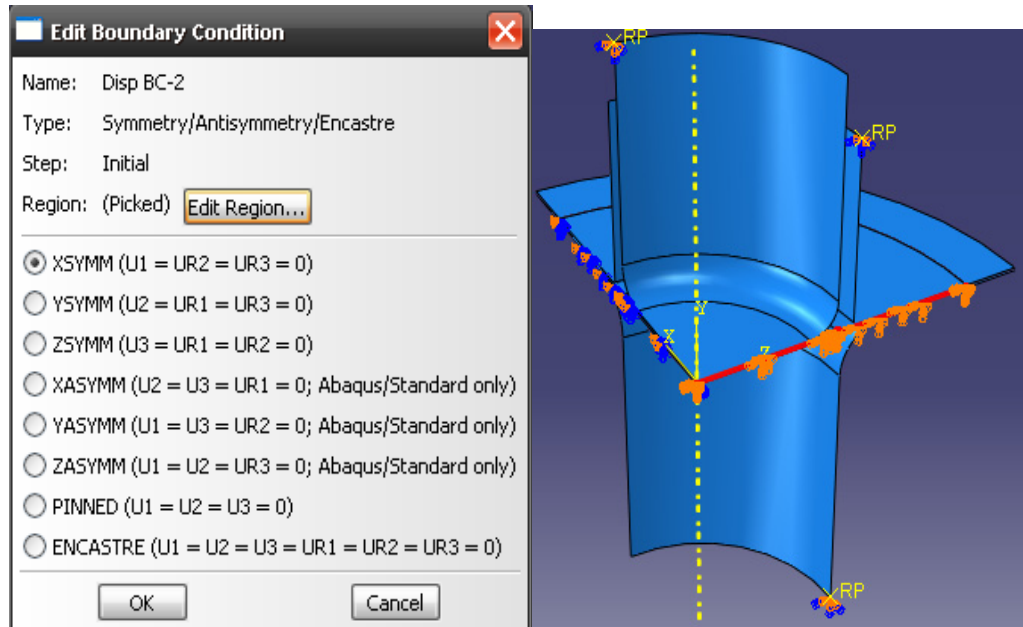


Figura 3.19. Reprezentarea BCs-ului 2 pentru foaia de tablă pe un sfert de foaie (condiție delimitată de culoarea roșie a dungii foii respectiv semnul de acțiune tip săgeată a condiției colorat în portocaliu)

BCs-5 este o condiție de echilibru pe contur în care sunt blocate deplasările pentru inelul de reținere pe axele X și Z de coordonate ale sistemului de axe de lucru implementat și atașat modelului condiție care obligă ca inelul de reținere să nu se deplaseze după direcția X și Z (figura 3.22). Până în BCs-5 inclusiv toate condițiile limită au fost puse pe stepul inițial și majoritatea au fost legate de elementele active pentru a le configura poziția de start în cadrul procesului de ambutisare. Din BCs-ul 6 deja se face apropierea inelului de reținere de tablă cu contactul acestuia cu foaia respectiv începe demararea procesului de ambutisare în step-ul 4.

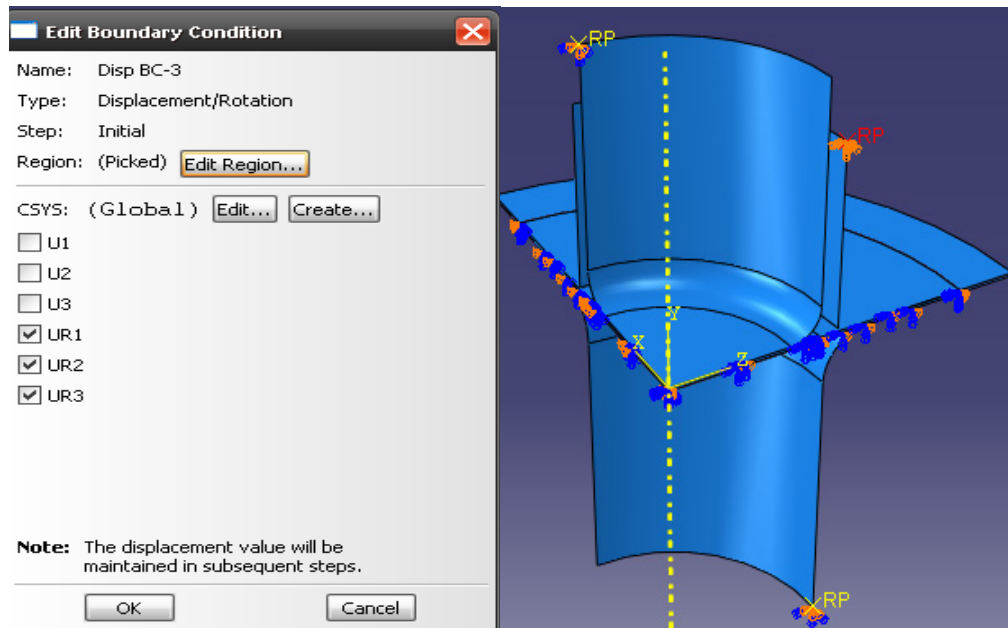


Figura 3.20. Reprezentarea BCs-ului 3 pentru inelul de reținere (condiție delimitată de culoarea roșie RP-ului respectiv a semnelui de acțiune tip săgeată a condiției colorat în portocaliu)

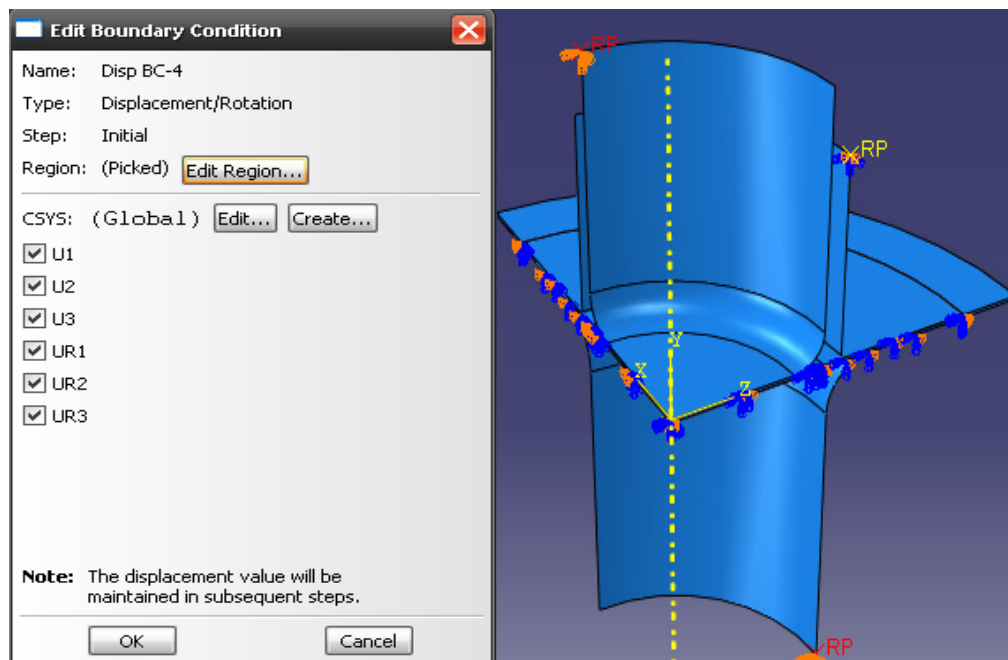


Figura 3.21. Reprezentarea BCs-ului 4 impunerea deplasărilor și a rotirilor pentru poanson și matriță (condiție delimitată de culoarea roșie RP-ului atât pentru poanson cât și pentru matriță respectiv a semnelui de acțiune tip săgeată a condiției colorat în portocaliu)

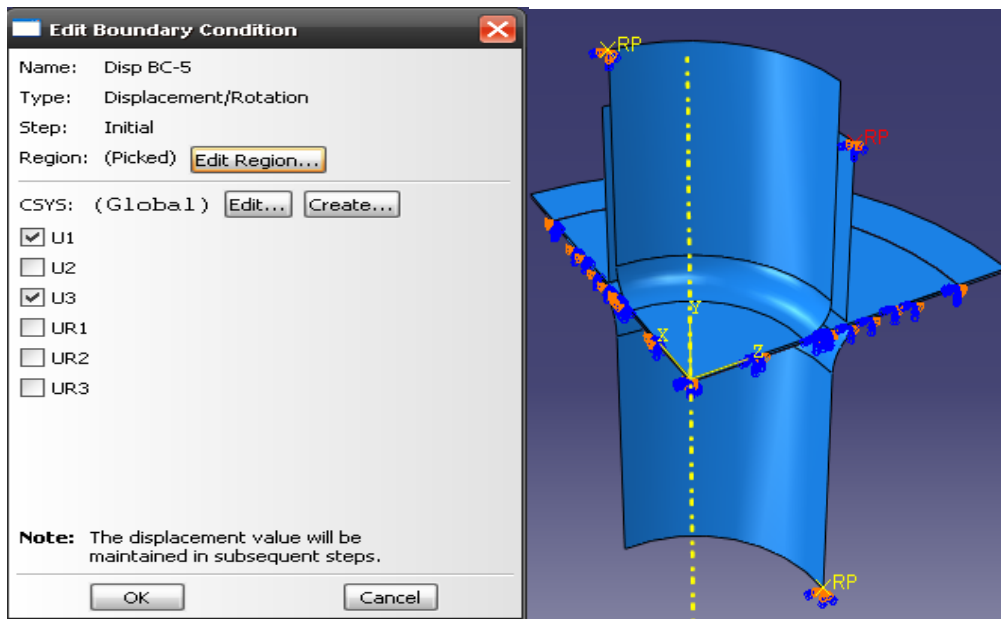


Figura 3.22. Reprezentarea BCs-ului 5 impunerea deplasărilor blocate pe axele X și Z (condiție delimitată de culoarea rosie RP-ului pentru inel de reținere respectiv a semnelui de acțiune tip săgeată a condiției colorat în portocaliu)

BCs-6 este o deplasare a inelului de reținere pe direcția Y direcție de ambutisare cu 0,03mm creându-se astfel în stepul 1 de data aceasta și marcând începutul procesului de ambutisare. (figura 3.23.a). În momentul imediat următor are loc după cum o sa vedem în BCs-7 un răspuns activ al matriței pentru ca apăsarea elementului activ să se facă resimțită asupra foii de tablă aceasta în urma apăsării cu poansonul neîncrețindu-se. Deplasarea inelului de reținere cu 0,03mm duce la crearea unei presiuni de strivire calculată de altfel și în teză de 142,30MPa presiune de strivire care este ok ca materialul metalic al foii să fie doar reținut nu blocat sub inel lucru de nedorit datorită provocării ruperii materialului.

După cum se observă în figurile 3.18 și 3.19 la condiția de echilibru BCs-1 și BCs-2 condiții de simetrie pentru foaia de tablă create în stepul inițial se propagă până în ultimul step de simulare, pentru ca programul în fiecare moment să știe că există foaie de tablă circulară nu doar un sfert.

În BCs-3 condiție de echilibru pentru inelul de reținere este prima condiție de definire propriu-zisă pentru program de către model aceea de a nu se roti după nici o axă aceasta menținându-se pe tot parcursul simulării (vezi figura 3.20 BCs-3).

În condiția de echilibru BCs-4 se definesc elementele active poanson și matriță pentru stadiul sau pasul de dinaintea simulării ca fiind elemente active rigide și fixe, dar cu diferențierea că nu rămân fixe și în celelalte stepuri nu ar mai avea loc simularea.

În BCs-5 condiție de echilibru pentru inelul de reținere are loc o a doua definire pentru program de către model referitor la rolul pe care îl joacă până la final inelul de reținere adică acela de a avea blocate deplasările pe direcțiile X și Z pe toată durata ambutisării deci i se impune doar deplasarea pe axa Y. După cum am văzut mai sus BCs-6 marchează deplasarea pe axa Y cu 0,03mm deplasare care

durează până în stepul 5 inclusiv stepul 6 revenind relaxării materialului foii de tablă. Putem spune că definirea rolului inelului de reținere s-a făcut pe durata a 3 condiții impuse (figura 3.23.b) .

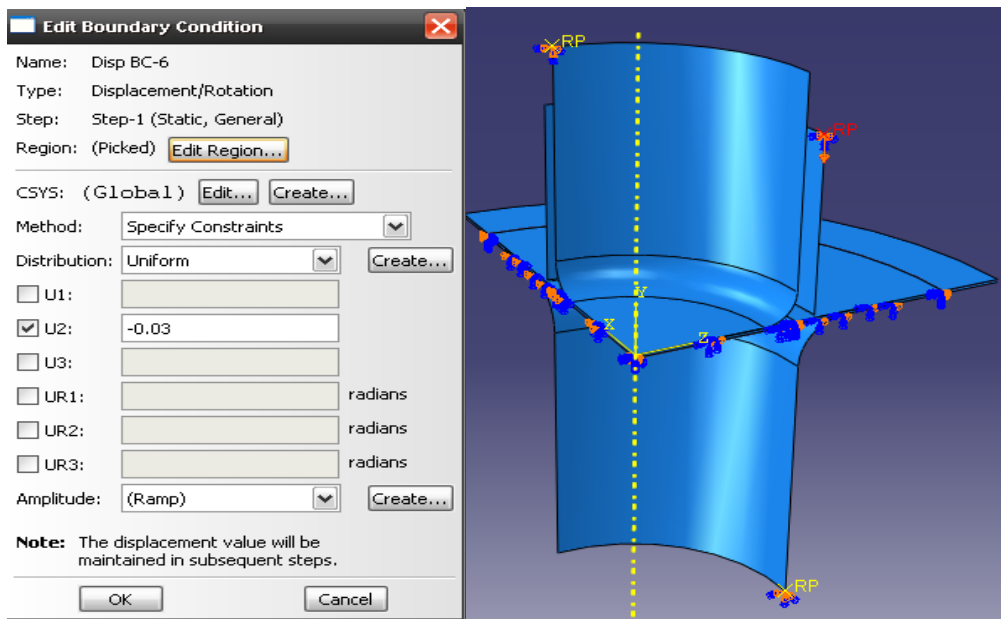
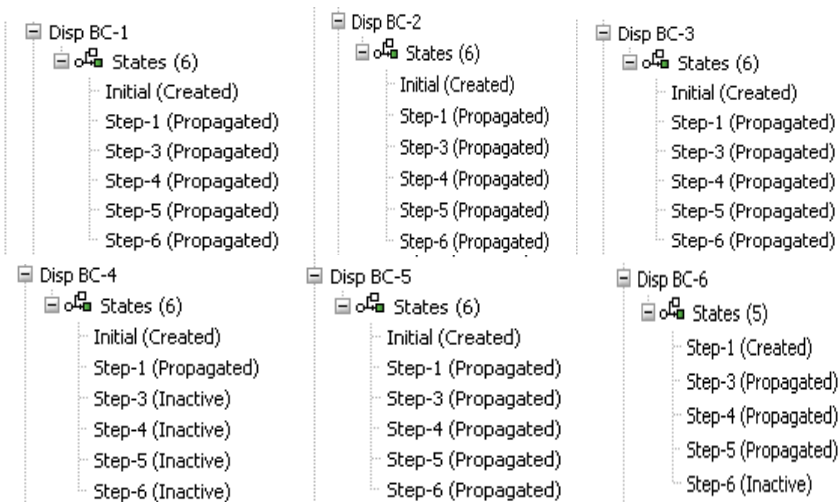


Figura 3.23.a Reprezentarea BCs-ului 6 impunerea deplasării inelului de reținere pe direcția axei Y (condiție delimitată de culoarea roșie a RP-ului pentru inel de reținere, respectiv a semnelui de acțiune tip săgeată orientată în jos a condiției colorat în roșu)



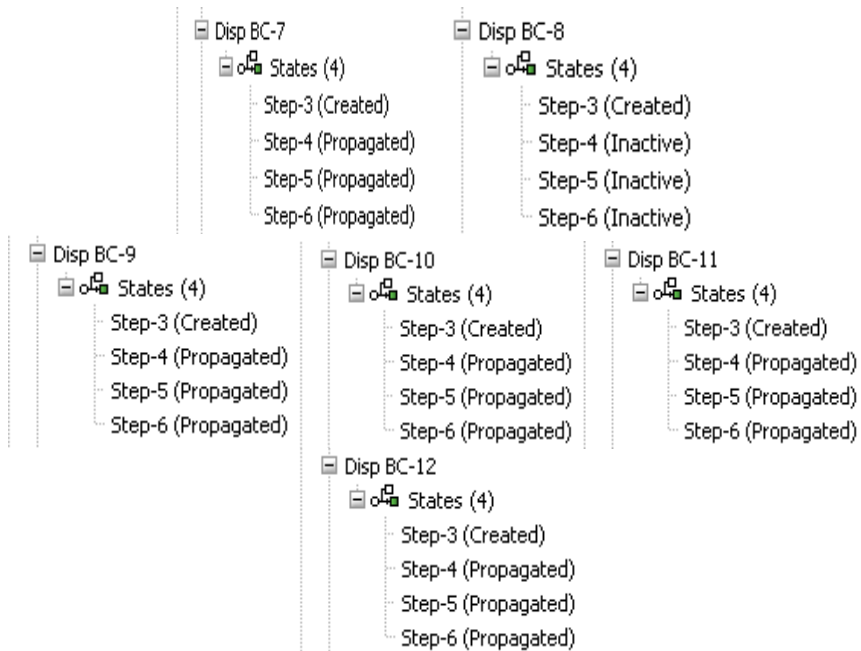


Figura 3.23.b Modul de creare a elementelor active de lucru și dinamica acestora în cadrul modelului implementat.

În urma apăsării pe care o crează inelul de reținere în BCS-6 după cum am spus mai sus, matrița în condiție de echilibru pe contur BCS-7 reacționează ca și în step-ul inițial în care toate rotirile și deplasările sunt blocate, matrița fiind fixă și rigidă pe tot parcursul procesului de ambutisare (figura 3.23.a,b) respectiv (figura 3.24).

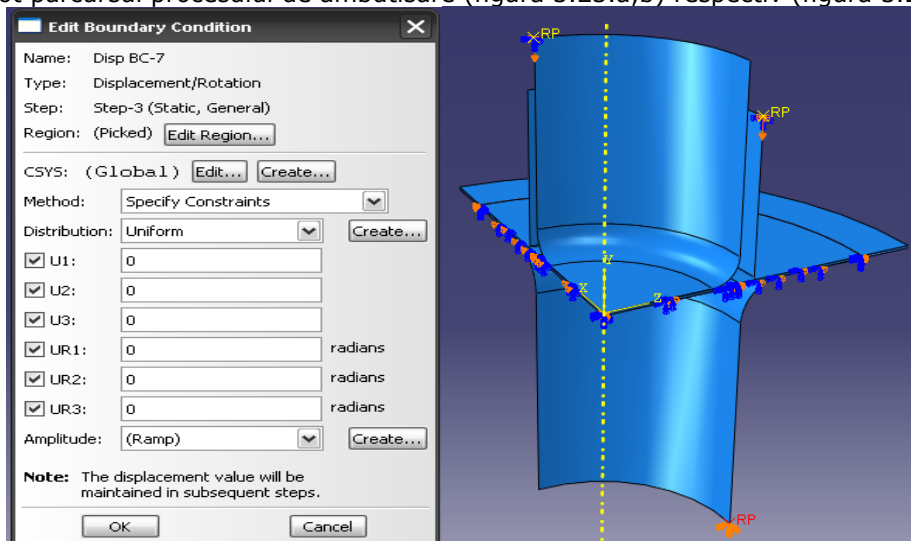


Figura 3.24. Reprezentarea BCs-ului 7 impunerea blocării deplasărilor și rotirilor pentru matriță (condiție delimitată de culoarea roșie a RP-ului pentru matriță respectiv a semnelui de acțiune)

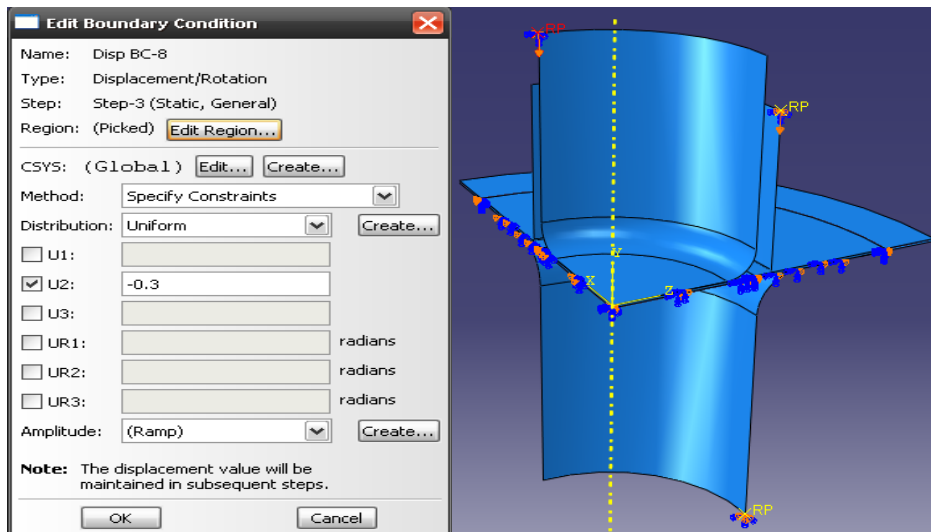


Figura 3.25. Reprezentarea BCs-ului 8 impunerea deplasării pe direcția axei Y a poansonului cu 0.3mm/s setarea vitezei de avans pentru poanson (condiție delimitată de culoarea roșie a RP-ului pentru poanson respectiv a semnelor de acțiune tip săgeată a condiției colorat în roșu)

BC-s 8, a opta condiție de echilibru are loc definirea mișcării poansonului în timpul ambutisării. Pasul de avans în realizarea procesului de ambutisare este setat la valoarea de 0,3mm având direcția verticală. Deplasarea este una lină fără vibrații și avansuri șoc variabile cu accelerație variabilă (Figura 3.25).

Țin să amintesc faptul că toate denumirile de BC-s (denumite de către program condiții de echilibru), nu sunt altceva decât elemente de control a programului prin care sunt verificate situațiile de pierdere sau menținere a stabilității procesului de ambutisare. În acest context sunt setate condițiile optime de lucru ale elementelor active de lucru în așa fel încât să nu apară pierderea stabilității procesului de ambutisare, conducând astfel la ruperea materialului foii de tablă.

În cele ce urmează se vor reda începând cu BCs-9 și până la BCs-13 inclusiv blocările condițiilor de echilibru de deplasare pe axele X și Z și respectiv rotirile blocate pe aceste direcții (figura 3.27). Acestea se vor pune într-o singură casetă de dialog pentru toate BCs-urile de la 9-13.

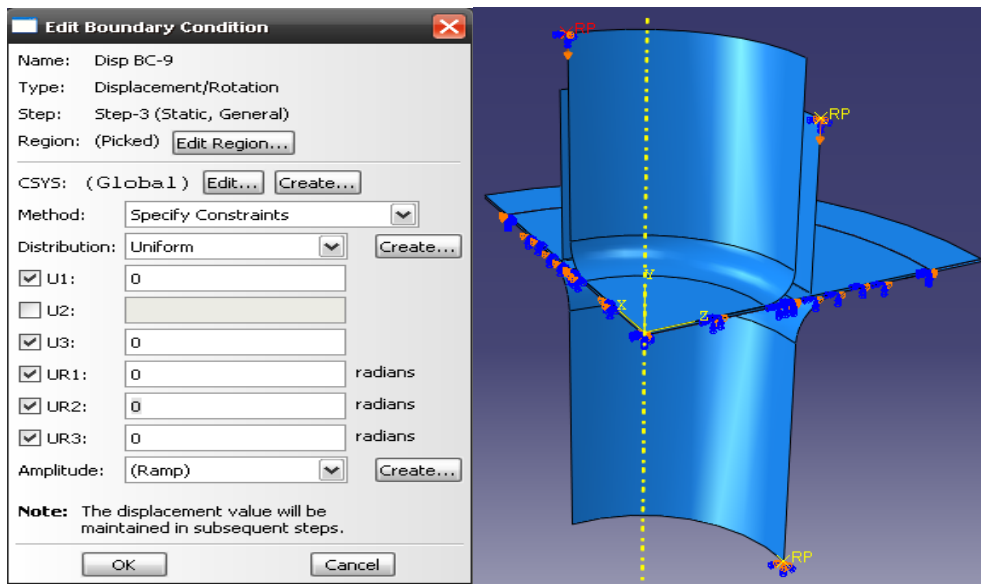


Figura 3.26. Reprezentarea BCs-9 ÷ BCs-13, condiții de echilibru pentru poanson de blocare a deplasărilor pe axele X și Z, respectiv a blocării rotirilor pe toate axele (condiție delimitată de culoarea roșie a RP-ului pentru matriță, respectiv a semnului de acțiune tip săgeată a condiției colorat în roșu).

Ca și în cazurile de mai sus amintite, propagarea blocărilor deplasărilor și a rotirilor pe direcțiile X și Z respectiv a rotirilor pe cele trei axe pentru poanson se face până la finalul procesului de ambutisare. Cu alte cuvinte se impune programului ca poansonul să fie rigid și nedeformabil, respectiv să nu se deplaseze în timpul procesului de ambutisare pe axele X și Z și să nici nu se rotească. În BCs-14 este a doua condiție de deplasare a poansonului pe axa Y până la adâncimea de 100mm adâncime ambutisată (figura 3.27). Astfel impunându-se poansonului în mișcarea pe axa Y în BCs-8 pasul de avans sau viteza de înaintare trebuie să menționăm că de abia acum poansonul este pe deplin definit din punctul de vedere al programului.

În ultimul BCs-15 se observă că este tot o condiție pentru poanson, condiție care duce la obținerea cotei ambutisate de 100mm. În acest BCs-15 se lasă un plus de deplasare pe axa Y pentru poanson deoarece se ține cont de adaosul de ambutisare ce trebuie lăsat pentru a obține la reper cota de adâncime ambutisată de 100mm (figura 3.28).

Blocările rotirilor poansonului și deplasările nule pe direcțiile X și Z atât în BCs-9 și până la BCs-13 inclusiv sunt create în stepul 3 al simulării și se propagă pe toată durata simulării. În arborele de lucru al programului pentru fiecare deplasare sau rotire blocată va apărea la fiecare BCs de la 9-13 exact varianta de exemplificare ca în figura 3.24. Pentru Bcs-14 crearea se face în stepul 4 stepul realizării simulării și propagarea până la finalul simulării stepul 6 iar pentru realizarea adâncimii ambutisate de 100mm adică pentru a se ține cont de adâncimea de ambutisare cu adaos singurul step în care se și creează și se și propagă acțiunea BCs-ului 15 este step-ul 6.

54 Crearea algoritmului informatic pentru ambutisare în Abaqus 6.8-1 - 3

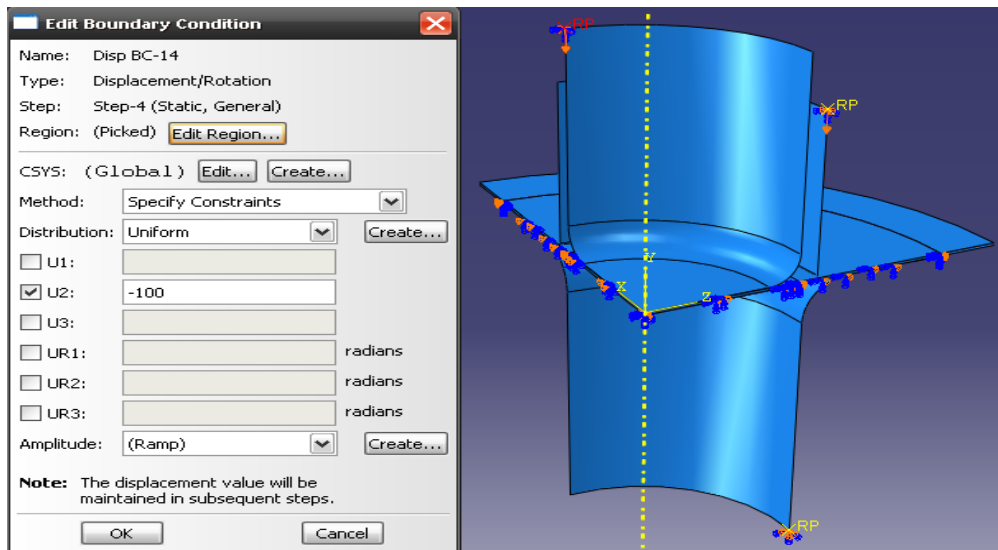


Figura 3.27. Reprezentarea BCs-ului 14 impunerea deplasării pe direcția axei Y a poansonului cu 100mm, setarea deplasării maxime pentru poanson (condiție delimitată de culoarea roșie a RP-ului pentru poanson, respectiv a semnului de acțiune tip săgeată a condiției colorat în roșu)

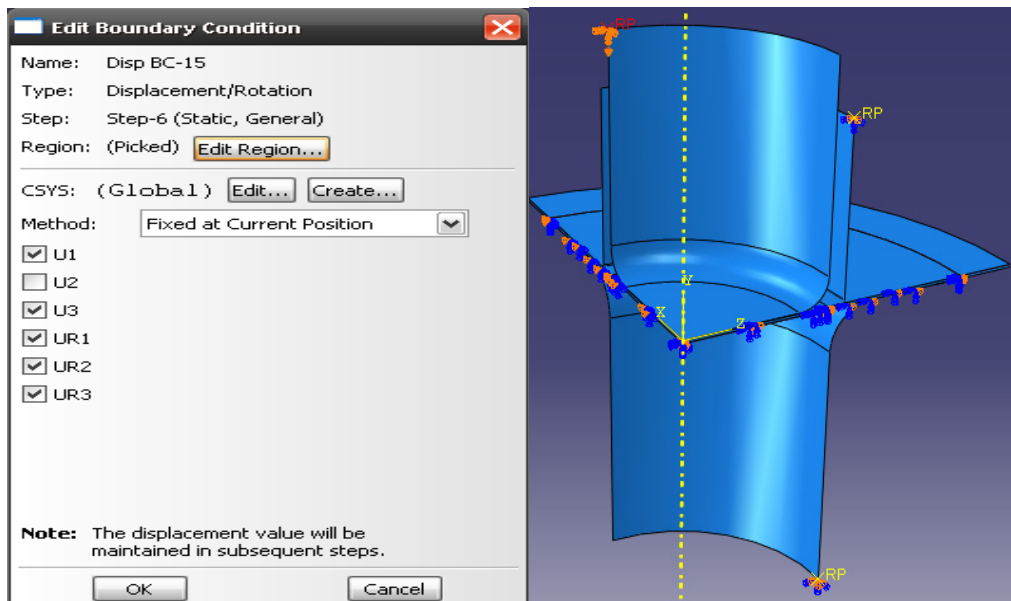


Figura 3.28. Reprezentarea BCs-ului 15, impunerea deplasării pe direcția axei Y a poansonului cu adaosul necesar ambutisării setarea deplasării pentru poanson fiind la liber lăsat la expansiunea programului (condiție delimitată de culoarea roșie RP-ului pentru poanson respectiv a semnului de acțiune tip săgeată a condiției colorat în roșu)

Secțiunea **Job** se ocupă cu rularea modelului astfel realizat și cu o serie de elemente de siguranță a simulării (o parte din acestea revenindu-i secțiunii **Vizualization**). Dacă modelul este corect executat incluzând lipsa undulațiilor, fisurilor, respectiv crăpărilor, etc.) atunci job-ul care rulează simularea are un feedback bun realizând simularea (figura 3.29).

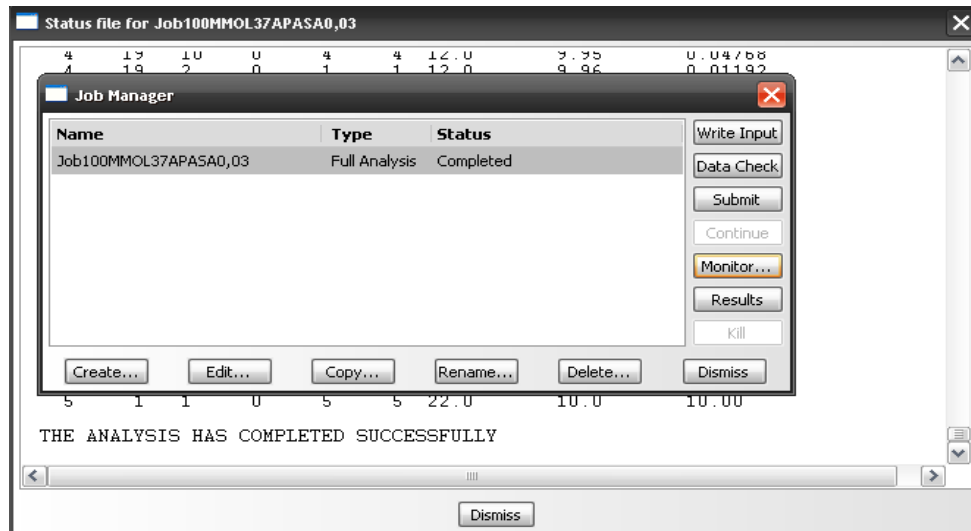
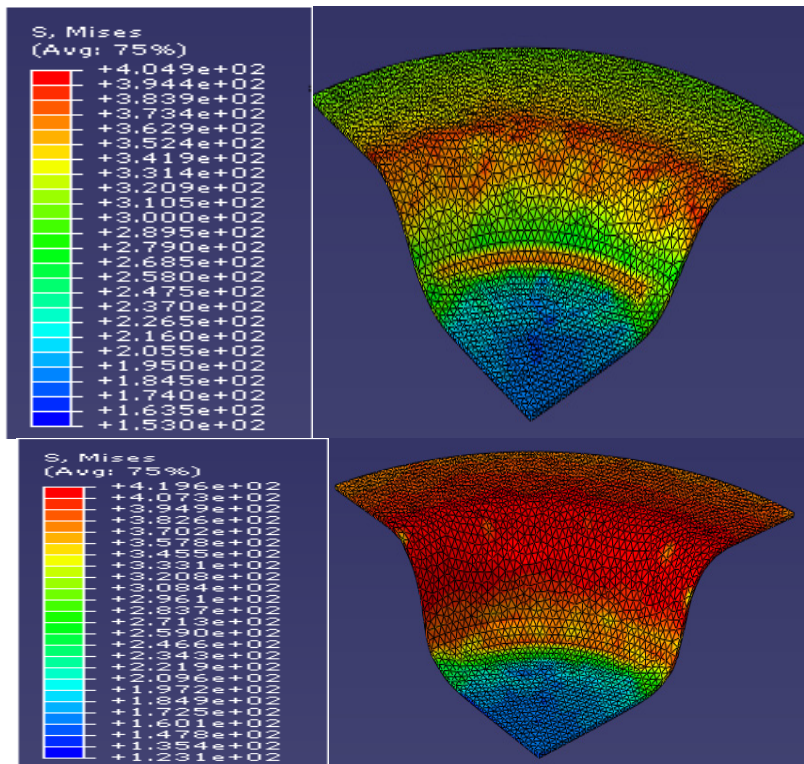
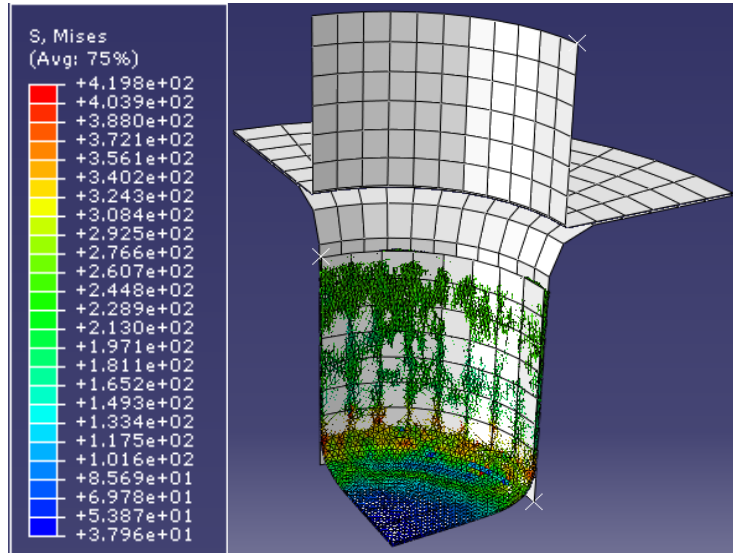


Figura 3.29. Modul de răspuns din partea programului în care finalizează simularea cu succes.

Pentru secțiunea **Vizualization** avem ca interfață exemplul electronic al modelului care oferă în funcție de cerințele pe care le dăm programului, atât rezultate instantanee referitoare la tensiuni, deformații, deplasări spațiale, reacțiuni în elementele active de lucru, cât și posibilități de predicție cu privire la obținerea conformă sau nu a reperului ambutisat înainte de a realiza ambutisarea propriu-zisă, aceasta după interpretarea graficelor și a rezultatelor

Această secțiune oferă vizualizări active instantanee cât și finale cele de final a procesului de ambutisare (un exemplu clar de redarea a tensiunilor instantanee în timpul procesului la diferite adâncimi este prezentat în figura 3.30).



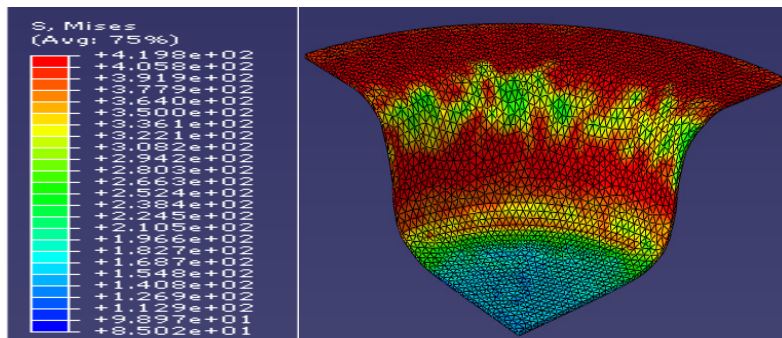


Figura 3.30. Redarea tensiunilor instantanee în timpul procesului la diferite adâncimi

3.2. Concluzii

Modelul numeric este realizat cu elemente numerice de o mare complexitate care redau fenomenele și elementele reale ale ambutisării.

Modelul înregistrează atât tensiunea instantanee cât și deformațiile instantanee, care sunt redade pe imaginile de distribuție al acestora sub forma unui nor tridimensional împrăștiat în tot volumul foii de tablă deformată.

Conform primului subcapitol 3.2.1 sunt redade elemente definitorii despre arhitectura programului cu care se face rularea cât și componența arborelui de lucru cu elementele sale specifice. Tot în acest subcapitol sunt expuse și o serie de modalități de colectare a datelor implicite oferite de program, prin elementele direct răspunzătoare de prelucrarea datelor cu caracter teoretic și informațional sunt secțiunile *Field Output Requests și History Output Requests*

În subcapitolul 3.2.2 se fac o serie de simplificări ale procesului de ambutisare care sunt expuse programului prin intermediul modelului cu ajutorul elementelor declarate proprii programului de ambutisare. Foaia de tablă trebuie introdusă în program ca fiind un element deformabil solid iar elementele active de lucru sunt cunoscute de program ca fiind elemente de tip suprafață nedeformabile.

În secțiunea part s-au definit elementele active sub formă de suprafață și foaia de tablă, respectiv în secțiunea property se face definirea completă a foii de tablă ca și material metalic. În secțiunea assemblz are loc asamblarea elementelor active cu foaia de material pentru a face posibil procesul de ambutisare.

În următorul paragraf se face realizarea contactelor interacționale între elementele active și foaia de material respectiv, setarea etapelor de acțiune a elementelor active de lucru asupra foi de tablă și înmagazinarea în matrice tensoriale a tuturor elementelor implicite redade de program.

Apoi se face discretizarea elementelor active de lucru și a foii de tablă, respectiv are loc impunerea dinamicii (a implementării BCs urilor) procesului real în modelul numeric, prin intermediul condițiilor de stabilitate, de echilibru respectiv celor de acțiune dinamică pentru poanson, inel de reținere și matriță a dispozitivului de ambutisare.

Finalul acestui capitol este dedicat vizualizării rezultatelor obținute în urma rulării modelului numeric, respectiv a elementelor de rezoluție și control a corectitudinii validității simulării numerice.

4. EXEMPLU DE CALCUL AL TENSIUNILOR ȘI DEFORMAȚIILOR UTILIZÂND MODELUL NUMERIC

4.1. Obiective

1. Utilizarea algoritmului de simulare numerică în faza de proiectare a proceselor tehnologice de ambutisare.
2. Determinarea caracteristicilor geometrice, fizice și mecanice reale ale semifabricatului foaie de tablă.
3. Implicarea algoritmului informatic (model numeric) în determinarea tensiunilor și deformațiilor instantanee în regimuri dinamice.

4.2. Ipoteze simplificatoare a procesului de ambutisare privind reducerea dimensionalității elementelor de lucru

În general programele de simulare numerică au o serie de cerințe cu privire la modul de obținere a unui rezultat.

Pentru procesul tehnologic de ambutisarea la rece a foilor de tablă, programul cere o serie de simplificări ale elementelor cu care se realizează procesul de calcul. Programul cuprinde o serie de elemente simple de lucru, pentru elementele care ajută la realizarea procesului și o serie de elemente mai complexe din punct de vedere al simulării.

Prin intermediul programului Abaqus se poate obține o serie de moduri de încărcare cu tensiune a foii de tablă supusă ambutisării sub acțiunea poansonului, a matriței și a inelului de reținere la diferite adâncimi.

Cu ajutorul programului de simulare Abaqus și a studiului bibliografic [7],[125],[8],[9] am reușit să realizez un model în regim statico-dinamic prin care am supus simulării întregul proces de ambutisare la rece.

Modelul implementat în program poate face predicții asupra unor elemente esențiale care concurează la buna desfășurare a procesului de ambutisare. Se reduce considerabil timpul de încercare a ambutisărilor premergătoare proiectării procesului tehnologic de ambutisare și respectiv consumul de metal foaie de tablă (material de sacrificiu) necesar pentru fixarea parametrilor optimi de lucru. De o mare importanță, este și implicarea modelului obținut în mentenanța mașinilor unelte folosite la ambutisări.

Următoarele explicații asupra unor termeni folosiți în programul Abaqus facilitează înțelegerea legăturii lor cu fenomenul real și elementele de calcul utilizate de program.

- „Step” = pas, care implementează mișcarea poansonului în deplasarea lui pe porțiuni de ambutisare cu caracteristici specifice pentru două cazuri: pas de fază tehnologică de ambutisare și pas de avans de la o secțiune studiată la alta
- „Frame” = cadru dinamic, care sunt sume de pași de deplasare suprapuși peste pași temporari de calcul al tensiunilor și deplasărilor pentru care valorile de capăt ale unui pas reprezintă valori de inițializare pentru următorul pas pentru două cazuri: cadru dinamic de calcul între

cadre dinamice de vizualizare cu anumită rezoluție.

Pentru a trece la simularea procesului de ambutisare menționez că toate simplificările introduse în modelul numeric și în programul Abaqus au fost deja expuse pe larg în § 2.1.2. „Elemente de simplificare în modelul numeric și în secțiunile programului pentru procesul de ambutisare adâncă”.

4.2.1. Domenii și condiții limită în faza inițială a simulării procesului de ambutisare

Pentru materiale anizotrope, problema cu ambutisarea unei piesei cilindrice nu este o problemă axisimetrică. Prin urmare, este analizată ca o problemă tridimensională.

Cu toate acestea, din cauza ortotropiei foii de tablă și datorită simetriei geometriei și condițiilor la limită ale celor două axe, doar un sfert din foaie este selectată ca domeniu. Domeniul la momentul $t=0$ împreună cu sistemul de coordonate este arătat în figura 4.1.

Poansonul, matrița și sistemul de prindere de reținere a tablei sunt presupuse rigide.

Condiția de frecare prin lipire este presupusă la interfața poanson-tablă în timp ce frecarea la interfața matriță-tablă este modelată de legea lui Columb. Se presupune că, coeficientul de frecare este în așa fel, încât toate nodurile de la interfața matriță-tablă alunecă până când o pierdere a contactului la interfața poanson-foaie este posibilă, aceasta fiind încorporată în condițiile la limită. [98]

S-a presupus că s-a aplicat suficientă forță la sistemul de prindere (inelul de reținere) pentru a menține contactul la interfața matriță-foaie. Mai mult, forța aplicată sistemului de prindere se presupune a fi distribuită uniform și aplicată în mod incremental.

Condițiile la limită la începutul analizei sunt după cum urmează. Dacă condiția este esențială (condiție care în mod obligatoriu este necesară) sau naturală (face parte din însăși natura procesului) este, de asemenea, menționat pentru fiecare condiție.

Interfața foaie tablă-poanson (suprafața OAB). Așa cum s-a menționat mai devreme, un nod la interfață poate fi în contact cu poansonul sau poate pierde contactul. [98] [1]

Aceasta depinde de natura (de compresiune sau tracțiune) componentei Z a vectorului reacție poanson la nod. Algoritmul pentru a determina starea de contact a nodului este descris în sub-secțiunea următoare.

Atunci când un nod este în contact, condiția de lipire prin frecare se presupune cunoscută dinainte astfel încât x și y componentele vectorului deplasare înlocuite incremental ${}_t\Delta u$ la nod devine 0. Mai mult componenta z a deplasării incrementale ${}_t\Delta u$ trebuie să fie egală cu deplasarea incrementală a poansonului Δu^*

Dacă un nod pierde contactul se aplică pe suprafața liberă condițiile limită, astfel încât toate trei componentele vectorului tensiune ${}_t\Delta t$ devin 0 la nod. Astfel condițiile limită pe suprafața OAB devin:

La nodul de contact:

$${}_t\Delta u_x = 0, {}_t\Delta u_y = 0, {}_t\Delta u_z = \Delta u^* \quad \text{condiție esențială} \quad (4.1)$$

Unde nu este contact pe nod:

$${}_t\Delta t_x = 0, {}_t\Delta t_y = 0, {}_t\Delta t_z = 0 \quad \text{condiție naturală} \quad (4.2)$$

Suprafețele libere sunt ABDCA, EFMLE și GJKG. La o suprafață liberă, toate cele trei componente ale vectorului tensiune incrementală ${}_t\Delta t$ sunt 0 la nod. Astfel, condițiile la limită pe suprafețele ABDCA, EFMLE și GJKG sunt date de condiția naturală unde nu este contact pe nod relația (4.2) [98]

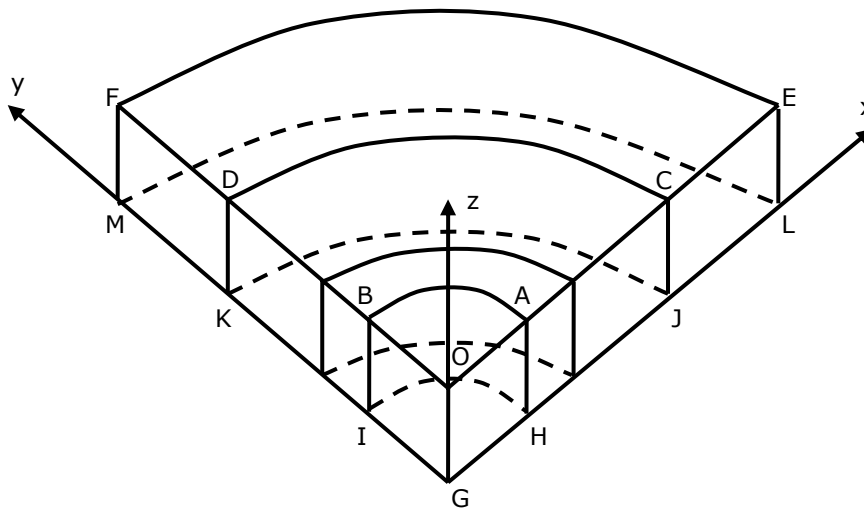


Figura 4.1. Domeniul problemei cu configurarea unui sfert de foaie

La un plan de simetrie componenta normală a vectorului de deplasare incrementală ${}_t\Delta u$ și ambele componente de forfecare ale vectorului de tensiune incrementală ${}_t\Delta t$ sunt 0. Având în vedere că planul OACELJHGO se află în planul xz, condițiile limită pe această suprafață să devin: [98]

$${}_t\Delta t_x = 0, {}_t\Delta t_z = 0 \quad (\text{condiție naturală}) \quad (4.3)$$

$${}_t\Delta u_y = 0 \quad (\text{condiție esențială}) \quad (4.4)$$

Planul de simetrie OBDFMKIGO (y-z în plan): După cum sa afirmat mai sus, la un plan de simetrie, componenta normală a vectorului deplasare ${}_t\Delta u$ și atât elementele componente ale forfecării elementare vectorul tensiune ${}_t\Delta t$ sunt zero.

Având în vedere că planul OBDFMKIGO se află în planul yz, condițiile limită de pe această suprafață sunt date de: [98]

$${}_t \Delta u_x = 0 \text{ (condiție esențială)} \quad (4.5)$$

$${}_t \Delta t_y = 0, {}_t \Delta t_z = 0 \text{ (condiție naturală)} \quad (4.6)$$

La interfața foaie-matriță (JKMLJ) așa cum s-a menționat mai devreme frecarea la interfața matriță-foaie este dată de legea lui Culomb. [98]

Din nou se presupune că toate nodurile de la interfața tablă-matriță alunecă. Apoi magnitudinea tensiunii de frecare (de ex. rezultanta ${}_t \Delta t_x$ și ${}_t \Delta t_y$) devine la interfața frecării $|f({}_t \Delta t_z)|$ unde $({}_t \Delta t_z)$ este componenta normală a vectorului de tensiune implementat ${}_t \Delta t$. Fie θ unghiul generat de tensiunea de frecare cu x axa pozitivă, atunci magnitudinea lui ${}_t \Delta t_x$ și ${}_t \Delta t_y$ devine: [98]

$$|{}_t \Delta t_x| = f|{}_t \Delta t_z| \cos \theta, \quad |{}_t \Delta t_y| = f|{}_t \Delta t_z| \sin \theta \quad (4.7)$$

Reținem că ${}_t \Delta t_z$ este pozitiv la interfață. Mai mult deoarece mișcarea relativă a nodului de contact este în direcția negativă a lui x și y, componentele tensiunii de frecare vor fi în direcțiile pozitive ale lui x și y. Deci ${}_t \Delta t_x$ și ${}_t \Delta t_y$ vor fi pozitive. Prin urmare, condițiile la limită în direcțiile x și y, pe suprafața JKMLJ, vor deveni:

$${}_t \Delta t_x = f({}_t \Delta t_z) \cos \theta, {}_t \Delta t_y = f({}_t \Delta t_z) \sin \theta \text{ (condiție naturală)} \quad (4.8)$$

A treia condiție limită este dată de presupunerea că este aplicată suficientă forță asupra inelului de reținere a tablei pentru a se menține contactul foii cu matrița. Apoi componenta normală (de exemplu componenta z) a vectorului deplasare incrementală ${}_t \Delta u$ trebuie să fie zero la interfață. Deci condiția limită în direcția z pe suprafața JKMLJ este dată de:

$${}_t \Delta u_z = 0 \text{ (condiție esențială)} \quad (4.9)$$

La suprafața de contact cu inelul de reținere, (CDFEC) forța dispozitivului de prindere (inelului de reținere a foii) este aplicată pe porțiunea CDFEC pe suprafața superioară a foii. Așa cum s-a menționat mai devreme se presupune că forța exercitată pe inelul de reținere este uniform distribuită și aplicată în mod incremental.

$${}_t \Delta t_x = 0, {}_t \Delta t_y = 0, {}_t \Delta t_z = \Delta t^* \text{ (condiție naturală)} \quad (4.10)$$

unde Δt^* este valoarea specificată a forței incrementale a inelului de reținere. pe unitatea de suprafață. [98]

4.2.2. Schimbări în condițiile limită, odată cu mișcarea poansonului

Pe măsură ce poansonul se mișcă în jos, câteva noduri sub suprafața dispozitivului de prindere sau a inelului de reținere se mișcă în afara dispozitivului de prindere și devin libere.

De asemenea o serie de noduri de pe suprafața matriței se mișcă către zona razei matriței. Mai mult câteva noduri pe suprafața ABDCA se mișcă către zona razei poansonului. De aceea condițiile limită ale acestor noduri trebuie să fie schimbate la sfârșitul creșterii, ori de câte ori este necesar.

Pentru a facilita upgradarea acestor condiții limită, suprafețele de sus și de jos a foii sunt împărțite în regiuni cu condiții la limită aceleași așa cum se arată în figura 4.2. [98] Nodurilor pe suprafețele de sus și de jos se atribuie un cod în funcție de regiunea în care se află. În cazul în care, la sfârșitul unei creșteri speciale, un nod trece de la o regiune la regiunea vecină, codul este schimbat în mod corespunzător. [1]

Pe măsură ce poansonul se mișcă în jos, câteva noduri de pe suprafața ABDCA penetrează fie regiunea profilului razei poansonului, fie regiunea peretelui poansonului. [98]

La fel câteva noduri de pe suprafața GJKG penetrează foaia peretelui matriței în regiunea profilului razei matriței. De aceea penetrarea acestor noduri este verificată la sfârșitul fiecărei creșteri. Dacă un nod de pe aceasta suprafață este găsit să penetreze, întreaga creștere se repetă după atribuirea creșterii deplasării cerute la nod, astfel încât să fie adus înapoi la poanson sau la profilul matriței în funcție de caz.

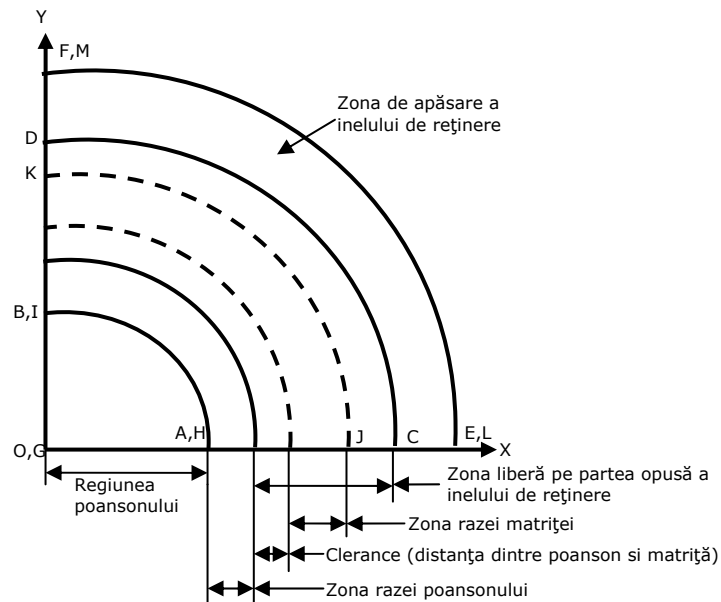


Figura 4.2. Diviziunea suprafețelor de sus și de jos ale tablei în funcție de condițiile limită

Procedura de calculare a deplasării cerute în cazul penetrării în regiunea profilului razei poansonului este explicată mai jos.

Să presupunem că un nod P la finalul unor creșteri, penetrează în poziția P_1 cum se vede în figura 4.3. [98]

Pentru a împiedica penetrarea, locația actuală a nodului ar trebui să fie la P_1^* (obținut prin extinderea poziției vectorului r de la punctul P_1 la profilul poansonului). Deci, la sfârșitul creșterii (penetrării) în primul rând gradul de penetrare se verifică comparând r (de ex. magnitudinea poziției vectorului r) cu profilul razei poansonului. Dacă $|r|$ se constată a fi mai mic decât profilul razei poansonului, înseamnă că nodul a penetrat regiunea profilului razei poansonului. Atunci creșterea se repetă, specificând vectorul PP_1^* ca vector de creștere a deplasării nodului. Similar se procedează dacă un nod penetrează fie peretele poansonului, fie regiunea profilului razei matriței, sau peretele matriței. [110]

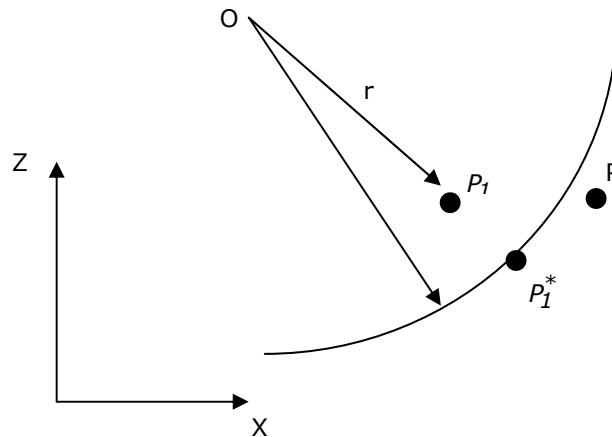


Figura 4.3. Penetrarea de către nod a regiunii profilului razei poansonului

4.2.3. Condițiile limită la matriță și poanson în regiunea profilului razei poansonului

Când un nod pe suprafața matriței se mișcă către regiunea profilului razei matriței, condițiile limită (ecuațiile 4.8 și 4.9) se modifică din cauza schimbării poziției solicitării pe direcțiile normală și tangențială. [98], [7]. Noi încă presupunem că frecarea la interfața matriță-foaie este dată de legea lui Coulomb și coeficientul de frecare f este în așa fel încât toate nodurile la interfața matriță-foaie alunecă. Fie \hat{n} direcția normală la profilul matriței și vectorul \hat{s} și vectorul \hat{t} cele două direcții tangențiale la profilul matriței (figura 4.9). Mai mult, fie ${}_{t}\Delta t_n$, ${}_{t}\Delta t_s$ și ${}_{t}\Delta t_t$ componentele vectorului de tensiune incremental ${}_{t}\Delta t$ de-a lungul direcțiilor vectorilor \hat{n} , \hat{s} și \hat{t} . Deoarece mișcarea relativă a unui nod de contact este de-a

lungul direcției negative a vectorului \hat{s} , forța de frecare acționează de-a lungul direcției pozitive \hat{s} . De aceea componenta vectorului tensiune incrementală ${}_t \Delta t$ de-a lungul vectorului \hat{t} trebuie să fie 0. [98]

Mai mult, componentele ${}_t \Delta t_s$ și ${}_t \Delta t_n$ trebuie să fie legate de legea lui Coulomb. Deci condițiile limită de frecare la un nod pe profilul razei matriței conduc la următoarele două condiții:

$${}_t \Delta t_s - f({}_t \Delta t_n) = 0, \quad {}_t \Delta t_t = 0 \text{ (condiție naturală)} \quad (4.11a)$$

Prima parte a ecuației 4.11 se bazează pe faptul că ambele: tensiunea de frecare ${}_t \Delta t_s$ și ${}_t \Delta t_n$ tensiunea normală sunt pozitive. [110]

A treia condiție limită este demonstrată de ipoteza că nodul rămâne în contact cu matrița. Atunci, componenta vectorului de creștere a deplasării ${}_t \Delta u$ de-a lungul

direcției normale \hat{n} trebuie să fie 0. Apoi a treia condiție limită devine:

$${}_t \Delta u_n = 0 \text{ (condiție esențială)} \quad (4.11b)$$

În sistemul de coordonate x, y, z , ecuațiile 4.11a,b pot fi exprimate astfel:

$${}_t \Delta t_x (\cos \theta \cos \varphi + f \cos \theta \sin \varphi) + {}_t \Delta t_y (\sin \theta \cos \varphi + f \sin \theta \sin \varphi) + {}_t \Delta t_z (\sin \varphi + f \cos \varphi) = 0$$

$$+ {}_t \Delta t_z (\sin \varphi - f \cos \varphi) = 0$$

$$-{}_t \Delta t_x \sin \theta + {}_t \Delta t_y \cos \theta = 0 \text{ (condiții naturale)} \quad (4.12a)$$

$$-{}_t \Delta u_x (\cos \theta \sin \varphi) - {}_t \Delta u_y (\sin \theta \sin \varphi) + {}_t \Delta u_z (\cos \varphi) = 0 \text{ (condiție esențială)} \quad (4.12b)$$

unde unghiurile θ și φ sunt definite în figura 4.4. La interfața între foaie și regiunea profilului razei poansonului, un nod poate fi în contact cu poansonul sau poate pierde contactul cu acesta. [110] Depinde de natura (compresiune sau tracțiune) a componentei normale a vectorului de reacție a poansonului la nod. Algoritmul de determinare a stării de contact a nodului este descris în sub-secțiunea următoare. Când un nod este în contact, condiția de lipire la frecare se presupune a fi după cum s-a menționat mai devreme. De aceea condițiile limită la regiunea profilului razei poansonului rămân aceleași ca în ecuațiile 4.1 și 4.2.

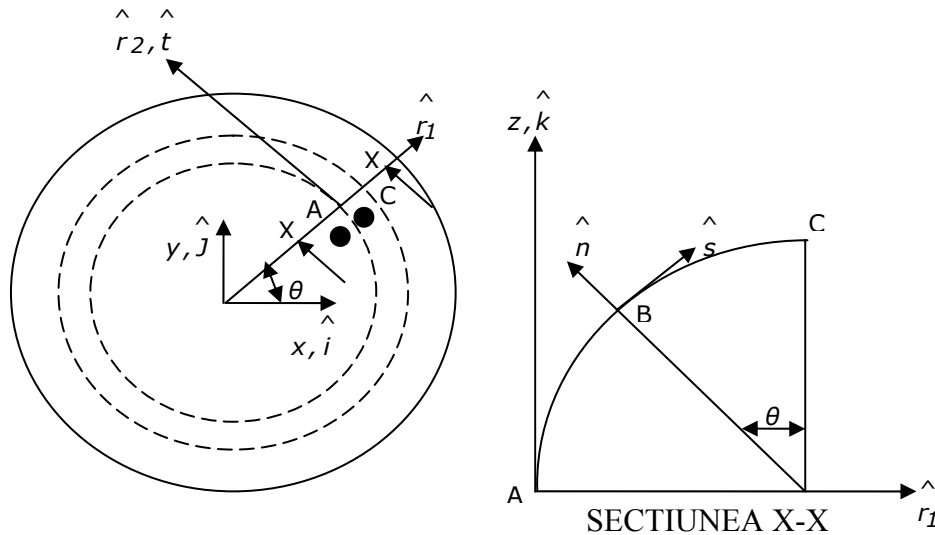


Figura 4.4. Normala și două direcții tangențiale la regiunea profilului razei matriței

4.2.4. Algoritm de contact

În primul rând, pentru deplasarea incrementală a poansonului și a forței incrementale a inelului de reținere a tablei, iterațiile de contact sunt efectuate pentru a determina starea (de contact sau fără contact) nodurilor interfeței foaie poanson. Apoi iterații Newton-Raphson sunt efectuate pentru a minimiza vectorul forță ne-echilibrată. Algoritmii în trepte pentru iterațiile de contact pot fi descrise după cum urmează: [98]

1. Prima iterație de contact.

În prima iterație se presupune că toate nodurile interfeței poanson-foaie sunt în contact. Deci condițiile limită de contact date de ecuațiile (4.12a) și (4.12b) se aplică la toate nodurile interfeței, conform ecuațiilor 4.1 și 4.2. Apoi vectorul incremental al reacției nodale se află multiplicând coeficientul inițial al matricei cu vectorul forței externe globale ${}^{t+\Delta t}\{F\}_{ex}$. Apoi vectorul reacției nodale este updatat. Acest vector nu este altul decât vectorul forței externe globale ${}^{t+\Delta t}\{F\}_{ex}$. La sfârșitul primei iterații de contact, nodurile non-contact sunt identificate utilizând următoarea condiție: Un nod la interfață iese din contact în cazul în care componenta normală a vectorului reacție nodal la acel nod devine tracțiune. Pentru un nod l pe porțiunea plană din partea de jos a poansonului, componenta normală a vectorului de reacție nodal devine tracțiune dacă $({}^{t+\Delta t}F_{ex})_{Iz} > 0$ unde $({}^{t+\Delta t}F_{ex})_{Iz} > 0$ este componenta z a vectorului ${}^{t+\Delta t}\{F\}_{ex}$ la nodul l . Pentru nodurile din regiunea profilului razei poansonului, componenta normală va fi o combinație liniară a $({}^{t+\Delta t}F_{ex})_{Iz}$ și $({}^{t+\Delta t}F_{ex})_{Ir}$ componenta r a vectorului ${}^{t+\Delta t}\{F\}_{ex}$ la nodul l .

2. A doua iterație de contact.

Acum condiția limită fără contact (ecuația 5.2) se aplică la toate nodurile. Apoi noul vector ${}^{t+\Delta t}\{F\}_{ex}$ este găsit prin metoda descrisă mai sus. În cele din urmă, se face o verificare pentru a afla dacă orice nod suplimentar pierde contactul utilizând condițiile menționate mai sus.

3. Iterații de contact suplimentare.

A doua iterație de contact este repetată până când nu mai are loc nici o modificare în starea de contact dintre două iterații de contact succesive.

Trebuie precizată o problemă foarte importantă, aceea a tipurilor de solicitări și a modului de acțiune a acestora asupra foii de tablă.

În zona inelului de reținere nodurile care se află în contact cu matrița se supun aceluiași reguli de acțiune a forțelor ca și cele de sub inelul de reținere.

Cele din zona peretelui reperului respectă și se supun iterației numărul 2.

Elementele din reper rezultate în timpul discretizării foii de tablă aflate în zona inelului de reținere, sunt supuse la o solicitare compusă de compresiune din partea inelului de reținere și a matriței respectiv de tracțiune din partea poansonului.

Elementele reperului obținute în urma discretizării foii de tablă care se află în zona razei matriței sunt supuse la o solicitare compusă de încovoie din partea razei matriței și cu tracțiune de-a lungul razei matriței din partea poansonului.

Elementele reperului obținute în urma discretizării foii de tablă care se află în zona de formare a peretelui reperului între poanson și matriță sunt supuse la o solicitare de tracțiune din partea poansonului a matriței, respectiv a inelului de reținere

Elementele reperului obținute în urma discretizării foii de tablă care se află în zona razei poansonului sunt supuse la o solicitare compusă de încovoie din partea poansonului și compresiune de-a lungul razei poansonului din cauza geometriei razei acestuia. Elementele reperului obținute în urma discretizării foii de tablă care se află sub poanson sunt supuse la compresiune din partea poansonului

4.2.5. Descrierea modelului implementat în procesul de ambutisare

Conform studiilor de până acuma, studiul tensiunilor și a deplasărilor simple din punct de vedere static sunt verificate cu un program de simulare.

Ce este foarte dificil în studiul tensiunilor și a deplasărilor, este de a realiza un model viabil de simulare pe baza unui proces complex în care starea de tensiune este una spațială (tridimensională) și solicitările sunt combinate de genul încovoie cu întindere, compresiune cu întindere.

Modelul implementat de mine în cazul procesului de ambutisare adâncă la rece este unul amplu și are o mărime considerabilă, pentru care în acest capitol voi face doar o prezentare succintă a etapelor și a pașilor implementați urmând ca teza să conțină și o anexă unde este totul detaliat despre acest model.

Modelul lucrează cu elemente foarte multe de tip tetraedric, elemente care sunt încadrate sub formă de matrice tensoriale.

Programul în care s-a rulat modelul de simulare este ABAQUS varianta 6-8.1 și impune modelului implementat de mine o serie de 10 secțiuni de parametrii. Modelul de fapt este construit pe cerințele programului în fiecare secțiune cerută de acesta. Cele zece secțiuni sunt: *part*, *property*, *assembly*, *step*, *interaction*, *load*, *mesh*, *job*, *visualization* și nu în ultimul rând *sketch* secțiune care în model nu se mai folosește deoarece este inclusă în secțiunea **part**. [1] În prima secțiune

intitulată **part** se construiește modelul 3D al elementului supus simulării, în cazul nostru foaia de tablă așa cum o arată figura 4.5.

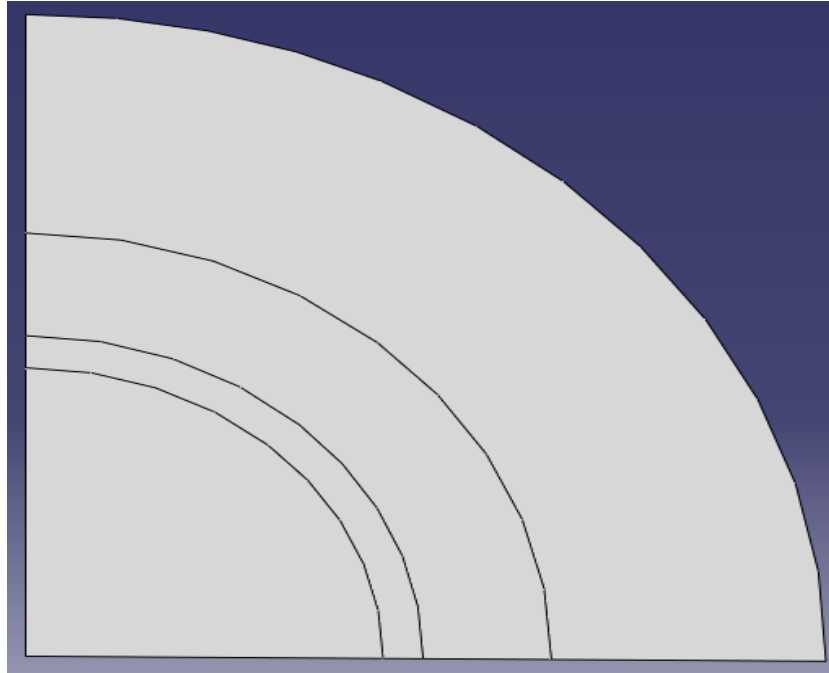


Figura 4.5. Foaia de tabla 3D supusă deformării prin ambutisare

În secțiunea a doua **property** se aplică foi de tablă sub forma simplificată 3D, materialul metalic. Aplicarea materialului metalic se face prin alte două subsecțiuni *elastic și plastic* din cadrul secțiunii *material behaviors*. În secțiunea elastic se iau în calcul modulul lui Young pentru OL37 acesta fiind materialul foi de tablă și respectiv tot în subsecțiunea elastic din material behaviors se mai ia în calcul și coeficientul lui Poisson 0,33. În subsecțiunea plastic se introduc datele pentru σ și ε obținute în urma unei încercări la tracțiune a unei bare standardizate din materialul OLC 10.

Pentru determinarea lui σ și ε s-a luat o lamelă de 10 mm lățime de OLC10 și lungime 200 mm și a fost supusă la tracțiune pe mașina de tracțiune TC 100 figura 4.6.



Figura 4.6. Mașina de tracțiune TC 100

În urma încercării de tracțiune până la ruperea epruvetei pe mașină, cu ajutorul unui sistem de achiziție a datelor (un computer) s-a obținut un grafic σ funcție de ε numit curbă caracteristică, figura 4.7.

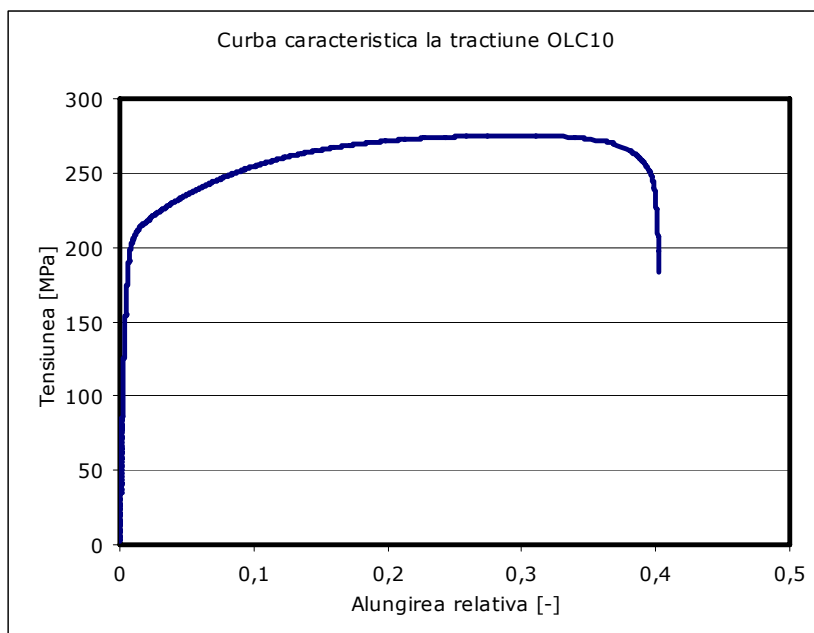


Figura 4.7. Curba caracteristică convențională OLC10

De pe această curbă caracteristică s-au luat un număr de 49 de valori pentru 49 de puncte de pe curbă la diferite poziții pentru σ și ε , valori care au fost introduse în sub-secțiunea plastic din modelul implementat.

Urmează apoi în secțiunea **assembly** după cum am arătat și în subcapitolul 4.2 expunerea procesului de ambutisare sub formă simplificată.

Pentru a elimina o serie de timpi morți ai producției, timpii de apropiere și de calare a distanței față de foaia de tablă, s-a trecut la studiul procesului de ambutisare din momentul în care foaia are contact de atingere cu elementele active de lucru ale mașinii de ambutisat.

Se pune condiția ca atât poansonul, matrița cât și inelul de reținere să fie deja în contact de atingere cu foaia de tablă, condiție necesară și pentru a putea parametriza secțiunea **interaction**. Condițiile altfel îndeplinite împreună cu ipotezele simplificatoare acordate ansamblului și tratate în capitolul 4.2 sunt arătate în figura 4.8.

În secțiunea **Step** se fixează incrementele pentru vectorii deplasare incrementală, respectiv tensiunile și deplasările obținute pe traseul de ambutisare, respectiv o serie de parametrii de deplasare, de măsură și de centralizare a datelor. Această secțiune este foarte importantă și are o mare implicare în desfășurarea modelului, s-ar putea spune că joacă și rol de filtru al încercărilor de realizare cât mai apropiate de realitate.

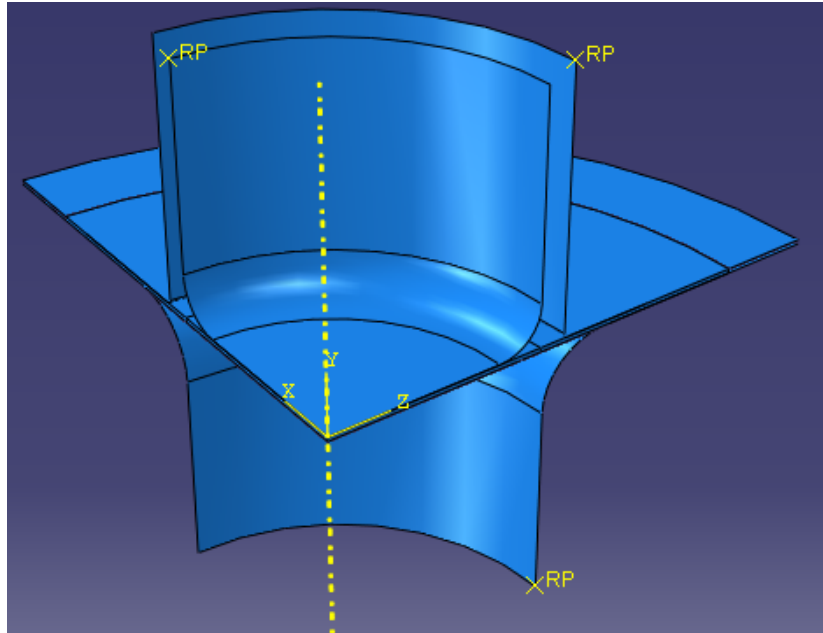
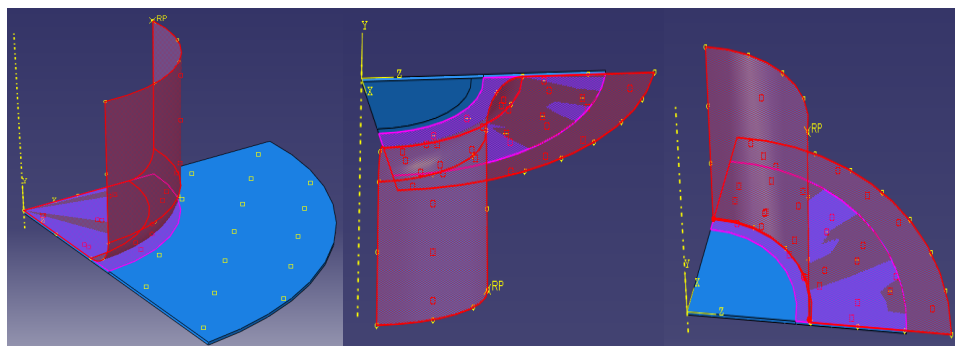


Figura 4.8. Prezentarea secțiunii assembly din cadrul modelului de simulare implementat

Secțiunile următoare **interaction** și **load** tratează deja modul de acțiune a elementelor active din ansamblu poanson, matriță și inel de reținere, reacțiunile foii de tablă și modul cum evoluează tensiunile și deplasările în corpul materialului foii de tablă. În secțiunea **interaction** se prezintă modul de acțiune a elementelor active, zonele de intrare în interacțiune a poansonului, matriței, inelului de reținere cu foaia de tablă la diferite momente din cadrul procesului de ambutisare. Zonele de apăsare în cadrul procesului de ambutisare și zonele de reacțiune ale foii de tablă sunt prezentate în figura 4.9. Tot în figura 4.9 sunt redată și zonele de interacțiune trei la număr. Acestea sunt: zona de interacțiune foaie de tablă-poanson, foaie de tablă-matriță și respectiv foaie de tablă-inel de reținere. În cadrul modelului programul ABAQUS se impune ca elementele active care duc la realizarea unui anumit proces să fie considerate ca elemente master, iar celelalte elemente care fie se deformează, fie că se exercită o anumită tensiune asupra lor sunt considerate elemente slave. *Elementele master sunt elemente după care sau care concură la finalizarea procesului supus simulării.* În figura 4.9 a,b,c se observă cele trei interacțiuni dintre foaia de tablă și elementele active cu regiunile slave și master definite. În interacțiunea poanson-foaie de tablă poansonul concretizat printr-o suprafață rigidă este master, iar zona de pe foaia de tablă de sub poanson unde acesta acționează este slave. Regiunile master vor fi colorate în roșu iar cele slave în mov deschis. La fel și în celelalte interacțiuni stabilite de genul foaie de tablă-matriță și foaie de tablă-inel de reținere zonele elementelor active de lucru vor fi master, iar celelalte de pe foaia de tablă corespunzător apăsării în zona respectivă vor fi slave, așa cum arată și figura 4.9 a,b,c.



a) poanson-foaie tablă b) matriță-foaie tablă c) inel reținere-foaie tablă

Figura 4.9. Principalele acțiuni ale elementelor active în timpul procesului de ambutisare

Secțiunea load este indirect realizată de către program prin intermediul modelului, deoarece încărcările pe sculele active ale procesului s-au obținut prin deplasări impuse ale sculelor prin intermediul punctelor rigidizate, care fac parte din element la construcția acestuia. În modelul din anexă această secțiune este detaliată mai pe larg în secțiunea deplasărilor sculelor active (BCS). În secțiunea **mesh** se realizează discretizarea elementelor active și a foii de tablă (împărțirea matriței și a poansonului cât și a foii de tablă). Sculele de lucru se discretizează în elemente quadratice care sunt elementele discretizării pentru sculele active ele fiind nedeformabile. Pentru foaia de tablă, fiind element deformabil care trebuie să se deformeze, discretizarea se va face sub forma elementelor tetraedrice. Ansamblul discretizat în elementele corespunzătoare fiecărui tip sunt redată în figura 4.10.

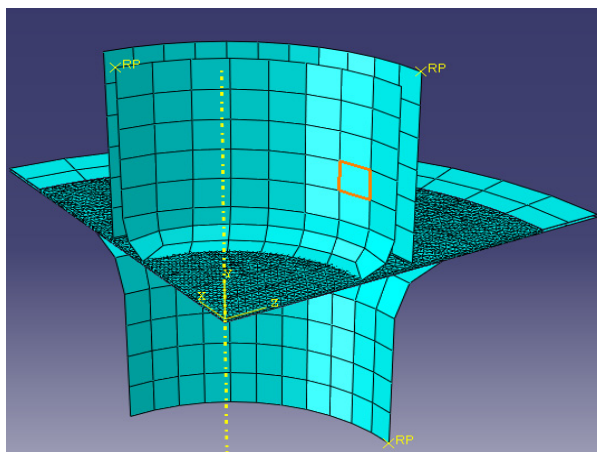


Figura 4.10. Ansamblul procesului de ambutisare la rece discretizat în elementele mesh

Secțiunile **job** și **vizualization** sunt secțiuni ale programului prin care se rulează simularea procesului în secțiunea job iar în secțiunea vizualization se observă rezultatul simulării.

În secțiunea job modelul poate ceda, adică simularea să se oprească și să

semnalizeze o serie de erori, fie datorită unor probleme sau neajunsuri care le-ar avea modelul, rezultând erori cu trimitere la o serie de secțiuni din program sau erori în care foaia de tablă se rupe sau apar o serie de fisuri mari concentratoare de tensiune.

Dacă simularea ajunge la un final se poate face mesajul **este de complet succesful**. Acest mesaj s-a obținut la un număr de 70 de simulări cu diferiți parametri din 120 de simulări totale realizate.

Conform literaturii de specialitate, locul cel mai periculos al piesei este zona de trecere de la fund la pereți, datorită micșorării însemnate a grosimii în acest loc, unde acționează eforturi de întindere mari [107]. Ca și cheie de control a validității modelului implementat de mine este și această informație [107] pe lângă experimentul implementat în capitolul 5. După cum se observă în figura 4.16 zona tensionată apare în zona imediat apropiată a razei de la fundul piesei ambutisate.

Finalitatea simulării este încununată de secțiunea **vizualization** în care este redată vizual distribuția tensiunilor și deformațiilor așa cum este arătat în figura 4.11.

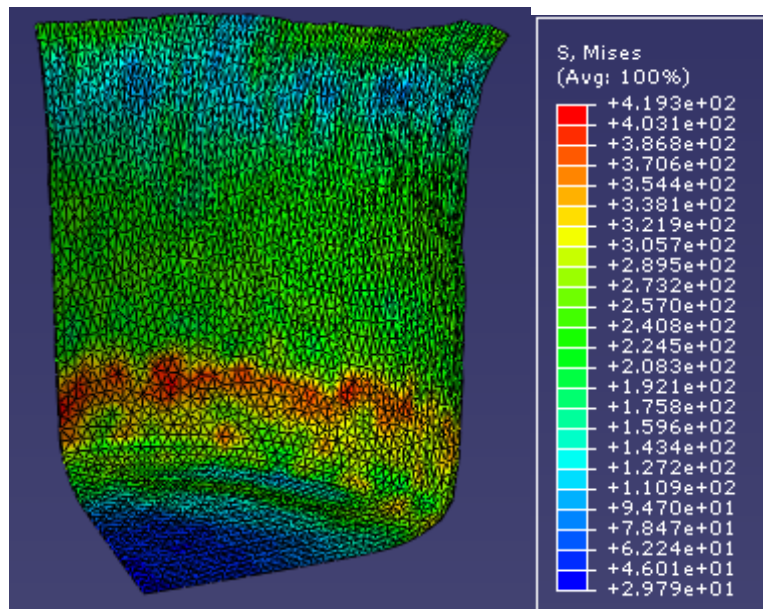


Figura 4.11. Modul de variație și distribuție a tensiunii la finalul ambutisării cilindrice la rece

4.2.6. Lubrifierea la ambutisare

În cazul de față sub acțiunea forței de apăsare a elementului de reținere se mărește forța de tracțiune în peretele piesei ambutisate tensiunile în foaia de tablă cresc deformațiile sunt mai pronunțate forțele de frecare între matriță și foaia de tablă foarte mare. Astfel prezența micro-fisurilor pe suprafața produsului finit din tablă a apariției zgârieturilor respectiv a lipirii foii de tablă nu pregetă să apară în lipsa lubrifierii. Din aceste considerente se pune problema lubrifierii suprafeței de aderență între matriță și foaia de tablă respectiv poanson și inel de reținere.

Lubrifiantii utilizați pentru ungere la ambutisare trebuie să îndeplinească următoarele condiții: să formeze o peliculă rezistentă și uniformă la presiuni mari în procesul de ambutisare, să nu se vaporizeze sau să își schimbe proprietățile la temperaturile care se creează în procesul de lucru [19] (pentru aliajele de titan de exemplu se creează temperaturi de 300-350°C). Să prezinte o stabilitate chimică bună să fie ușor de înlăturat de pe suprafețele de lucru. Dintre toate proprietățile lubrifianților cea mai importantă este capacitatea portantă a lubrifianțului deoarece ea asigură continuitatea peliculei de lubrifiant. Cercetările efectuate au evidențiat că viteza de deformare la ambutisare influențează în mod relativ puternic comportarea stratului de lubrifiant. Astfel există părerea că ambutisarea s-ar face fără dificultăți la viteze mari de deformare, dar că acestea sunt limitate de scăderea rezistenței peliculei de ungere.

În producție în funcție de condițiile de ambutisare se utilizează lubrifianți cu diferite compoziții [107] care pot fi împărțiți în două tipuri : lubrifianți cu adaosuri și fără adaosuri. Cele mai bune rezultate le-au dat lubrifianții cu adaosuri de grafit și talc care reduc coeficientul de frecare de două trei ori și sporesc durabilitatea matrițelor de 3-6 ori față de lubrifianții fără adaosuri. Un lubrifiant foarte bun și care a dat rezultate bune în producție este un ulei care are următoarea compoziție uleiului pentru axe 43% grăsime de pește 8% grafit 15% acid oleic 8% sulf 5% apă 15%

Pentru că este greu să se ungă partea semifabricatului care intră în contact cu placa de ambutisare și cu elementul de reținere se procedează la ungerea semifabricatului pe partea opusă acestora adică pe partea cu matrița și poansonul. În același scop se procedează și la ungerea suprafețelor active din componența matriței care intră în contact de frecare cu semifabricatul (foaia de tablă).

4.2.7. Fenomene întâlnite în procesul de ambutisare

În procesul deformării plastice la ambutisare are loc - în anumite condiții un fenomen puternic de ecruisare a materialului prelucrat prin care crește rezistența mecanică și scade plasticitatea și tenacitatea acestuia.[19]

Ecruisarea materialului depinde de mulți factori cum ar fi: proprietățile fizico-mecanice ale foii de material, starea în care acesta se află gradul de deformare , mărirea grăunților cristalini, gradul de deformare realizat anterior ambutisării precum și cel realizat de ambutisare, geometria elementelor active ale matriței plus mulți alți factori constructivi cum ar fi razele de racordare ale plăcii și ale poansonului precum și jocul dintre poanson și placa activă. Apariția fenomenului de ecruisare reduce capacitatea metalelor de a se deforma plastic dar nici metalele care se ecruisează puțin nu sunt bune deoarece au o rezistență mecanică scăzută.[19]

Metalele folosite des în ambutisări sunt OLC 10, OLC 15 alamă aluminiu recopt printre ele se poate folosi și OL37 având o curbă de curgere foarte bună.

Un al doilea fenomen este cel de cutare sau încrețire fenomen care se datorează lipsei de apăsare a elementului de reținere sau a apăsării insuficiente a acestuia asupra foii de tablă.

În continuare așa cum s-a prezentat mai sus un mod de a evita pe cât posibil ecruisarea cât și în oarecare măsură cutarea foii de tablă ar fi și considerentul constructiv jocul dintre poanson și elementele active ale matriței și razele de racordare. În cazul ambutisării fără subțiere condiționată a grosimii semifabricatului mărirea jocului dintre poanson și placa de ambutisare depinde de valoarea nominală și toleranță grosimii materialului, tehnologia de ambutisare și forma și materialul pieselor ambutisate. Jocul trebuie să fie foarte bine calibrat

74 Exemplul de calcul al tensiunilor și deformațiilor utilizând modelul numeric-4

deoarece la o valoare prea mică jocului dintre poanson și placa activă duce la creșterea rezistenței materialului la ambutisare deci la mărirea tensiunilor de întindere în zona periculoasă ceea ce poate provoca ruperea materialului. Pentru piesele cilindrice la ambutisarea cu calibrare, ulterioară a produsului finit în funcție de precizia descrisă la diametrul exterior al piesei jocul unilateral se poate alege din tabelul de mai jos tabelul 4.1 [19]

Tabelul 4.1. Alegerea jocului unilateral pentru ambutisarea pieselor cilindrice care se supun ulterior calibrării fără subțiere

Material	Mărimea jocului la prima operație	Mărimea jocului la operațiile intermediare	Mărimea jocului la calibrare
Oțel moale	(1.3-1.5)g	(1.2-1.3)g	1.1g
Alamă, aluminiu	(1.3-1.4)g	(1.15-1.2)g	1.1g

De o mare influență în ambutisare sunt și razele de racordare și dimensiunile elementelor active [19]. Valoarea razei de racordare r_{pi} a muchiei active a plăcii de ambutisare și a poansonului are o mare influență asupra: valorii coeficientului admisibil de ambutisare, tensiunilor din materialul ambutisat și a forței de ambutisare și aspra formării cutelor.

Astfel micșorarea razei de racordare duce la mărirea tensiunilor radiale de tragere a semifabricatului deci la creșterea forței de ambutisare. Mărirea razei de racordare r_{pi} duce la micșorarea eforturilor în secțiunea periculoasă, mărirea adâncimii de ambutisare dar totodată duce la posibilitatea formării cutelor ca urmare a micșorării suprafeței semifabricatului de sub inelul de reținere.

În cazul general pentru ambutisarea pieselor cilindrice raza de racordare a a muchiei active a poansonului se stabilește în funcție de grosimea materialului, grosimea relativă a semifabricatului ($100 g/D = 1$) și coeficientul de ambutisare m_1 .

Raza de racordare se calculează cu relația:

$$r_{pi} = k_{pi} \cdot g \quad (4.13)$$

Unde k_{pi} este un coeficient care este redat in tabelul 5.3 pentru cazul ambutisării

pieselor fără flanșă. Coeficientul de ambutisare $m_1 = \frac{50}{100} = 0.5$ se încadrează în valorile din tabelul 5.2 respectiv valoarea coeficientului mai sus amintit are valoarea 10.

Tabelul 4.2 Valorile coeficientului k_{pi} pentru calculul razei de racordare a plăcii active la ambutisarea pieselor cilindrice

	Coeficientul k_{pi} pentru grosimea relativă $\frac{g}{D} \cdot 100$ a semifabricatului					
	3	2	1.5	1	0.5	0.25
$m_1 = 0.45 \dots 0.50$	5	6	8	10	12	14
$m_1 = 0.55 \dots 0.62$	3	4	5	6	8	10

Așa cum se observă din tabelul 5.2 pentru valoarea grosimii relative de 1 și coeficientul de ambutisare $m_1 = 0.45...0.50$, $m_1 = 0.50$ valoarea lui k_{pi} este 10. Aplicând formula r_{pi} raza de racordare este și ea 10 mm.

4.3. Calculul numeric al tensiunilor și al deformațiilor

În acest capitol se prezintă o serie de elemente calculate teoretic prin mijloace informatice (ABAQUS), în special tensiunea în toate elementele de discretizare a foii de tablă și deformația foii de tablă în toate fazele de ambutisare pe un sfert de sector de tablă ambutisată (din motive de capacitate informatică de prelucrare a datelor, a tehnicii informatice avute la dispoziție).

Parcurgând etapele modelului implementat, în urma prelucrării datelor teoretice inițial introduse în program, legate de simulare, s-au obținut o serie de distribuții de tensiuni și deformații instantanee în toată suprafața deformată a tablei semifabricatului, funcție de adâncimea de ambutisare, la adâncimi succesive ale pătrunderii poansonului în cavitatea forme de ambutisat, începând cu deformarea tablei de ambutisat și terminând cu finalizarea procesului de ambutisare la parcurgerea totală a adâncimii de ambutisat făcute de program.

Pașii de program sunt faze tehnologice ale ambutisării, având în vedere că procesul este unul dinamic, și se referă la realizarea echilibrării și a recalibrării modelului precum și a tensiunilor reziduale datorate inerției procesului.

În pașii 1, 2 și 3 ale programului informatic de calcul care sunt faze tehnologice premergătoare ambutisării propriu-zise, au loc în ordine următoarele:

- aducerea poansonului din poziția inițială, în cea de pregătire a ambutisării (pasul 1)
- aducerea poansonului în contact tangențial cu foaia de tablă (pasul 2)
- realizarea pretensionării tablei și impunerea pasului de avans (pasul 3)

Singurul pas din model care ne poate oferi o imagine cât mai apropiată de realitate este pasul 4 în care modelul realizat și rulat sub acțiunea programului Abaqus 6.8-1 redă o serie de moduri de distribuție pe toate nodurile, a tensiunilor instantanee, a deplasărilor și a modului de propagare a variațiilor de tensiuni prin foaia de tablă, pentru diferite adâncimi de ambutisare. Nu în ultimul rând, modelul redă și graficele aferente acestor distribuții.

În pașii 5 și 6 ale programului informatic de calcul care sunt faze tehnologice finale ale ambutisării, se face echilibrarea procesului de ambutisare, adică redarea tensiunilor instantanee pe model, după ce are loc încetarea acțiunii dinamice a tuturor elementelor active implicate în model.

În ceea ce privește studiul stării de tensiune în timpul ambutisării propriu-zise, s-au obținut o serie de distribuții de tensiuni instantanee pentru fiecare secțiune critică setată de modelul rulat, care au evoluție dinamică, în stricta corelație cu adâncimea de pătrundere a poansonului. Simularea procesului de ambutisare s-a desfășurat pe o adâncime de 90 mm, adâncime la care foaia de material metalic s-a deformat total prin ambutisare.

Programul a împărțit adâncimea totală de 90 mm în 28 de secțiuni critice, în care tensiunea a cunoscut o modificare esențială ca mărime denumite la rândul lor tensiuni critice.

Ansamblul și inițializarea unei noi modificări a forme de tablei, împreună cu durata de calcul etapizat prin pași de timp alocați calculului, în care tensiunea a cunoscut o modificare esențială ca mărime și durată, și atingerea acestor tensiuni critice este denumită de program „frame” sau secțiune critică. În secțiunile critice,

tensiunea pe alocuri se apropie foarte mult de tensiunea de rupere a materialului, doar că menținerea în timp a tensiunii este foarte mică.

Aceste secțiuni critice cu tensiuni critice, sunt un rezultat de calcul al programului ABAQUS, în funcție de durata procesării „frame”-ului sau secțiunii critice. Finalizarea unui „frame” ne dă informația importantă privind tensiunea înregistrată într-o secțiune critică și gradul ei de pericolozitate privind fisurarea sau ruperea materialului dacă:

- e apropiata de cea de rupere sau
- este sau nu de rupere.

Tensiunile curente și secțiunile în care acestea se manifestă, cuprinse între tensiunile din secțiunile critice rezultate, sunt tensiuni rezultate din calcul, în care programul calculează și verifică atât durata menținerii tensiunii la o anumită valoare constantă cât și mărimea acesteia (care poate sau nu să se apropie de cea de rupere).

Echilibrarea modelului se referă la transpunerea stării dinamice la o stare de tranziție de viteză constantă și cât mai mică posibil pentru a putea face calculele matriceale tensoriale fiecărui milimetru parcurs de poanson în cursa lui.

Recalibrarea modelului se referă la setarea de către program prin intermediul modelului a fiecărei tensiuni critice de la fiecare secțiune succesivă ca și tensiune start pentru secțiunea următoare.

Se poate observa că tensiunea instantanee internă din material tinde să crească și să se echilibreze progresiv până la o adâncime de 30 mm - adâncime de ambutisare. La această adâncime tensiunea distribuită în foaia de tablă aproape că atinge valoarea tensiunii de rupere în aproape toată foaia, pornind de la raza poansonului în sus (Pasul 4, Secțiunea 4, adâncime de ambutisare 30 mm) (figura 4.12).

În această secțiune critică 4 (din cele 28 ale programului)- tensiunea atinge valoarea cea mai mare pentru foarte scurt timp, deoarece foaia de tablă, din acest moment începe să scape de sub presiunea inelului de reținere și a matriței. Astfel se poate vedea distribuția tensiunii teoretice maxime din toata foaia de tablă.

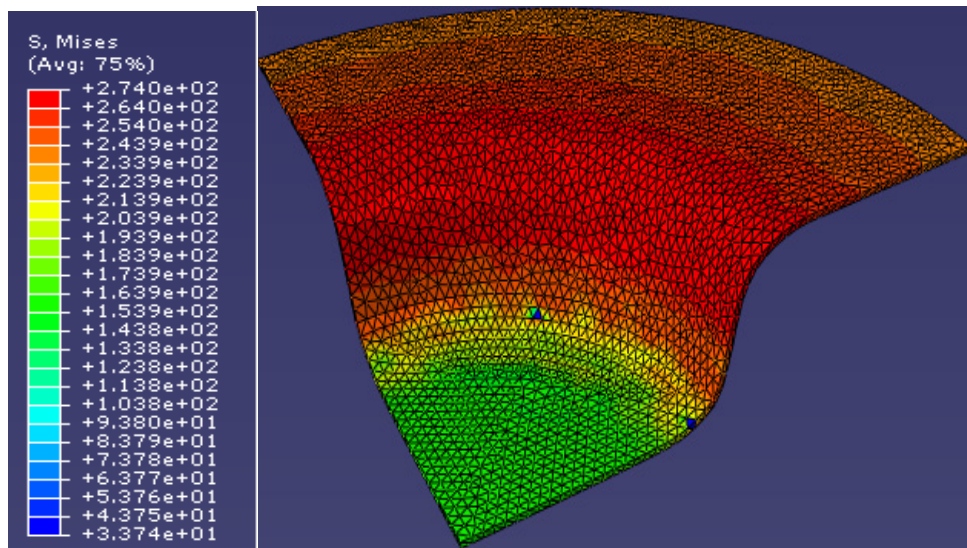


Figura 4.12. Distribuția tensiunii maxime din foaia de tablă la adâncimea de 30 mm

Spre o înțelegere mai bună, în cele ce urmează, se va prezenta itinerarul care a dus la obținerea tabelului din figura 4.3. În prima fază s-a determinat adâncimea de ambutisare, adâncime care s-a determinat cu rel

$$H_{amb} = P_p + T_F \cdot 100 \quad (4.14)$$

în care:

p_p este pasul de avansare a poansonului, (pas setat în condiția la limită $Disp\ BC-8=0,3mm$) T_F este timpul total al frame-ului, unde se înregistrează variația variabilei (tensiunea, componenta logaritmică a deformației respectiv a deplasării spațiale).

T_F este luat din rubrica *step / frame* de la casuța de dialog *XY Data From Path* de unde se și trasează variația variabilei studiate în funcție de timp figura 4.13.

Deci spre exemplu pentru Pasul 4, Secțiunea 4 adâncimea de ambutisare va fi:

$$H_{amb} = 0.3 + 0.1477 \cdot 100 = 0.3 + 14,77 = 15.07mm .$$

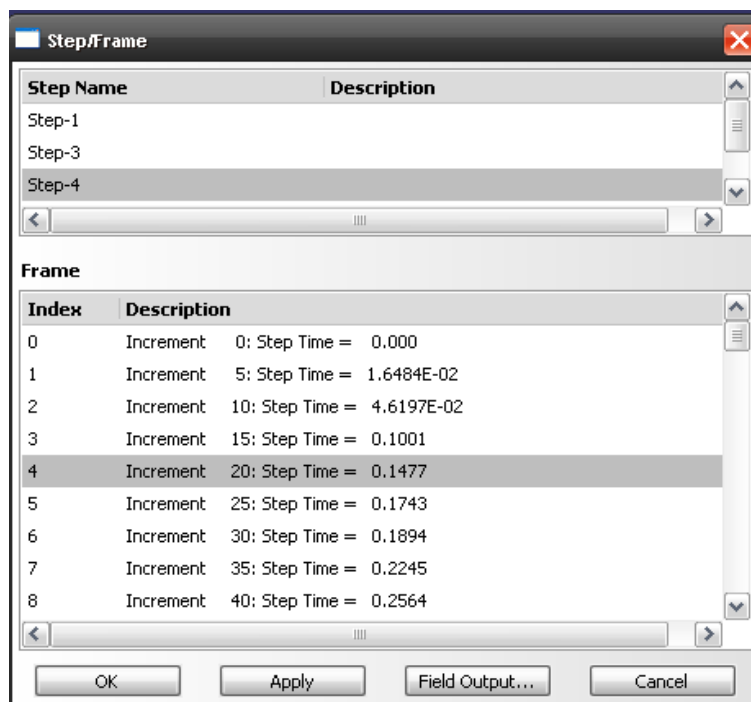


Figura 4.13. Modul de alegere a timpului aferent frame-ului de lucru

În figura 4.14 sunt evidențiate după algoritmul de calcul de mai sus distribuțiile de tensiuni la contactul poansonului cu foaia de tablă. respectiv în figura 4.15 distribuția tensiunilor la o primă pretensionare a foii de tablă pe o adâncime de 0,3mm. Contactul cu poansonul, echilibrarea și calibrarea matriceală a modelului

s-a realizat în pasul 1, secțiunea 1 și respectiv pasul 3, secțiunea 3 din simulare, urmând ca în pasul 4, secțiunea 0 să aibă loc pretensionarea foii de tablă pe adâncimea de 0,3mm.

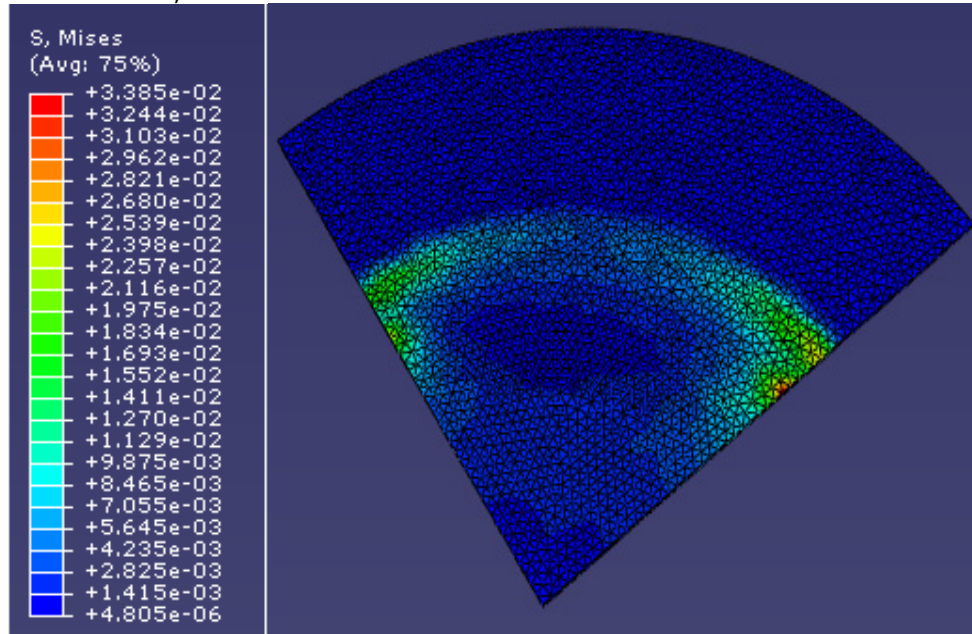


Figura 4.14. Modul de distribuție al tensiunii la contactul poansonului cu foaia de tablă

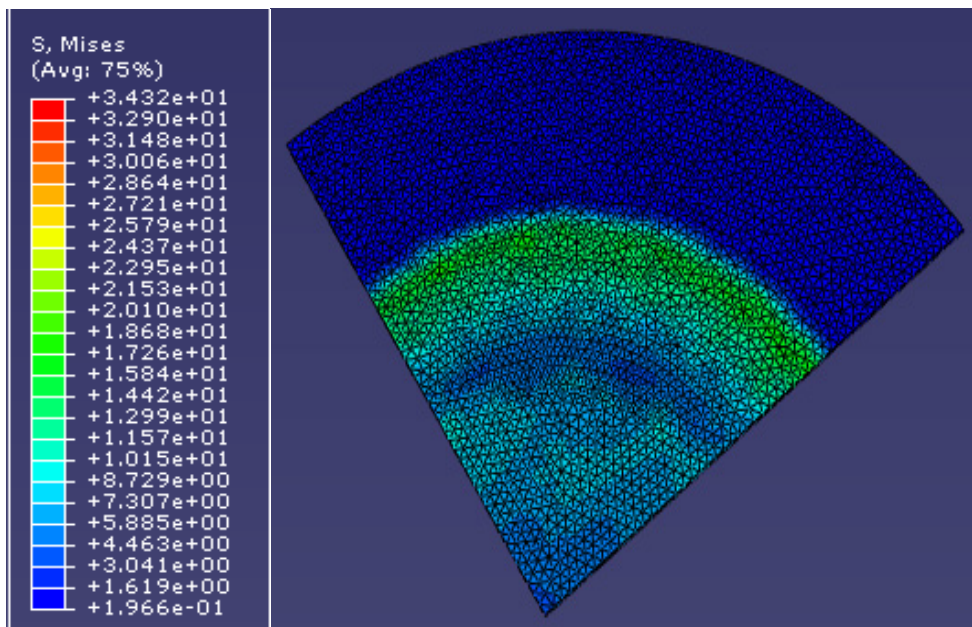


Figura 4.15. Modul de distribuție al tensiunii la pretensionarea foii de tablă de către poanson pe adâncimea de 0.3mm adâncime de ambutisare Pasul 4 Secțiunea 0 H ambutisare 0,3mm

Pentru cele 32 de secțiuni (frame-uri) avem prelevate de către program o serie de distribuții ale tensiunilor cu valorile aferente în funcție de adâncimea de ambutisare în mm.

Conform tabel 4.3 tensiunea la contactul cu poansonul pe adâncime de 0,3 mm atinge valoarea maximă de 2,65329 MPa.

Tabelul 4.3 Variația tensiunii funcție de adâncimea de ambutisare între 0,3-30mm

Nr crt	Adâncimea de ambutisare H	Tensiunea din reper pe parcursul ambutisării	Pasul 4
1	0,3	2,65328	Secțiunea 0
2	1,197	11,8516	
3	2,094	31,8798	
4	3,4395	73,507	
5	5,45775	147,585	
6	8,48512	193,464	
7	9,62039	203,98	
8	11,3233	217,273	
9	13,8776	232,649	
10	14,8355	237,977	
11	16,2723	243,271	
12	18,4276	250,577	
13	19,2358	253,326	
14	20,4481	256,542	
15	22,2666	261,05	
16	22,9485	262,456	
17	23,9714	264,884	
18	25,5057	267,387	
19	26,0811	268,367	
20	26,2969	268,84	
21	26,6205	269,473	Frame 4

Între 0,3-30mm adâncime au loc o serie de creșteri pronunțate ale tensiunilor și deformațiilor respectiv a alungirilor. Tensiunea start pentru pasul 4, secțiunea 4 este de 269,473 MPa conform tabelului 4.3. Când poansonul ajunge în dreptul cotei de adâncime 30mm tensiunea atinge valoarea secțiunii 4 de 269,473MPa, continuând să crească până la o valoare de 274,944 MPa (Tabelul 4.4) după care scade către sfârșitul secțiunii 8, adică 40mm adâncime ambutisare la 266.582MPa.

Între cota de 30mm și 40mm adâncime de ambutisare, tensiunea este cea mai pronunțată și înregistrează o valoare de șoc care se menține în acest palier datorită solicitărilor compuse de întindere cu încovoiere pe raza matriței în același timp cu cea de încovoiere cu întindere din imediata apropiere a razei poansonului. În acest interval delimitat de secțiunea 4 și secțiunea 8 are loc începutul formării reperului care este obligat să parcurgă spațiul dintre poanson și matriță, plindu-se după razele elementelor active.

Apropiindu-ne de cota de 40mm adâncime de ambutisare, tensiunea începe să se descarce, să scadă, așa cum arată de altfel și distribuțiile tensiunilor secțiunilor 8-28. Pe aceleași distribuții de tensiune de la secțiunile 8-32 tensiunea internă din reper este împinsă spre periferia reperului.

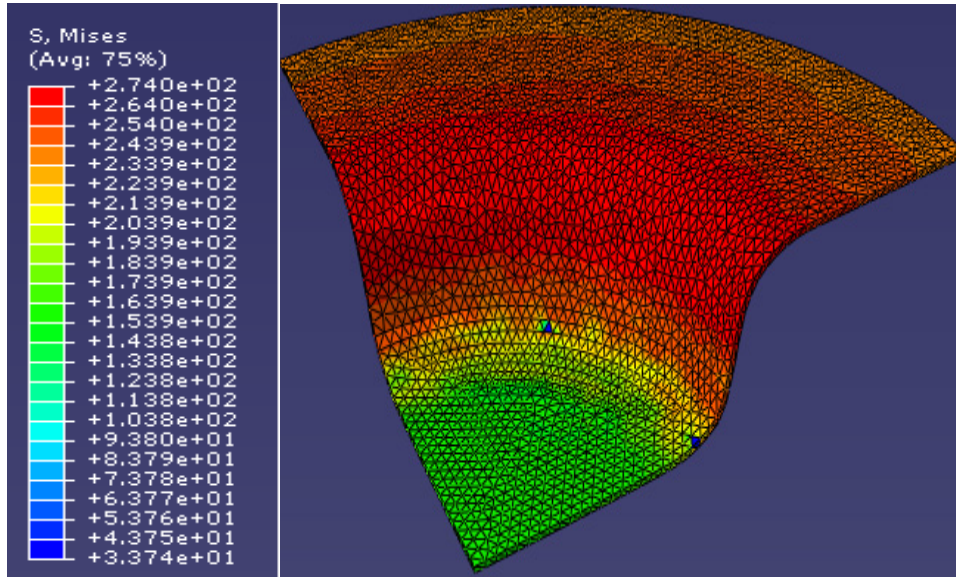


Figura 4.16. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de ambutisare 30 mm Pasul 4 Secțiunea 0 H ambutisare 30 mm

Tabelul 4.4 Variația tensiunii funcție de adâncimea de ambutisare între 30-40mm secțiunea 4-secțiunea 8

Nr crt	Adâncimea de ambutisare H	Tensiunea din reper pe parcursul ambutisării	Pasul 4
1	26,6205	269,473	Secțiunea 4
2	27,106	270,243	
3	27,8342	271,144	
4	28,9265	272,317	
5	30,565	274,034	
6	31,1794	274,342	
7	31,4098	274,457	
8	31,7555	274,671	
9	32,2739	274,871	
10	33,0515	275,02	
11	34,218	274,944	
12	34,6554	274,825	
13	35,3115	274,595	
14	36,2957	274,23	
15	36,6648	274,043	
16	37,2184	273,689	
17	38,0488	272,807	
18	39,2944	271,264	
19	39,7616	270,418	
20	40,4622	267,57	
21	40,725	266,582	Secțiunea 8

Tensiunea de după secțiunea 8 începe să scadă până la secțiunea 28 ceea ce denotă că foaia de tablă a început să iasă cu o mai mare ușurință de sub inelul de reținere și din acest moment, foaia de tablă curge plastic prin matrița de ambutisat. În figurile următoare (figurile 4.17-4.24) vom vedea evoluțiile distribuțiilor de tensiuni până la ambutisarea totală a reperului la 90 mm adâncime.

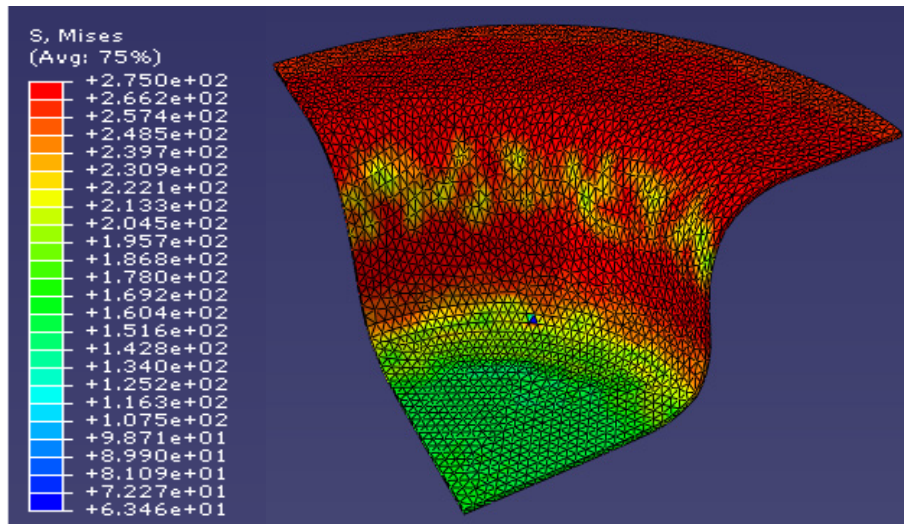


Figura 4.17. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 40 mm
Pasul 4 Secțiunea 8 H ambutisare 40 mm

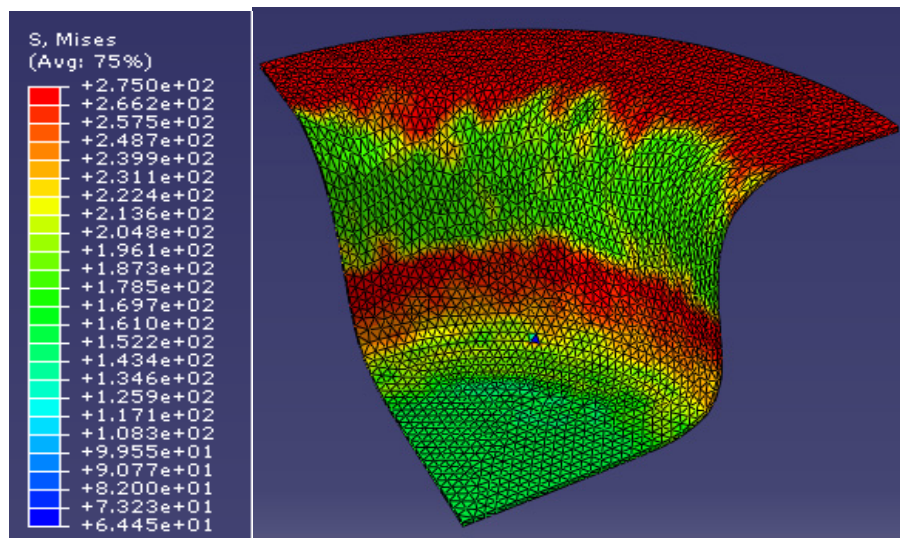


Figura 4.18. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 50 mm
Pasul 4 Secțiunea 12 H ambutisare 50 mm

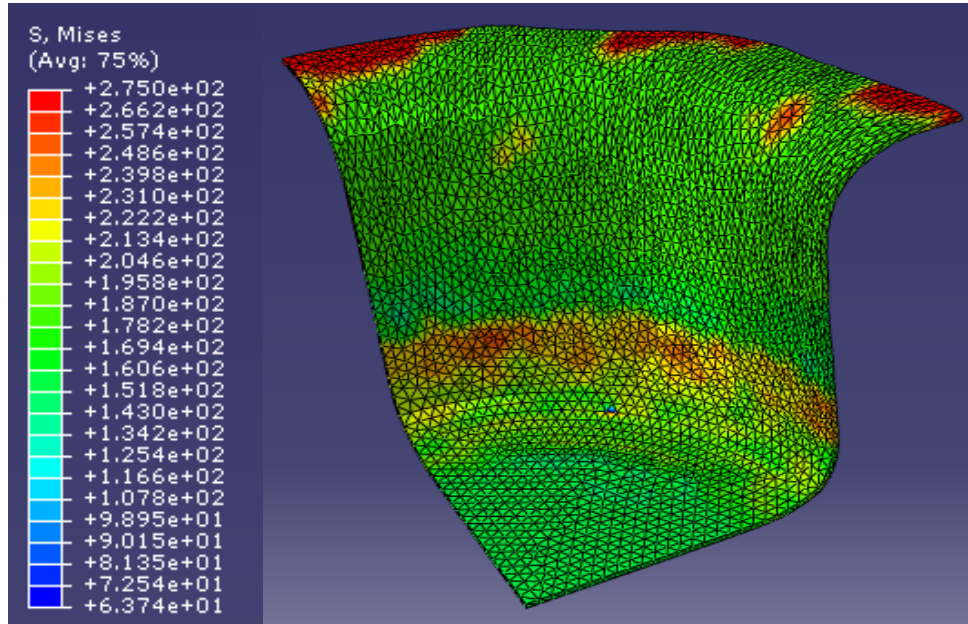


Figura 4.19. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 60 mm
Pasul 4 Secțiunea 16 H ambutisare 60 mm

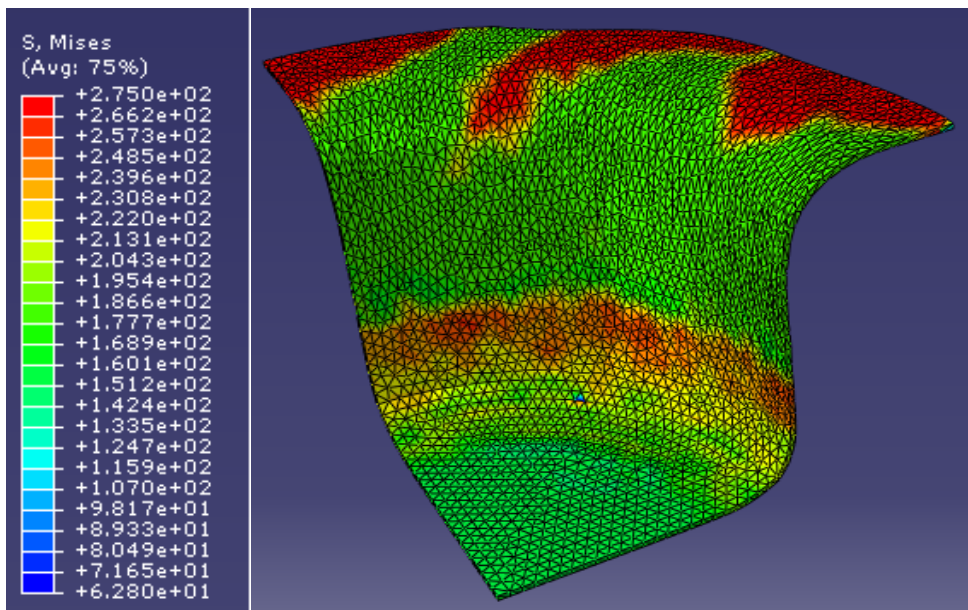


Figura 4.20. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 65 mm
Pasul 4 Secțiunea 20 H ambutisare 65 mm

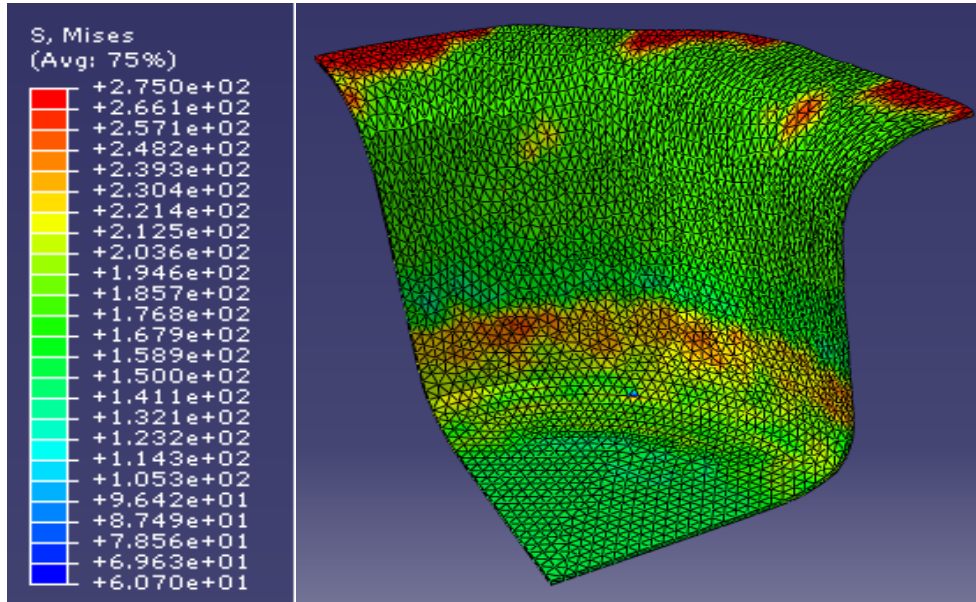


Figura 4.21. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 75 mm
Pasul 4 Secțiunea 24 H ambutisare 75 mm

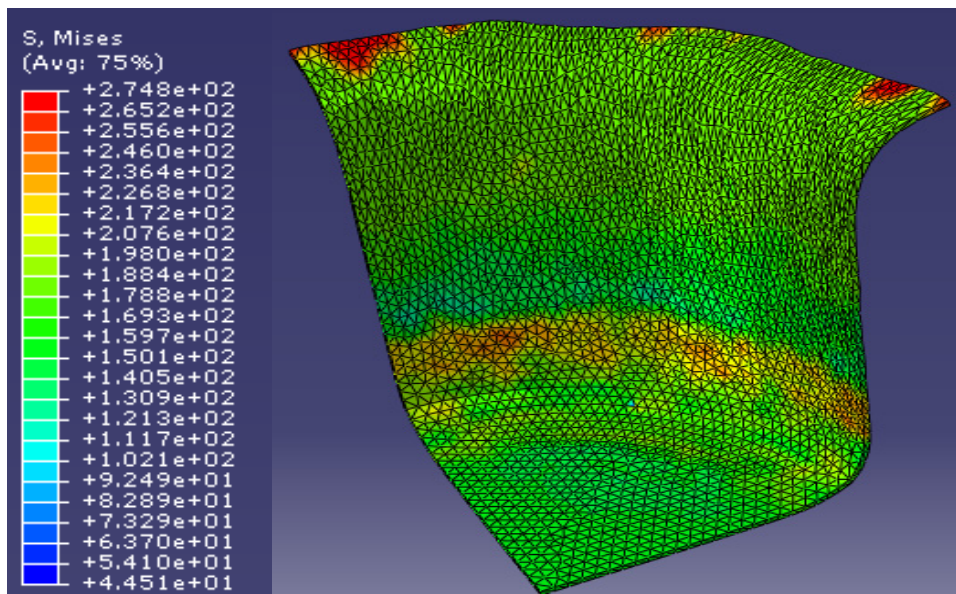


Figura 4.22. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 85 mm
Pasul 4 Secțiunea 28 H ambutisare 85 mm

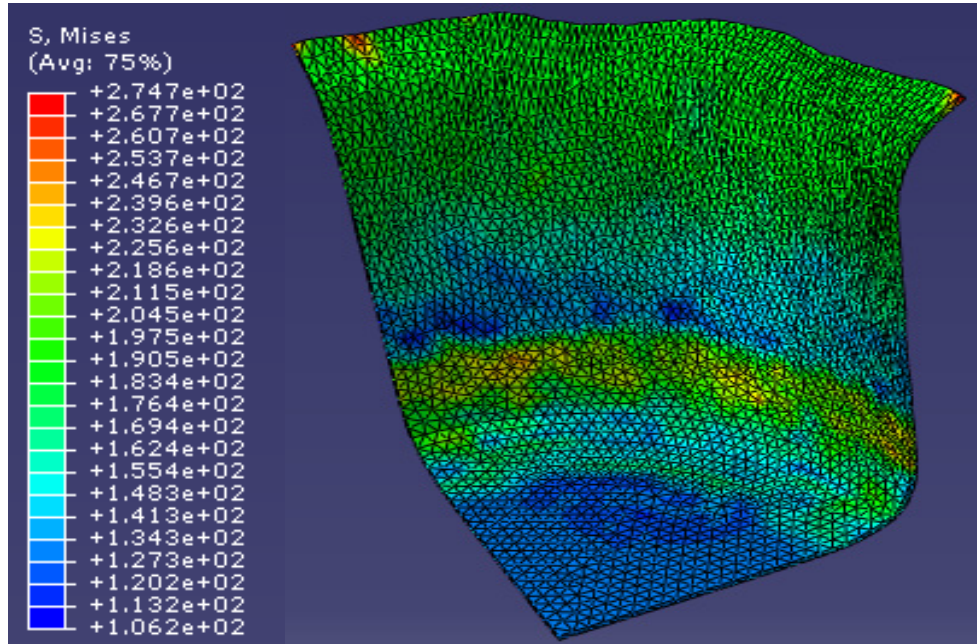


Figura 4.23. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 90 mm
Pasul 4 Secțiunea 32 H ambutisare 90 mm

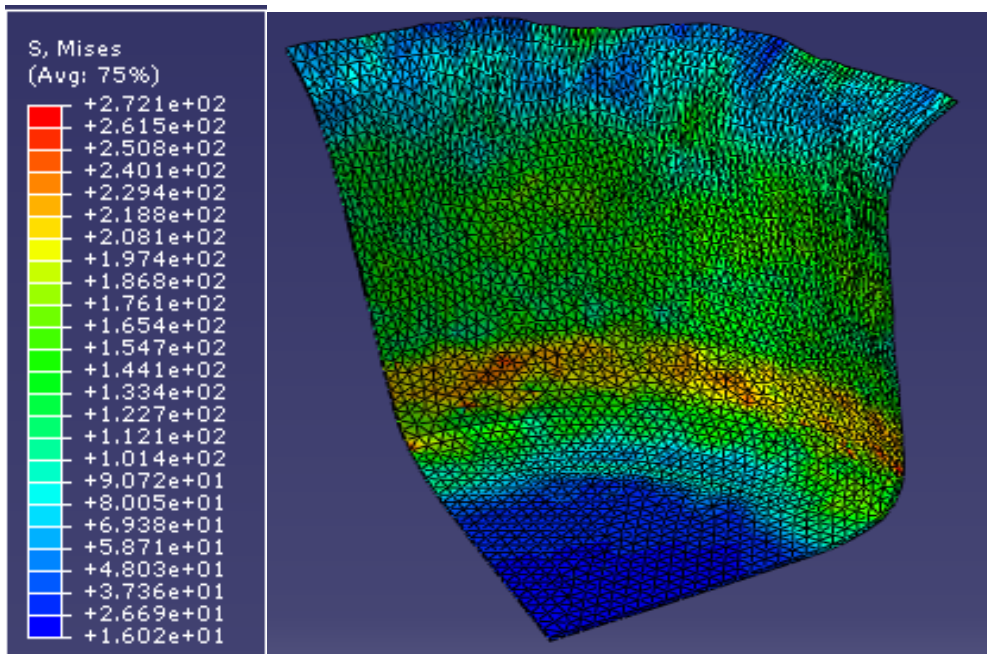


Figura 4.24. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 90 mm
Pasul 5 Secțiunea 32 H ambutisare 90 mm

În figura 4.23 reperul este slab, tensionat dinamic având o curgere foarte bună și o descărcare a tensiunilor uniformă pe tot conturul reperului format.

În figura 4.24 se observă distribuțiile de tensiuni, după ce asupra reperului nu mai acționează poansonul, reperul astfel format fiind relaxat iar tensiunea care se observă este una remanentă nu instantanee. Se poate spune că în urma ambutisării, reperul cav format este ușor ecruizat și prezintă tensiuni remanente în zona imediat superioară a razei poansonului. [119]

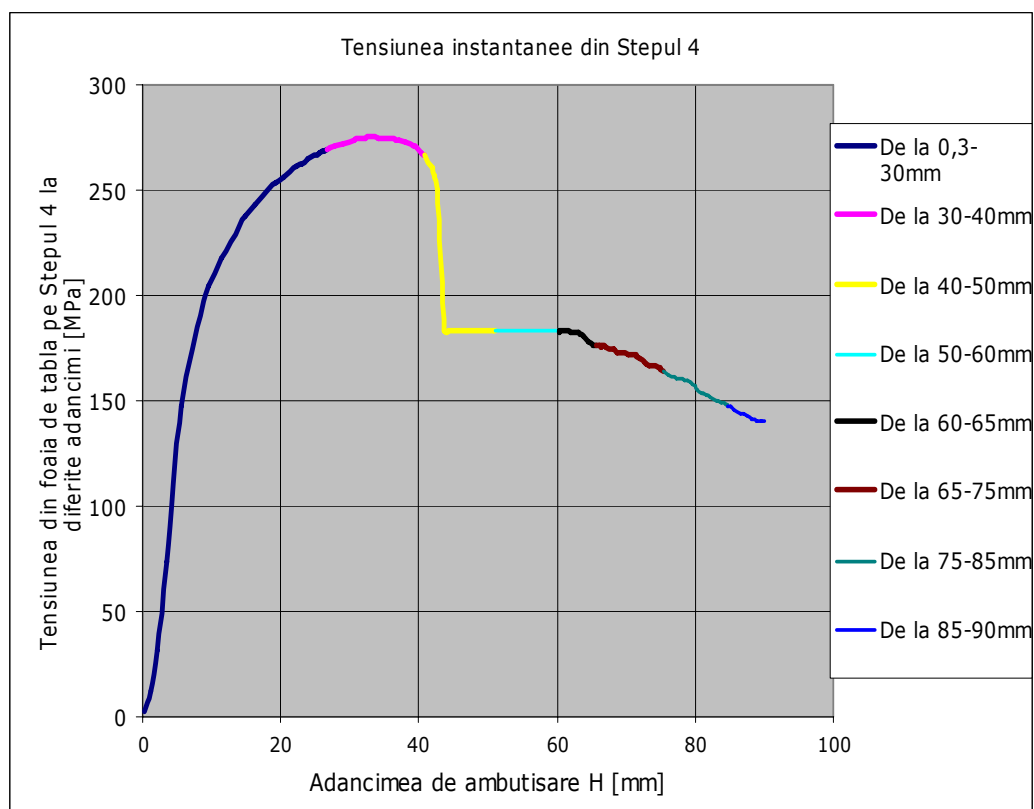


Fig 4.25 Variația tensiunii interne la simularea modelului numeric din foaia de tablă supusă ambutisării

În acest capitol se tratează din punct de vedere al deformațiilor două aspecte: unul al deformațiilor totale pe cele trei axe de coordonate pentru a ne forma o imagine în ceea ce privește modul tridimensional de alungire și deformare a materialului foii per ansamblu, iar al doilea aspect este cel al deformațiilor logaritmice sau al componentelor logaritmice a deformațiilor din tensorul deformație.

Primul aspect al determinării deformațiilor totale și globale creează o imagine de globalizare a deformațiilor în materialul foii de tablă. Cel de-al doilea aspect este modul de evoluție a deformațiilor în materialul foii de tablă după direcții compuse xy xz yz zx datorită solicitărilor compuse care concură în toată structura foii de tablă per frame-uri. Componentele logaritmice ale deformațiilor ca și

componente ale tensorului deformației, scot în evidență modul și forma tridimensională a deformației după direcții compuse arătând totodată subțierea materialului în zonele de rază și perete a reperului pe direcțiile de solicitare.

În cazul deformațiilor după cele trei axe de coordonate X, Y și Z, sub incidența modelului implementat, programul ne arată valorile numerice ale deformațiilor, alungirilor pe cele trei direcții axonometrice cât și pe durata frame-urilor și al intervalelor de lucru a materialului foii de tablă.

Urmărind tabelul 4.5 și graficele din figurile 4.26, 4.27 și 4.28 care redau deformațiile de genul alungirilor pe direcția axelor X, Y și Z, rezultă o serie de alungiri instantanee pentru fiecare din adâncimile setate de secțiuni.

Tabelul 4.5. Variația deformației (alungirii) pe cele trei axe de coordonate X, Y, și Z funcție de adâncimea de ambutisare între 0.3-90mm pasul 4 secțiunile 0-32

H AMB PE DIR (Y) A AMBUTISAR II	Step 4	DEFORM PRINCIPALA PE DIR X	DEFORM PRINCIPALA PE DIR Y	DEFORM PRINCIPALA PE DIR Z
0.3	Frame 0	3.45118E-05	1.52052E-05	0.000112095
1.197		0.000308874	4.28749E-06	0.000400398
2.094		0.000885043	-2.58944E-05	0.00102843
3.4395		0.00209638	-0.000106146	0.0023173
5.45775		0.00483747	-0.000711626	0.00392055
8.48512		0.0108485	-0.00192055	0.0101223
9.62039		0.0149059	-0.00303553	0.0143538
11.3233		0.0231615	-0.00541255	0.0237725
13.8776		0.0408235	-0.00244256	0.0498664
14.8355		0.0470496	0.00186606	0.0613319
16.2723		0.054769	0.00529969	0.0731662
18.4276		0.0742133	0.00274545	0.0891354
19.2358		0.0816641	0.00267009	0.0968217
20.4481		0.0924861	0.00205723	0.105354
22.2666		0.110188	0.00193533	0.120589
22.9485		0.11633	0.00168938	0.125971
23.9714		0.128614	0.0012518	0.136105
25.5057		0.143484	0.00175413	0.149279
26.0811		0.149548	0.00203374	0.155822
26.2969		0.153168	0.00187645	0.159324
26.6205	Frame 4	0.158144	0.00163949	0.163846
27.106		0.164854	0.000943315	0.169419
27.8342		0.173587	-0.000242633	0.176839
28.9265		0.185513	0.000349719	0.189573
30.565		0.213587	-0.00479543	0.214182
31.1794		0.220044	-0.00541532	0.221447
31.4098		0.223518	-0.00706598	0.224546
31.7555		0.229953	-0.0108515	0.229395
32.2739		0.236513	-0.00943401	0.239957
33.0515		0.252091	-0.00592105	0.257219
34.218		0.259861	-0.000778156	0.271219
34.6554		0.261989	0.00336301	0.277356

35.3115		0.267659	0.00555083	0.284863
36.2957		0.27818	0.00411548	0.292937
36.6648		0.282465	0.00425112	0.295604
37.2184		0.287713	0.00513081	0.300947
38.0488		0.293909	0.0087241	0.307497
39.2944		0.302772	0.0148986	0.320156
39.7616		0.30697	0.0155408	0.323563
40.4622		0.313928	0.0176251	0.329765
40.725	frame 8	0.315735	0.018623	0.33214
41.1191		0.317916	0.0202013	0.3354
41.7103		0.31941	0.0243261	0.339763
41.932		0.319814	0.0254124	0.341262
42.2645		0.321434	0.026722	0.343952
42.7633		0.324811	0.027499	0.347568
43.5115		0.332278	0.0293963	0.355423
44.2598		0.337119	0.0317665	0.361032
45.008		0.338275	0.0331662	0.365741
45.2886		0.338497	0.0338558	0.366848
45.7094		0.340108	0.0362971	0.370657
46.3407		0.343191	0.0386724	0.375272
46.5775		0.344122	0.0391782	0.376518
46.9326		0.344758	0.0408561	0.379224
47.4653		0.343718	0.046525	0.384417
48.2643		0.342953	0.0530534	0.389814
48.5639		0.342762	0.0557007	0.392353
49.0133		0.342124	0.0597503	0.395687
49.6875		0.342353	0.0631708	0.399135
50.6987		0.341413	0.0673861	0.402583
51.0779	frame 12	0.340893	0.0701479	0.404609
51.6467		0.340056	0.0739717	0.407305
51.86		0.339728	0.0746111	0.407851
52.18		0.339062	0.0757048	0.408638
52.66		0.33871	0.0765713	0.409459
53.3799		0.33988	0.0777409	0.410897
54.4597		0.339694	0.0796833	0.412166
54.8647		0.339565	0.0803836	0.412542
55.4721		0.338835	0.0818365	0.413244
55.6999		0.338851	0.0824016	0.413696
56.0416		0.338798	0.0833191	0.414335
56.5541		0.33887	0.0840449	0.41486
57.3229		0.338937	0.0852413	0.415597
57.6111		0.338857	0.0856872	0.41584
58.0436		0.338748	0.0861024	0.415974
58.6922		0.3385	0.0871976	0.416582
59.6652		0.338676	0.0879235	0.417192
60.0301		0.338681	0.0881173	0.417284
60.1669		0.338684	0.0881617	0.417298
60.2182		0.338688	0.088185	0.417315
60.2952	frame 16	0.338698	0.0882084	0.41734

60.324		0.338703	0.0882161	0.417349
60.3673		0.338684	0.0881982	0.417277
60.3998		0.338671	0.0882164	0.417283
60.4323		0.33866	0.0882382	0.417286
60.481		0.338646	0.0882923	0.417313
60.554		0.338607	0.0884161	0.417362
60.6636		0.338559	0.0885797	0.417426
60.828		0.338458	0.0888471	0.417542
61.0746		0.338319	0.0892703	0.417743
61.4444		0.33819	0.089759	0.417969
61.9992		0.338219	0.0897717	0.417923
62.2072		0.338214	0.0897587	0.417903
62.5193		0.338211	0.0897714	0.417881
62.9873		0.338157	0.0898332	0.41784
63.1629		0.338118	0.0898133	0.417799
63.4262		0.338071	0.0898059	0.417756
63.8211		0.338004	0.0897783	0.417659
64.4135		0.337918	0.0897491	0.417516
65.3022		0.337816	0.0897441	0.417343
65.6354	frame 20	0.337797	0.0897473	0.41733
66.1353		0.337725	0.0897468	0.417219
66.3227		0.337708	0.0897496	0.417195
66.6039		0.337695	0.0897656	0.417184
67.0256		0.33761	0.089778	0.417084
67.6583		0.337424	0.0897921	0.416859
67.8955		0.337425	0.0898028	0.41686
68.2513		0.337437	0.0897973	0.416837
68.7851		0.337441	0.0897612	0.416745
69.5858		0.337436	0.0897771	0.416717
70.3865		0.337416	0.0897622	0.416656
71.1871		0.337415	0.0897534	0.416606
71.4874		0.3374	0.0897416	0.416548
71.9378		0.337386	0.0897321	0.416499
72.6133		0.337361	0.0896898	0.416377
72.8667		0.337354	0.089671	0.416332
73.2467		0.337351	0.0896583	0.416291
73.8167		0.33737	0.0896549	0.416286
74.6717		0.337375	0.0896334	0.416213
74.9923		0.337361	0.0896286	0.416186
75.4733	frame 24	0.337338	0.0896098	0.416109
76.1947		0.337316	0.0895596	0.415994
76.9161		0.337322	0.0895644	0.415925
77.0965		0.337325	0.089564	0.415905
77.367		0.337333	0.0895567	0.415872
77.7728		0.337347	0.0895482	0.415833
78.3815		0.337361	0.0895455	0.415789
78.6097		0.337364	0.089551	0.415783
78.9521		0.337359	0.0895515	0.415754
79.4657		0.337362	0.0895352	0.415695

79.6583		0.337354	0.0895195	0.415646
79.9472		0.337333	0.0894948	0.41556
80.3805		0.337303	0.0894672	0.415438
81.0305		0.337293	0.0894319	0.415295
81.2743		0.337296	0.0894273	0.41527
81.6399		0.337294	0.0894155	0.415228
82.1884		0.337285	0.0893928	0.415161
83.011		0.33727	0.0893561	0.415057
83.3195		0.337281	0.0893482	0.415048
83.7823		0.337272	0.0893324	0.415001
84.4764		0.337238	0.089298	0.414877
84.7367	frame 28	0.337236	0.0892864	0.414846
85.1272		0.337223	0.0892666	0.414783
85.7128		0.337187	0.0892289	0.414646
86.5913		0.337166	0.08919	0.414529
86.9208		0.337162	0.0891804	0.414502
87.4149		0.337144	0.0891535	0.414415
88.1562		0.337102	0.0891108	0.414271
88.4341		0.337094	0.0891	0.414243
88.8511		0.337089	0.0890877	0.414208
89.4765		0.337093	0.0890723	0.414163
90	frame 28	0.337093	0.0890594	0.414127

Ceea ce se poate observa foarte bine din tabelul 4.5 este că încă de la contactul cu foaia de tablă are loc deformarea foii de tablă. Creșterea alungirii pe cele trei direcții se regăsește aproape total la finalul ambutisării sub formă de urechi (festoane) care ulterior se vor rețea dând un aspect bun de folosință reperului. În ceea ce privește componentele logaritmice ale deformației ca și componente ale tensorului deformație, acestea conturează aspectul îngroșat sau subțiat al reperului pe alocuri creând astfel subțierile peretelui reperului format. După cum se observă în figura de mai jos, alungirea pe axa Y este cea mai mică în direcția ambutisării până aproape o zecime de milimetru maxim iar pe direcția X aproape trei zecimi jumate și pe direcția Z peste 4 zecimi de milimetru. Pornind și de la secțiuni, alungirea materialului foii de tablă pe direcția X atinge o valoare maximă la adâncimea de 46,93 mm unde corespunzător acestei adâncimi avem o alungire a materialului de 0.344758 mm pe direcția X, ceea ce se poate vedea și din graficul 4.26. Pe direcția Z, alungirea materialului foii de tablă atinge maximum la adâncimea de 61.44 mm și prezintă o alungire de 0.417969 mm. Văzând alungirile mari pe direcțiile X și Z ne așteptăm ca pe direcția ambutisării (Y) să avem o alungire și mai mare - chiar cea mai mare. Observăm că nu se întâmplă așa deoarece datorită solicitărilor compuse de încovoiere cu întindere din peretele reperului și de pe razele sculelor active apare local și tot mai pronunțat fenomenul de plasticitate și de ecruisare a materialului. Alungirea materialului pe direcția ambutisării în perete este dată în special de componenta logaritică L22 (tensiunea tangențială pe direcția Z), care de fapt înregistrează o subțiere. De fapt, alungirea foii de tablă după direcția ambutisării (Y), se regăsește ca și cotă parte în celelalte alungiri pe cele două direcții X și Z. Ca și fenomen, este simplu de explicat. Materialul foii de tablă fiind reținut de inelul de reținere, partea de material de sub inel este forțată să iasă ca de sub o vergea care întinde un aluat, în afara circumferinței inelului de reținere, urmând ca materialul de pe direcția ambutisării din peretele reperului ce se

formează să se ecruseze primul și să își mărească astfel rezistența, deformându-se tot mai puțin. Intrând treptat în domeniul plastic la adâncimi mai mari de 30 mm, forța de ambutisare fiind mare, obligă materialul foii de tablă să treacă printre poanson și matriță, fiind în același timp reținut de inel. Observăm din graficul din figura 4.26 și din tabelul 4.5 că pe direcțiile X și Z deformațiile-alungire cresc tot mai mult, crescând astfel tot mai mult festoanele (bavurile rezultate în timpul procesului). Observăm însă că materialul foii de tablă se ecrusează și mai mult până la o anumită adâncime când ajunge în sfârșit și el să se alungească, însă nu prea mult. Putem spune chiar că formarea reperului cav rezultat în urma ambutisării are loc prin concurența deformațiilor de tip alungire pe direcțiile X și Z. Dacă plasticitatea și elasticitatea materialul în zona peretelui reperului pe direcția de ambutisare Y este mai mică decât rezistența materialului ecrusat în urma ambutisării, atunci are loc formarea de micro-fisuri și subțieri vizibile sub formă de gătuiri locale urmând ca materialul reperului să se rupă. Ca și element de control pentru aceste situații nedorite sunt componentele logaritmice ale deformației care nu sunt altceva decât valorile subțierilor peretelui materialului foi de tablă după direcțiile X, Z și în special Y pe direcția de ambutisare. *Ca și o concluzie a studiului de mai sus, o parte din materialul foii de tablă cu care se formează peretele reperului, până să ajungă să se ecruseze, este obligat, ca prin solicitările compuse de încovoiere cu întindere, să se deformeze și să se alungească pe direcțiile X și Z, iar ceea ce este acaparat deja de ecrusare servește ca și element de tracțiune pentru o adâncime mai mare imediat superioară. Aceste transformări care afectează foaia de tablă au loc milimetru cu milimetru din adâncimea de ambutisare setată.*

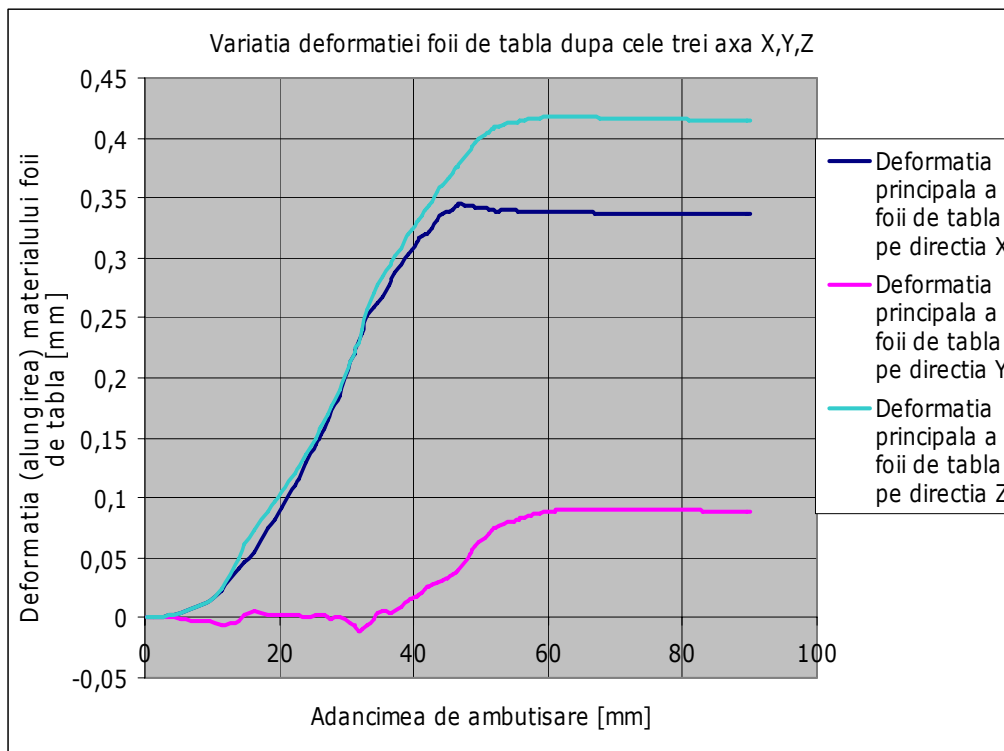


Figura 4.26. Variația alungirii materialului foii de tablă la simularea modelului numeric

În continuare voi prezenta pentru fiecare deformație-alungire pe direcțiile X, Y și Z, valorile dinamice instantanee ale acestor alungiri pentru fiecare frame dat de model, așa cum o arată figurile 4.27, 4.28 și 4.29. Modelul în urma simulării, oferă posibilitatea vizualizării deformațiilor de tipul alungirilor și a subțierilor foii de tablă în timp real dinamic.

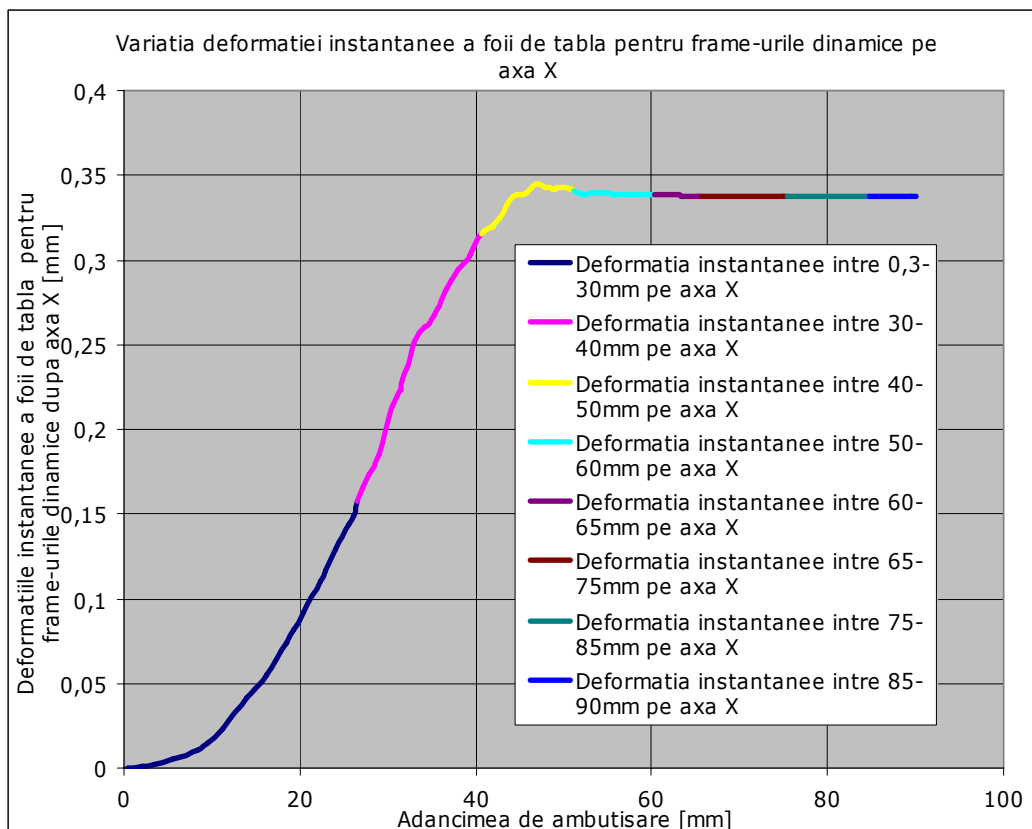


Figura 4.27. Modul de evoluție a alungirii instantanee dinamice după axa X

Conform graficului din figura 4.27 observăm că între 0,3-30 mm, materialul curge și se alungește până la o valoare imediat superioară valorii de 0,15 mm.

Alungirea dinamică continuă să crească și materialul se alungește până la 50 mm adâncime de ambutisare, atingând un maxim dinamic undeva la aproximativ 0,35 mm între 40-80 mm adâncime de ambutisare. De la adâncimea de 50 mm până la 90 mm alungirea dinamică este constantă în palier la aproape 0,32 mm. În acest palier, materialul pe direcția X curge uniform și o parte din material pe direcția X duce la formarea festoanelor (bavurilor).

În graficul 4.28 este prezentată deformația instantanee dinamică sau alungirea în timp real a materialului foii de tablă pe direcția Z. Același lucru putem conchide și în acest caz ca și în cazul precedent doar că de data aceasta deformația atinge o valoare mai mare, undeva la peste 0,4 mm.

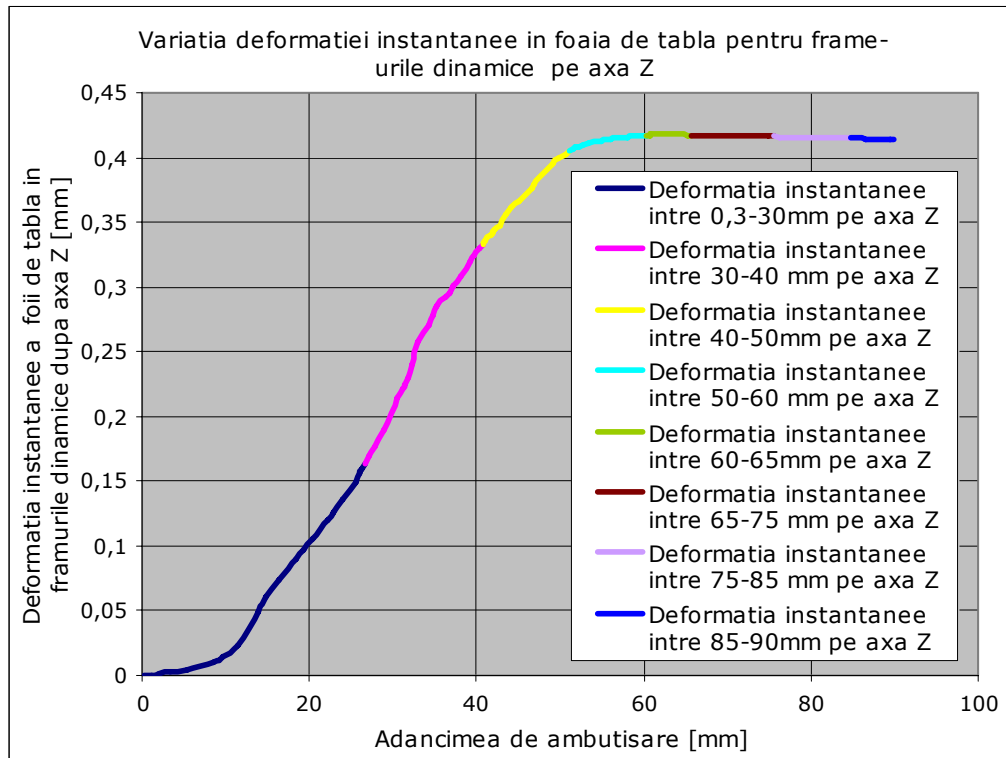


Figura 4.28. Modul de evoluție a alungirii instantanee dinamice după axa Z

În graficul din figura 4.29 putem vedea că o parte din materialul foii de tablă care normal ar intra în formarea peretelui reperului, nu ajunge să se mai ecruiască și să genereze peretele reperului.

Între 0,3-30 mm, conform graficului 4.29, o parte din materialul foii de tablă tinde până în 20 mm să se îngroașe, deplasându-se forțat către zona de legătură dintre inelul de reținere și raza activă a matriței.

De asemenea se observă o îngroșare și mai pronunțată între 30-40 mm adâncime de ambutisare.

Salturile de alungire negativă de pe grafic între 0.3-30 mm și 30-40 mm, nu sunt altceva decât comprimări locale ale materialului foii de tablă. Acesta, sub acțiunea forțelor rezultate din solicitarea compusă de încovoiere cu întindere, este forțat de către acțiunea sculelor active de lucru să se deplaseze pe direcțiile X și Z intrând forțat, printr-o solicitare de compresiune locală, sub inelul de reținere. Materialul își continuă mișcarea de înaintare pe axele X și Z sub acțiunea de strivire locală datorită reținerii materialului de către elementul de reținere.

Undeva între 35-40 mm materialul începe să se ecruiască, durificându-se și pornind, sub acțiunea forțelor rezultate din solicitările compuse, spre o alungire foarte mică 0,08 mm aproape de 0,1 mm maxim. La toate cele trei grafice discutate până acum, fenomenul de ecrusare este nelipsit. În urma solicitărilor pentru formarea reperului, intrarea în starea de ecrusare se face diferit după cele trei direcții ortogonale. Materialul foii de tablă care este mai slab ecrusat, în timpul procesului, acceptă mai bine o serie de tensiuni și forțe și răspunde ca atare

acestora, deformându-se mai ușor pe axele X și Z.

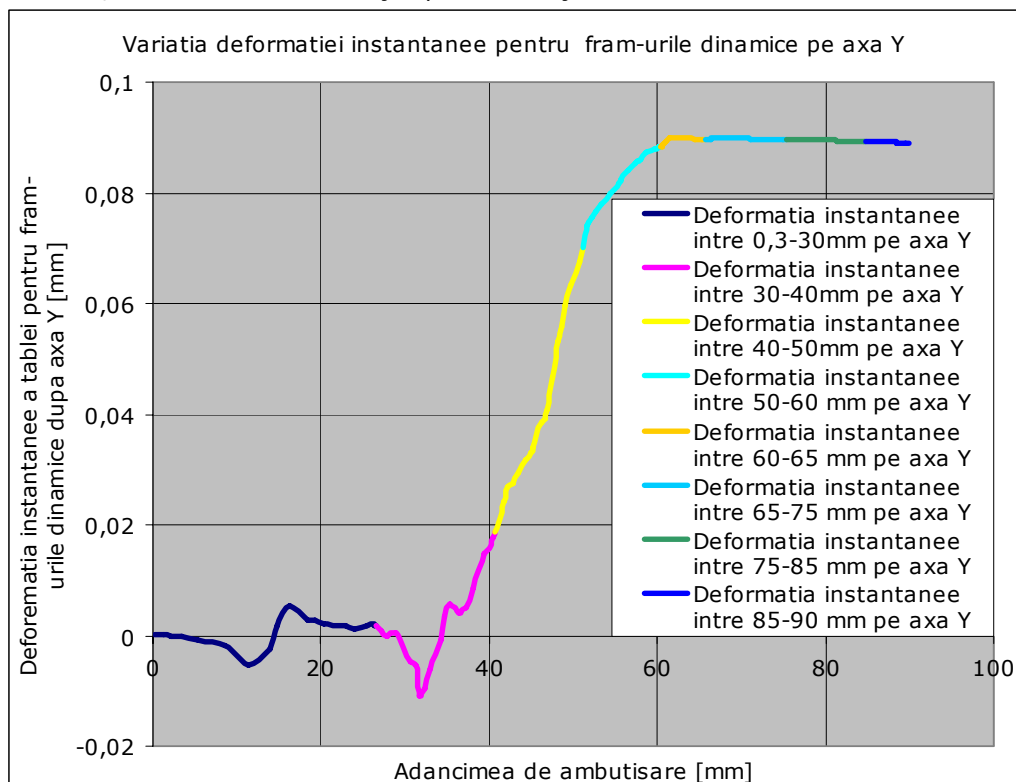


Figura 4.29. Modul de evoluție a alungirii instantanee dinamice după axa Y

Pentru graficele 4.27 și 4.28 menționăm faptul că în vederea apariției mai târzii a fenomenului de ecruisare, un rol important îl joacă inelul de reținere, prin intermediul căruia se realizează o oarecare apăsare asupra foii de tablă. Astfel foaia este obligată să își păstreze stabilitatea tensională internă. Lipsa apăsării ar fi dus la pierderea stabilității foii de tablă, la cutarea acesteia și la inducerea rapidă a fenomenului de ecruisare, înainte de a ajunge la adâncimea necesară, provocându-se astfel ruperea foii.

La toate cele spuse mai sus contribuie într-o mare măsură și modul de construcție al standului experimental, care este un dispozitiv de ambutisare dar totodată și alegerea corespunzătoare a jocului dintre elementele active de lucru.

Aceste aspecte sunt foarte bine detaliate în capitolul următor, cel al calculului experimental.

În capitolul următor partea de tensiuni interne și alungiri după cele trei axe ortogonale, din punct de vedere experimental, nu s-a putut realiza din motive tehnice.

Elementele de comparație pentru experiment, au rămas: verificarea față de model a gradului de subțiere în zona peretelui și a razei matriței respectiv verificarea forței de ambutisare din experiment comparativ cu cea din simulare.

În ceea ce privește elementele deformației în peretele reperului format, au rezultat o serie de grade de subțiere a peretelui reperului. În urma simulării pe

direcția transversală a reperului s-au putut măsura din simulare o serie de deformații de genul subțierilor peretelui reperului, respectiv a subțierii foii de tablă în zona razei matriței. Deformațiile pe direcțiile XZ respectiv ZX din foaia de tablă, sunt redată prin componentele logaritmice ale tensorului deformație L11 și L33.

După cum bine știm, încă de la începutul capitolelor precedente, am vorbit despre simetria atribuită sfertului de foaie de tablă pe direcțiile Z și X. În anexa 1 a tezei de doctorat se regăsesc explicațiile referitoare la modul de creere a modelului. Zonele de simetrie Z și X din construcția modelului făceau referire în subcapitolele anterioare la faptul că se impunea modelului numeric recunoașterea unei foi de tablă circulare. Însă din motive de resurse hardware, simularea s-a studiat doar pe un sfert de foaie de tablă. Rezultatele obținute în simulare sunt date pentru un sfert de foaie de tablă însă se ține cont de întreaga foaie de tablă.

Deformațiile instantanee în timp real compuse pe două direcții L11 și L33 nu sunt altceva decât deformațiile instantanee surprinse în materialul foii pe direcțiile de simetrie stipulate în modelul de simulare. De mare interes sunt de altfel deformațiile instantanee dinamice L13 și L22.

Deformațiile instantanee L13 (deformațiile pe direcțiile ZY) sunt deformații instantanee pe raza activă a matriței.

Deformațiile instantanee L22 reprezintă deformațiile peretelui reperului sub forma micro subțierilor și subțierilor peretelui la diferite adâncimi de ambutisare. Ambele tipuri de deformații după direcțiile de acțiune a solicitărilor compuse vor fi prezentate mai jos.

Distribuțiile de deformații L12 și L23 arată modul de evoluție al deformațiilor instantanee dinamice pe direcțiile solicitărilor compuse, în vecinătatea simetriilor impuse de model pentru foaia de tablă, mai precis în zonele de simetrie Z și X pe conturul razei active a matriței.

În figura 4.30 observăm modul de distribuție al deformației după direcția Z de simetrie pe zona razei active a matriței, respectiv a poansonului. Odată cu adâncimea are loc și creșterea deformației pe zona și direcția mai sus amintită. O parte din această deformație instantanee se întrepătrunde cu deformația L22 tot pe zona razelor sculelor active. O altă parte din această deformație se adaugă la deformația de tipul alungirii pe direcția axei Z.

În zona peretelui, observăm o disipație aproape uniformă a acestei deformații instantanee, care se transformă în mare parte într-o deformație de compresiune pentru restul peretelui.

Zonele de pe raza matriței colorate în roșu sunt zone de maximă deformație pentru acest tip de componentă a tensorului și se disipă după modul descris mai sus. În analogie putem discuta și despre componenta logaritmică a deformației L23 prezentată în figura 4.31, în care cele stipulate mai sus pentru componenta logaritmică a deformației L12 se aplică și în acest caz doar cu specificația că direcția de simetrie dată de model este X.

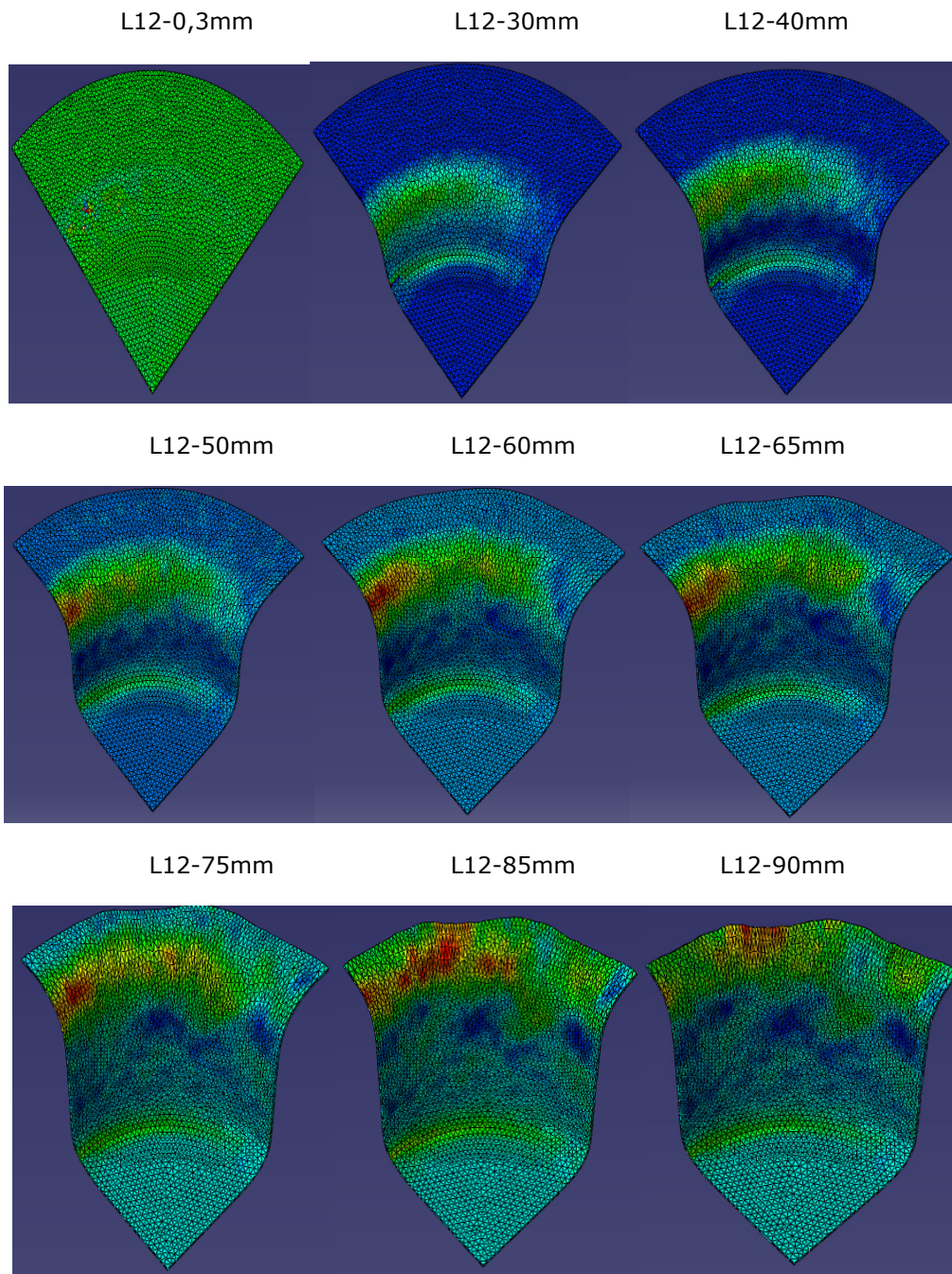


Figura 4.30. Modul de evoluție a distribuției de deformații pentru componenta L12 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

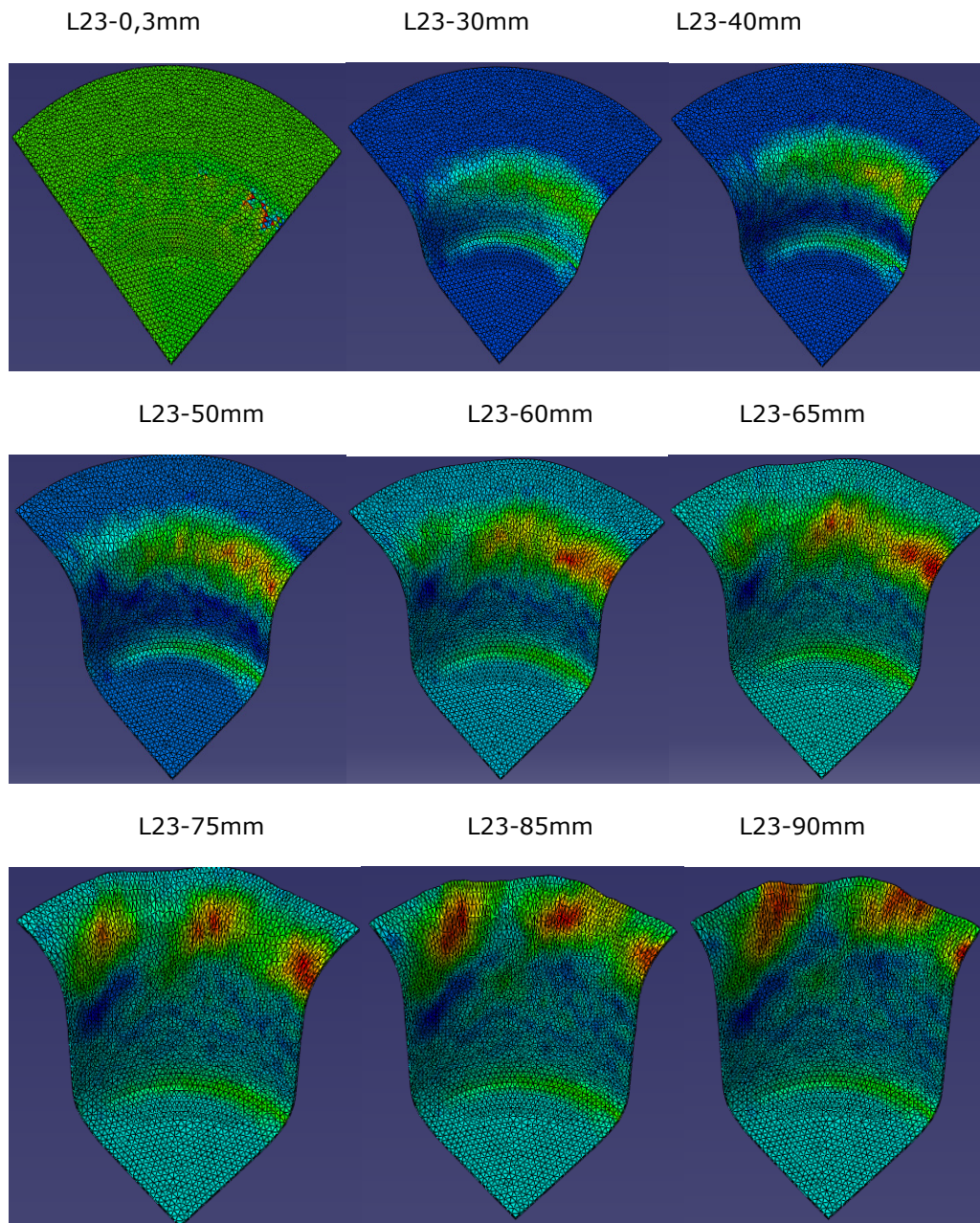


Figura 4.31. Modul de evoluție a distribuției de deformații pentru componenta L23 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

În mod similar vom expune componentele logaritmice ale deformației instantanee în zonele de simetrie cu axa Z și X dar din flanșa foii de tablă de sub inelul de reținere, fiind vorba de componentele L11 și L33 (distribuția deformațiilor L11 figura 4.32 iar a lui L33 figura 4.33).

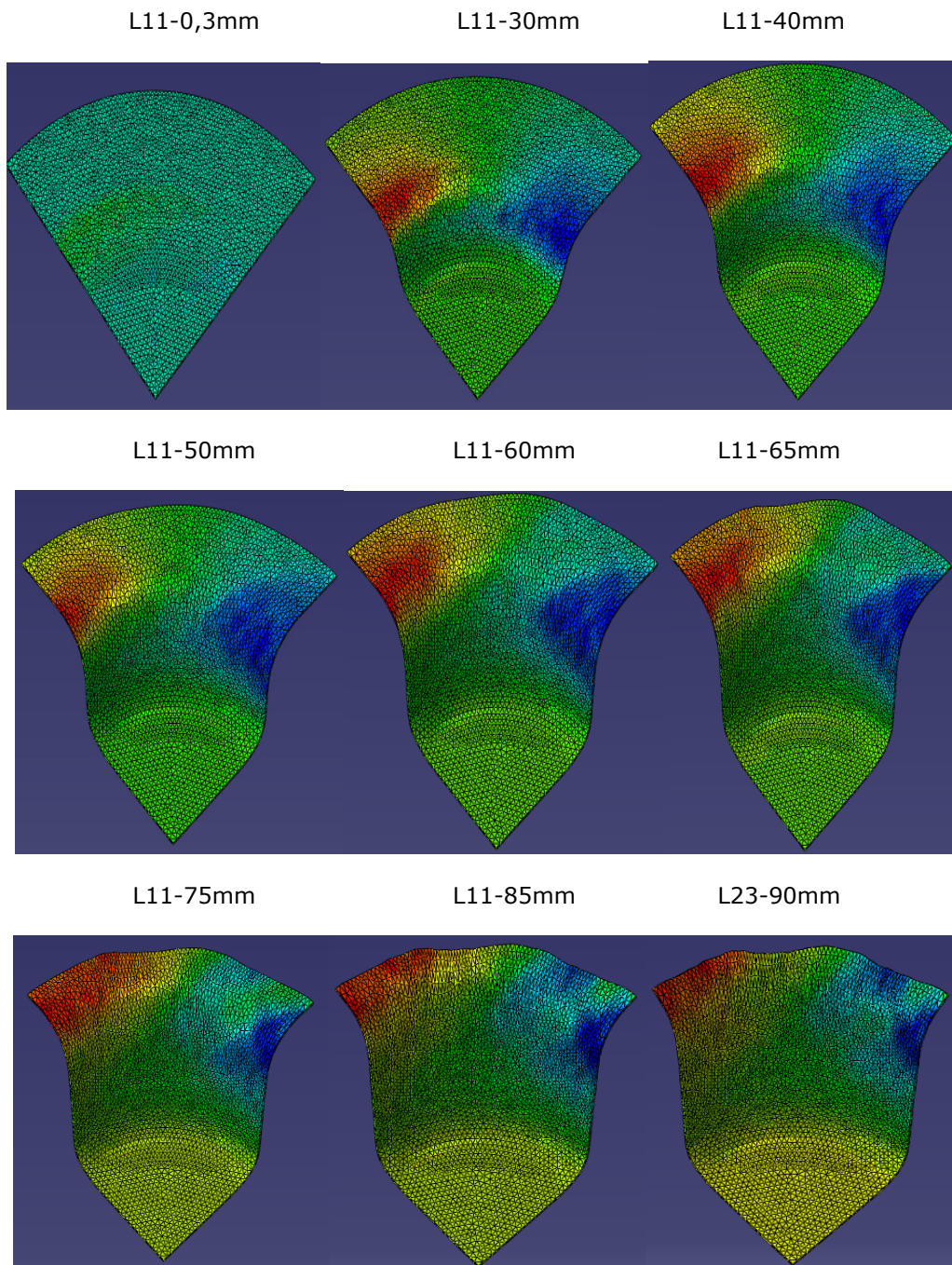


Figura 4.32. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L11 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

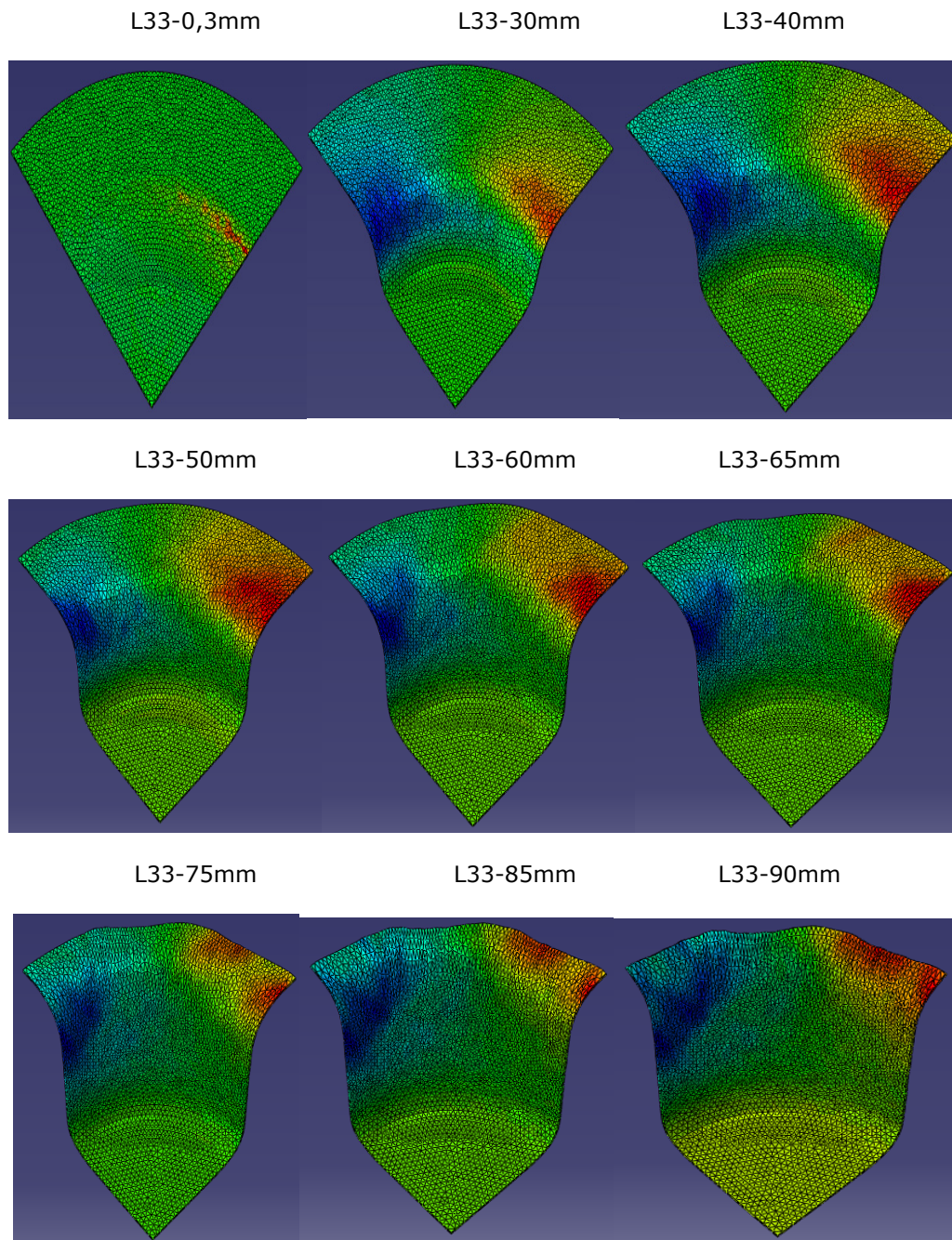


Figura 4.33. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L33 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

Observăm că solicitările compuse, dau naștere la cele mai puternice deformații și cele mai periculoase. Periculoase deoarece produc gătuiri ale materialului dacă forța

de ambutisare produce o tensiune care să învingă ecrusarea locală instalată.

Din punctul de vedere al mărimii deformației, avem două componente logaritmice ca și elemente componente ale tensorului deformație, care produc deformații foarte mari L_{13} și L_{22} cele de pe razele elementelor active de lucru și din peretele reperului ce se formează. Acestea sunt mai mari ca și cele discutate mai sus și care produc în mod direct gătuiri și subțieri pronunțate în zonele lor de acțiune. Aici este de menționat următorul fapt: deformațiile pe direcția ambutisării Y de tipul alungirilor sunt foarte mici în comparație cu cele pe direcțiile Z și X , datorită faptului că materialul ecrusându-se mai repede în aceste zone, se deformează mai puțin.

În ceea ce privește componentele L_{13} (de pe razele active de lucru) și L_{22} (din peretele reperului) pe direcția de ambutisare Y , menționez că doar o mică parte din această deformație instantanee se regăsește sub formă de alungire pe axa Y . Modul de descărcare în foaia de tablă a acestei deformații instantanee este sub formă de subțiere a reperului pe zonele de acțiune sau sub formă de gătuiri și fisuri ceea ce este de nedorit.

Deformațiile instantanee L_{13} ca și componentă a tensorului dinamic al deformațiilor produce subțierea materialului foii de tablă în special pe raza matriței active de lucru. În situațiile în care din construcție raza matriței ar fi prea mică atunci, tensiunile care s-ar crea în această zonă ar duce la deformații instantanee mari care ar gătui reperul imediat pe zona razei matriței.

După cum se observă și din figura 4.34, distribuția deformațiilor instantanee prezintă o zonă centrică de colorație în roșu pe distribuție, care reprezintă zona de concentrare și de pornire a propagării deformațiilor. Deformațiile sunt exercitate pe o direcție radială în masa foii de tablă, diminuându-se la o anumită distanță și totodată contopindu-se cu celelalte deformații instantanee.

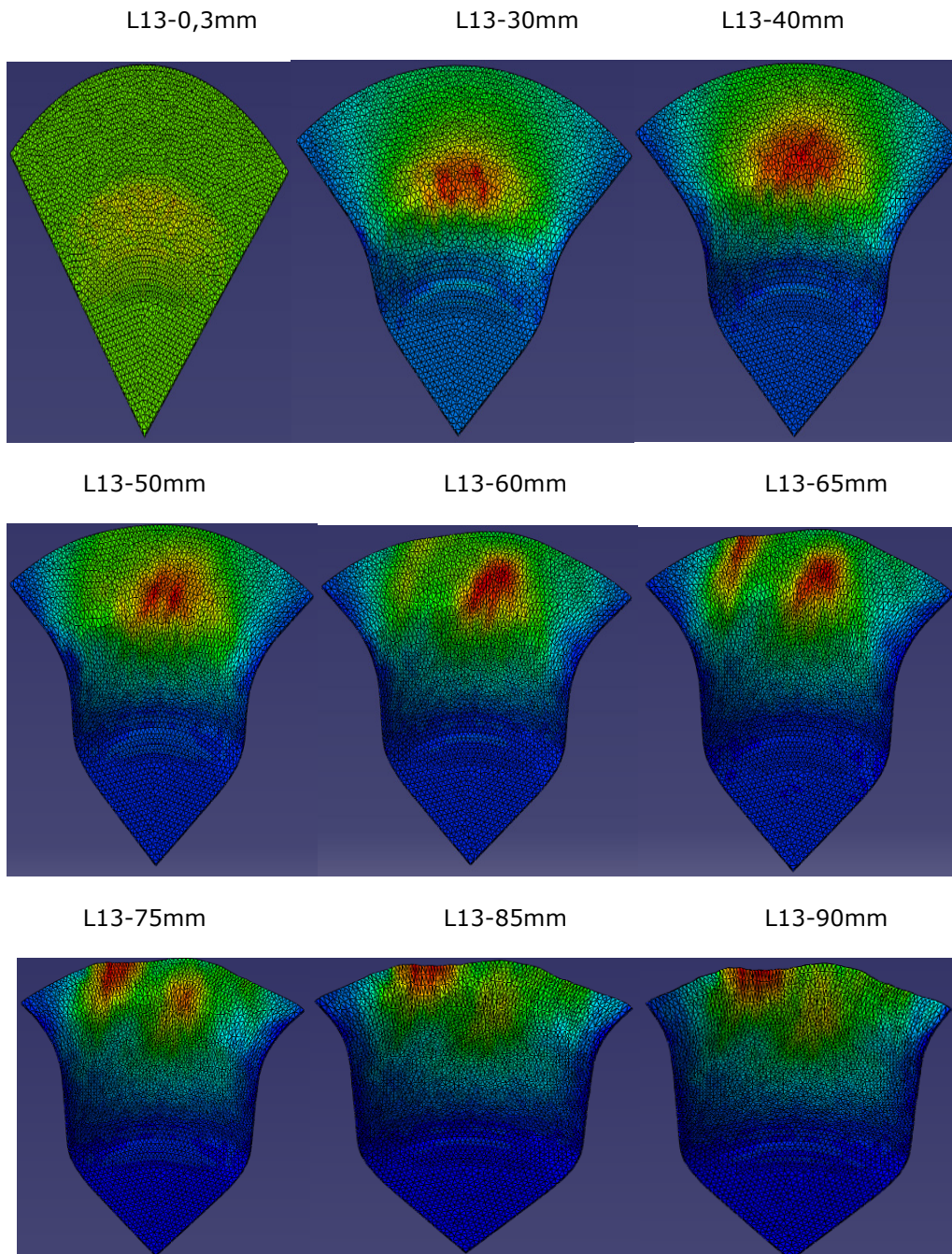


Figura 4.34. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L13 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

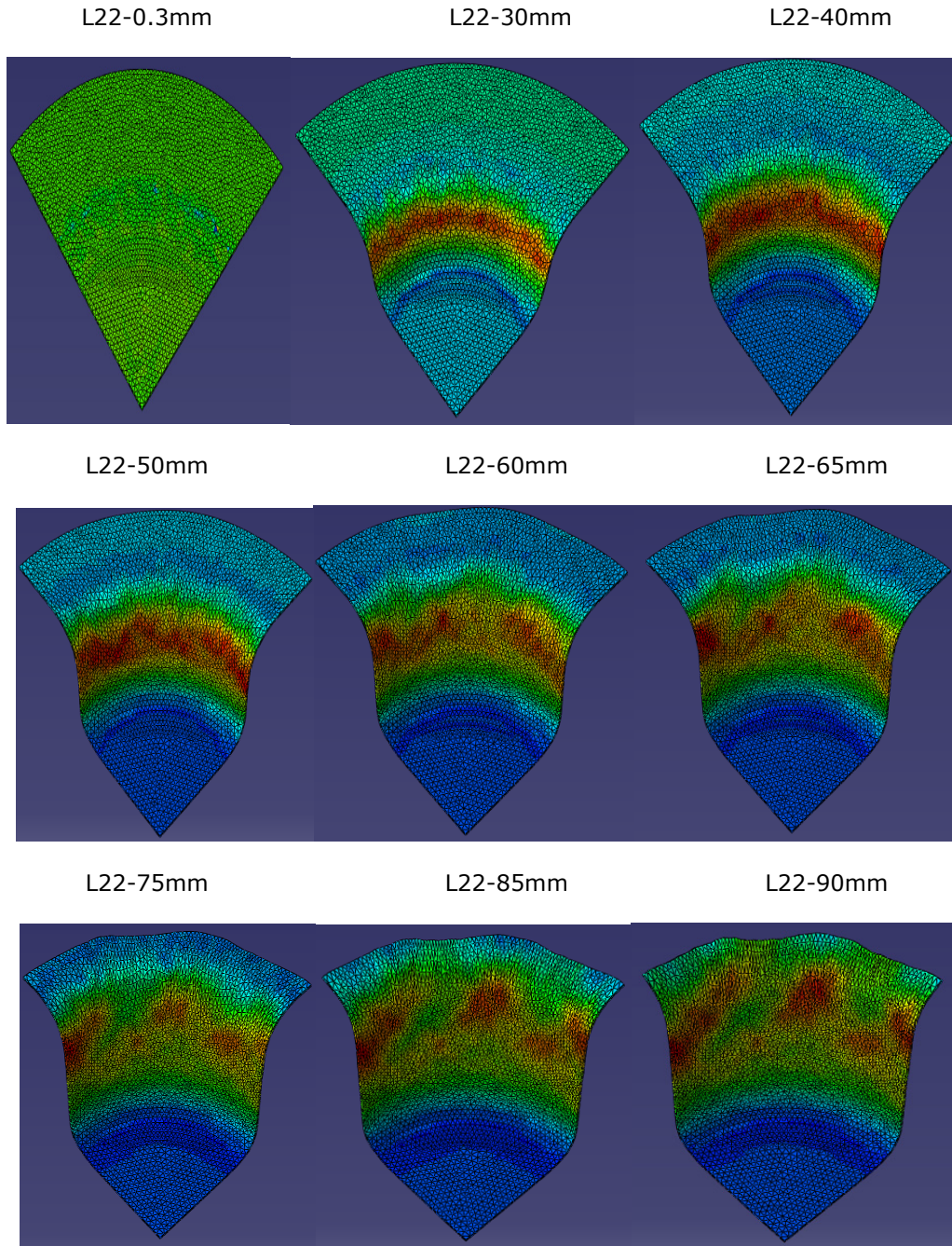


Figura 4.35. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L22 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

Observăm în figura 4.35 că în peretele sfertului de reper ce se formează, acționează numai componenta logaritmică L22. Dacă am extrapola cazul de față în alt sfert de reper din componenta modelului, constatăm că tot L22 ar fi componenta răspunzătoare cu deformația instantanee din perete. Conform figurii 4.35 observăm că la adâncimea de 30 mm componenta logaritmică a deformației instantanee L22 prezintă în imediata vecinătate a razei matriței o zonă centrico-axială dispusă radial în peretele reperului, în care peretele curge plastic (zona marcată cu roșu).

Până la adâncimea de 65 mm această zonă de care vorbim crește, după direcția axială în peretele reperului, descrescând ca valoare către zonele de graniță cu razele elementelor active de lucru.

De la adâncimea de 65 mm până la finalul ambutisării, deformația instantanee se disipă relativ uniform în întregul volum de existență al peretelui reperului format. Încă de la începutul ambutisării, deformațiile plastice coexistă cu cele elastice. Doar de la 30 mm deformațiile plastice își fac simțită prezența mai mult. Ponderarea deformațiilor instantanee plastice în perete o face combinat: inelul de reținere prin reținerea controlată a foii de tablă, pentru a evita cutarea foii, împreună cu lubrifiantul care asigură o lunecare bună a foii de tablă între inelul de reținere și foaie, respectiv între foaia de tablă și matriță.

Conform distribuției din figura 4.35, rămân în perete zone de maximă deformație instantanee pentru ultimele, adâncimi de ambutisare, care la sfârșitul ambutisării, după încetarea acțiunii poansonului, își reduc din valoare respectiv din zona de acțiune, reperul format astfel, echilibrându-se.

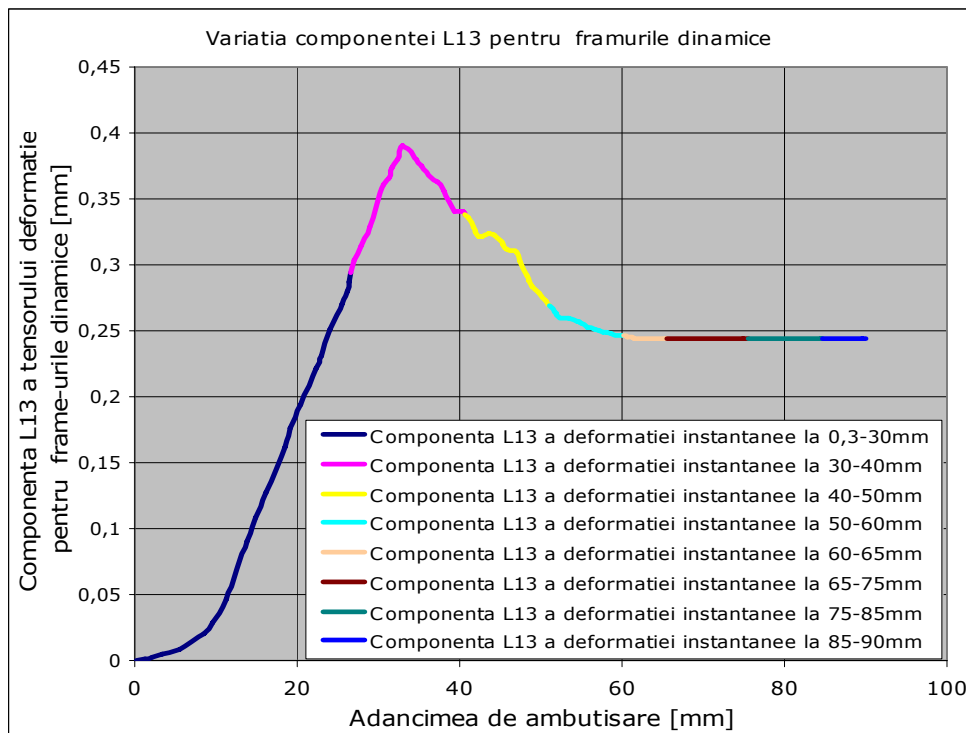


Figura 4.36. Evoluția deformației instantanee pentru componenta L13 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

Deformațiile instantanee L13 și L22 lucrează împreună și dau naștere la deformații remanente de genul găturilor (eveniment nedorit de altfel) sau la finalul ambutisării, subțieri locale remanente. Observăm în graficul din figura 4.36 că deformația instantanee are cea mai mare valoare cuprinsă între 0,3-0,4 mm pentru adâncimea de 30-40 mm.

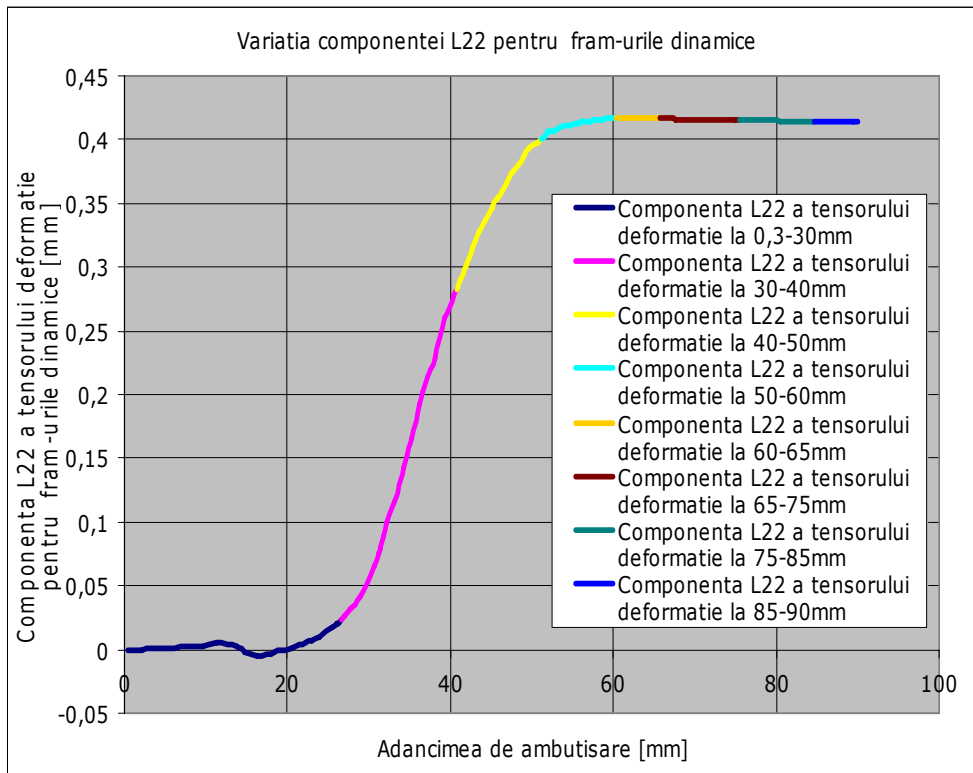


Figura 4.37. Evoluția deformației instantanee pentru componenta L22 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni

Similar cu graficul de mai sus, în graficul 4.37 deformația instantanee L 22 are o pantă activă pronunțată de la 30 mm adâncime și se conturează până la finalul ambutisării având o valoare maximă de peste 0,4 mm. Subțierea la finalul ambutisării are valoarea ultimei deformații instantanee undeva peste 0,4 mm.

4.4. Tensiuni și deformații în cazuri speciale de ambutisare

În acest subcapitol am pus în lumină două situații de ambutisare. Un prim caz este cel în care datorită unei forțe de apăsare prea mari materialul foi de tablă se rupe, și un al doilea caz în care avem o grosime mai mare a foi de tablă pe care o ambutisăm respectiv 1,25mm. Pentru primul caz cel în care foaia de tablă se rupe avem prezentate în figurile de mai jos distribuția tensiunilor până la ruperea totală a

104 Exemplul de calcul al tensiunilor și deformațiilor utilizând modelul numeric-4
materialului foi de tablă.

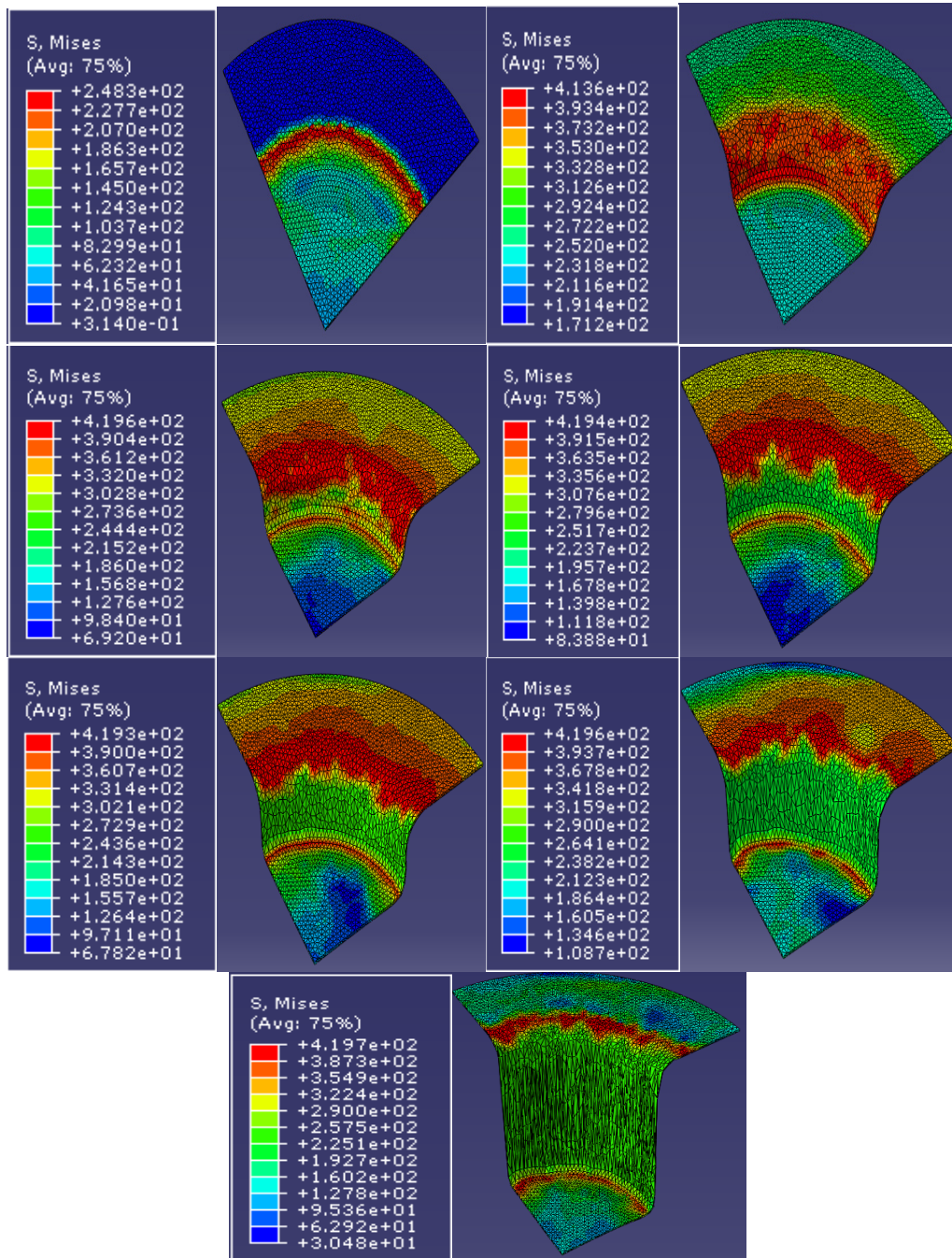


Figura 4.38. Evoluția tensiunii instantanee până la ruperea materialului foi de tablă pentru o forță de apăsare există

Materialul foii de tablă așa cum o arată și figura de mai sus ajunge practic datorită apăsării să se lipească de elementele active de lucru ducând la curgerea plastică însoțită de rupere a materialului. Tensiunile sunt foarte mari până la adâncimea de 30mm după care tabla fiind blocată sub inelul de reținere tensiunile depășesc valorile preponderent elastice în zona de perete a reperului trecând în zona preponderent plastică. Menținându-se acțiunea procesului în această zonă preponderent plastică are loc curgerea cu ruperea materialului foii de tablă, reperul fiind un rebut irecuperabil.

Conform figurii 4.38 programul a înregistrat curgerea cu rupere până la o adâncime de ambutisare de 60mm, prag la care datorită setărilor implicite a programului procesul de ambutisare este oprit de către program sub forma unei erori de procesare în cazul în care ruperea este pronunțată.

Din această cauză mărimea ruperilor sub forma deformațiilor pe raza matriței respectiv în peretele reperului sub forma subțierilor pronunțate nu se pot arata și nici măsura sub o anumită formă.

Ca și o perspectivă de continuare a tezei atât pentru regimurile dinamice la viteză constantă cât și pentru cele dinamice cu viteză variabilă se poate realiza un model numeric pe modulul explicit din Abaqus 6.8-1

Cazul al doilea despre care am vorbit mai sus este cel în care tabla are grosime standardizată de 1.25mm. Distribuțiile de tensiune sunt prezentate în figura 4.39 pornind de la 0 la 90 mm adâncime de ambutisare

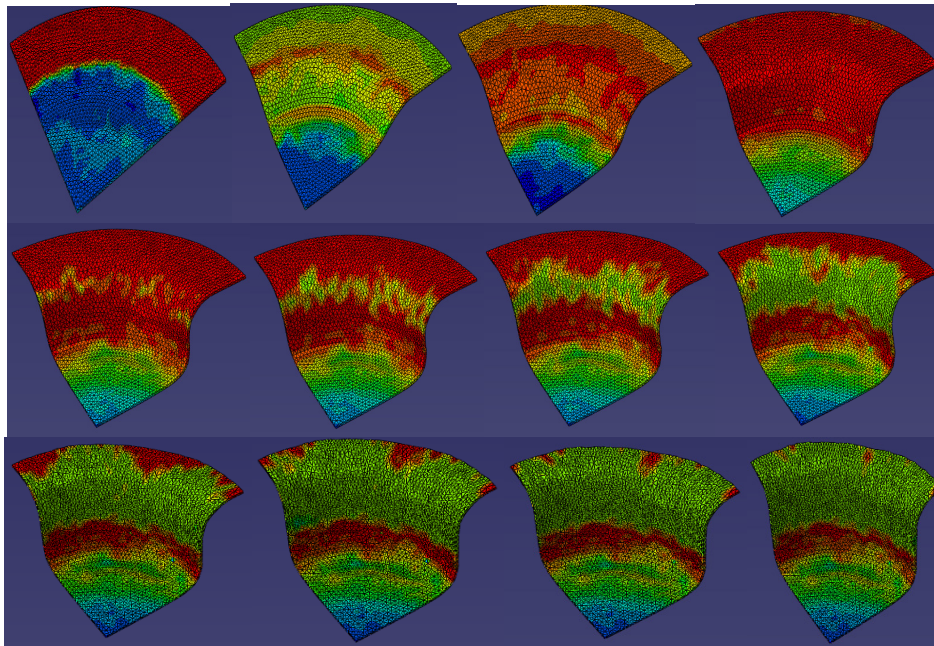


Figura 4.39. Modul de distribuție al tensiunii instantanee până la adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm

Deformațiile din peretele reperului (L13) respectiv cele din reper de pe raza matriței (L 22) ca și distribuții de deformație sunt la fel ca cele pentru tabla de un 1mm cu foarte mici deosebiri. În figura 4.40 se observă sub formă grafică modul de variație al tensiunii pe parcursul ambutisării prin tabla de 1,25 mm grosime

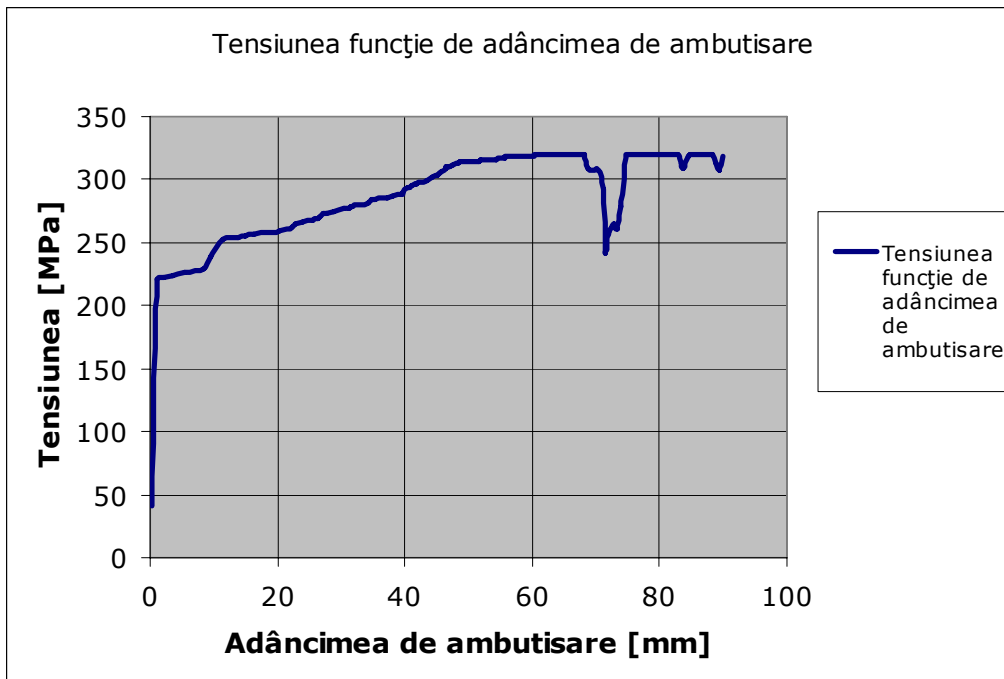


Figura 4.40. Evoluția tensiunii instantanee până la adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm

Observăm că tensiunea instantanee are un prag mai ridicat de stabilizare fapt care duce la înregistrarea unei tensiuni de peste 300 MPa. După această tensiune abia pe la aproape 70mm adâncime are loc ieșirea de sub inelul de reținere mult mai ușor a materialului.

Ceea ce este de observat la table din același material dar mai groase de 1mm este faptul ca acestea tind mult mai repede către lipire de matrița de lucru. De aceea și descărcarea tensiunii mai pronunțat după 70mm adâncime, lipirea făcându-se simțită pe la 500 adâncime de ambutisare.

Ecrusarea în timpul procesului de ambutisare la table mai groase de un mm este mult mai pronunțată și își face simțită prezența mult mai evident ca la tablele de grosime un mm sau mai subțiri. Acest lucru se evidențiază prin comparația dintre graficele 4.25 respectiv 4.40 care este redată în figura 4.41.

Observăm că panta de salt a tensiunii pentru tabla de 1 mm grosime este mai mică iar pentru cea de 1,25 este mai abruptă, datorită prezenței într-un procent mai mare al ecrusării. Singurul punct comun unde tensiunea se egalizează ca valoare este la 30 mm adâncime de ambutisare la ambele grosimi de tablă.

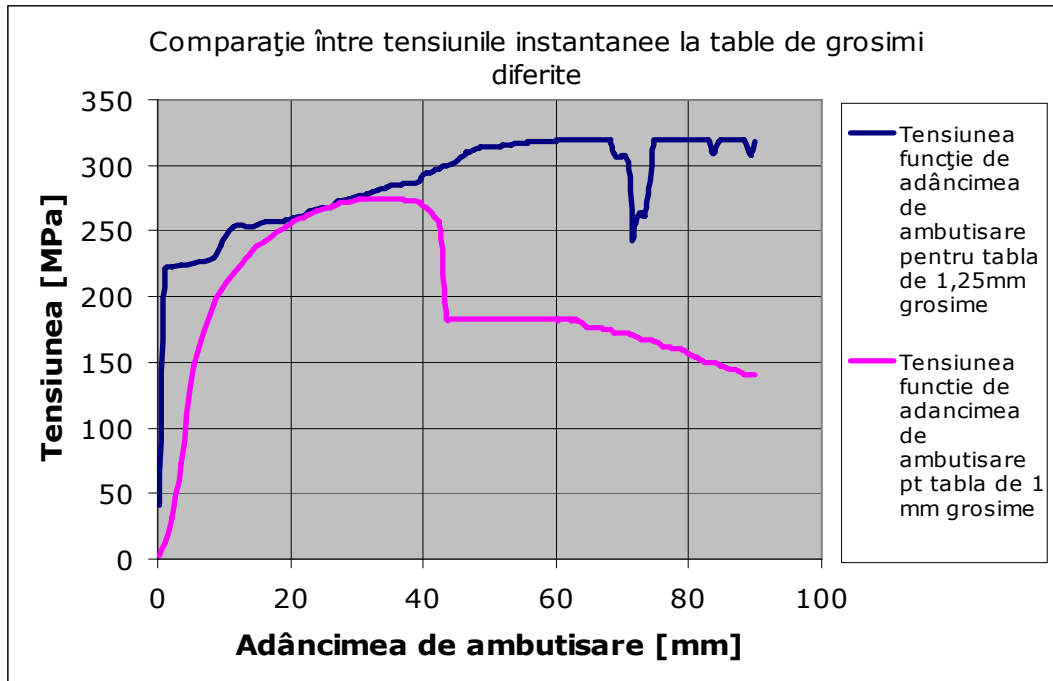


Figura 4.41. Comparație între evoluțiile tensiunilor instantanee pe adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm respectiv 1mm

Plecând de la 30mm adâncime de ambutisare în jos la tabla de grosime 1,25mm avem o continuă creștere a tensiunii până la adâncimea de 70mm aproape și apoi are loc curgerea tablei printre elementele active de lucru, pe când la tabla de 1mm grosime tabla are o curgere bună printre elementele active de lucru imediat după 40mm adâncime de ambutisare.

Cea ce mai putem spune este ca din figura 4.41 se observă o diferență foarte mare a șocului de descărcare a tensiunii la cedarea de sub inelul de reținere datorată în principal tendinței de lipire a tablei de grosime mai mare, tendință de lipire manifestată imediat după 40mm adâncime de ambutisare.

Ca și concluzie observăm că la table de grosimi mici până la 1 mm grosime după 40mm adâncime de ambutisare avem o curgere foarte bună a tablei printre elementele active de lucru, pe când la table de grosimi superioare celor de 1 mm avem la peste 40mm adâncime de ambutisare tendințe tot mai mari de lipire a tablelor de elementele active.

Tensiunile de ecrusare a tablelor de 0,5mm, maxim 1mm grosime sunt mai mici ca valoare decât la cele cu grosimi peste un mm aceasta observându-se din graficul din figura 4.41 prin diferența mare a tensiunii instantanee ne-descărcate la tabla de 1,25mm față de cea de un mm, urmărind porțiunea de valori ale tensiunilor după 45 mm adâncime de ambutisare.

Acea diferență este de fapt surplusul consistent al ecrusării mai mari la tabla de 1,25 mm grosime

Referitor la deformațiile pe raza matriței a reperului format din tabla de ambutisat respectiv a subțierii peretelui reperului format lucrurile stau mai bine ca

la tabla de 1 mm grosime. La tabla de 1,25mm grosime deformațiile instantanee sunt mai mici atât pe raza matriței cât și în peretele reperului format, datorită rezistenței mai bune oferite de tabla de 1,25 și de ecrusarea materialului tablei mai mare figura 4.42.

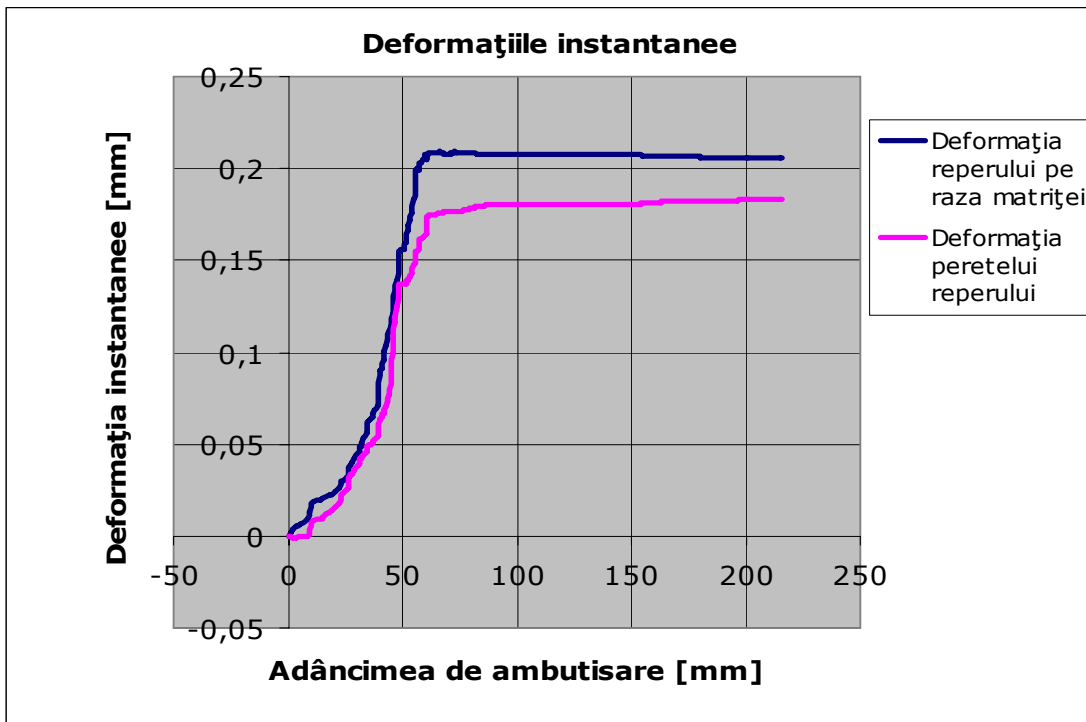


Figura 4.42. Evoluția deformațiilor instantanee până la adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm

Ca și în cazul tensiunilor, prin comparație cu deformațiile reperului supus procesului de ambutisare de grosime 1mm vom putea desprinde o serie de diferențe figura 4.43.

Ceea ce este foarte important de menționat este faptul că ecrusarea acumulată la adâncimile inferioare de ambutisare limitează foarte mult deformațiile atât cele ale reperului aflat pe raza matriței cât și cele ale peretelui reperului sub forma subțierilor.

După cum arată graficul 4.43 observăm că deformațiile la tablele mai mari de 1 mm sunt mai mici și nu se manifestă foarte pronunțat ca la cele de 1mm sau mai mici. La tablele de 1,25 mm grosime rămân în maxim 0,2 mm sau puțin peste respectiv la cele de 1 mm ajung la 0,4 mm și chiar 0,42mm.

Mai putem observa că deformațiile instantanee la tablele de 1 mm grosime apar mult mai repede ca și adâncime de ambutisare față de tablele cu grosime de 1,25mm

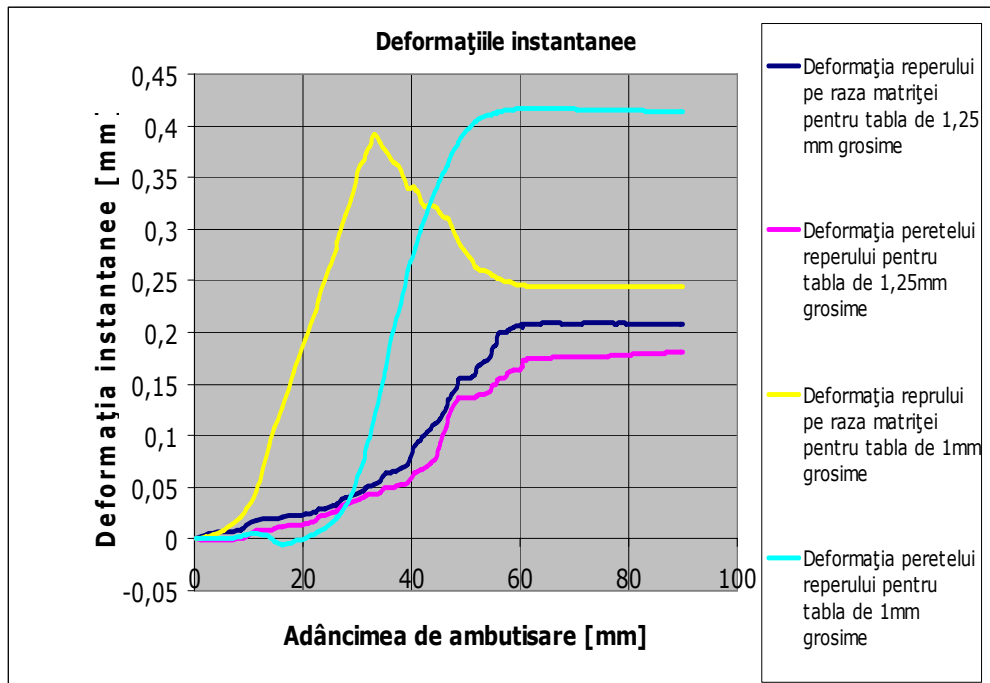


Figura 4.43. Comparație între evoluțiile deformațiilor instantanee pe adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm respectiv 1mm

4.5. Concluzii

1. Parcurgerea tuturor etapelor modelului de calcul implementat face un desfășurător a unei serii de distribuții de tensiuni și deformații instantanee în toată suprafața deformată a tablei funcție de adâncimea de ambutisare corespunzătoare pătrunderii poansonului la adâncimi diferite.
2. Seria de distribuții a tensiunilor și deformațiilor instantanee pe toate nodurile în pași succesivi dau o imagine foarte clară a modului de propagare a variației de tensiuni și deformații prin foaia de tablă pentru diferite adâncimi de ambutisare.
3. Ca și concluzie observăm că la table de grosimi mici până la 1 mm grosime după 40mm adâncime de ambutisare avem o curgere foarte bună a tablei printre elementele active de lucru, pe când la table de grosimi superioare celor de 1 mm avem la peste 40mm adâncime de ambutisare tendințe tot mai mari de lipire a tablelor de elementele active.
4. Ceea ce este foarte important de menționat este faptul că ecruisarea acumulată la adâncimile inferioare de ambutisare limitează foarte mult deformațiile atât cele ale reperului aflat pe raza matriței cât și cele ale peretelui reperului sub forma subțierilor.

110 Exemplul de calcul al tensiunilor și deformațiilor utilizând modelul numeric-4

5. Rezultatele modelului numeric de calcul implementat în programul Abaqus specifică în mod clar:

- a) Pozițiile secțiunilor critice în care apar tensiuni critice care pot duce la fisurare sau chiar ruperea materialului tablei
- b) Pozițiile secțiunilor de descărcare a tensiunilor și deformațiilor unde apar scăderi sau creșteri bruște ale acestora.

6. Programul scoate în evidență tensiunile și deformațiile instantanee a reperului care se formează pe raza matriței de ambutisare, în toate fazele de avans a poansonului, zonă cu cele mai mare probabilitate de fisurare sau rupere prin încovoiere a tablei. Tot în acest context putem spune că în cazul zonelor de construcție a peretelui apar subțieri a materialului, a căror valoare poate fi cunoscută aprioric.

5. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ÎN SCOPUL VALIDĂRII MODELULUI NUMERIC DE SIMULARE

5.1. Obiective

Realizarea standului experimental și a elementele de execuție implicate în realizarea experimentului. Validarea modelului numeric și implicații ale acestuia în contribuțiile autorului.

5.2. Proiectarea și execuția dispozitivului de ambutisare

Construcția standului experimental s-a făcut dimensional. Cotele de gabarit folosite în simulare s-au implementat în trasarea principalelor piese componente ale ansamblului dispozitiv de ambutisare.

Construcția este simplă, fără a implementa un calcul de rezistență, deoarece calculul a fost suprimat de modelul numeric. În cadrul acestuia cotele de gabarit pentru dispozitiv au fost date prin rularea acestuia în procesul de ambutisare rezultând astfel cote acoperitoare din punct de vedere al rezistenței pieselor la solicitările impuse în timpul procesului de ambutisare

Piese componente ale dispozitivului de ambutisare sunt redată mai jos în figurile 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 și 5.9 cu cotele aferente acestora.

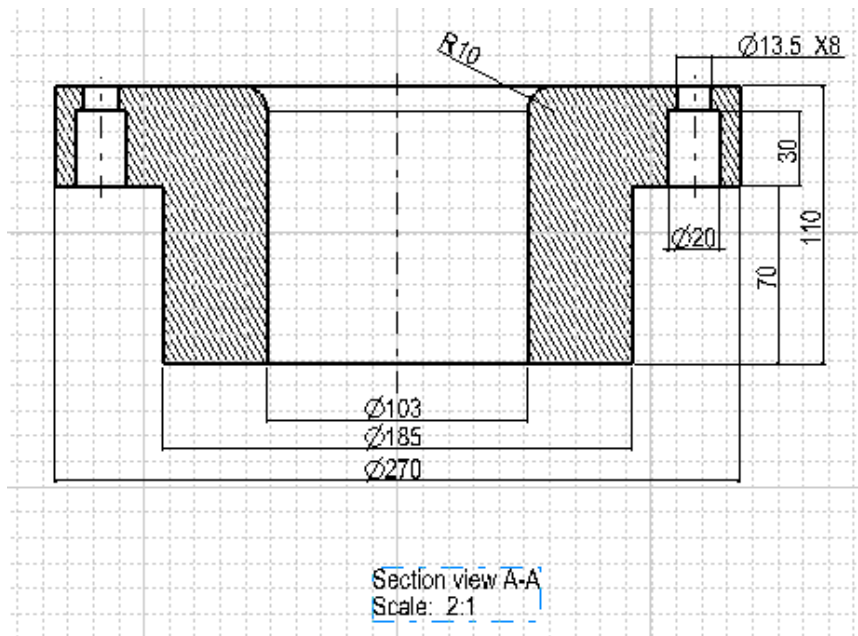


Figura 5.1 Desenul de execuție al matriței de ambutisare a dispozitivului
În figura 5.1 este redat desenul de execuție al matriței de ambutisare.

Construcția este simplă, matrița are un gabarit destul de considerabil, așezarea acesteia pe platoul mașinii de ambutisat făcându-se fără a fi necesar un sistem de prindere. Prelucrarea matriței s-a făcut dintr-un semifabricat cu cota exterioară de 270 mm diametru. Pe adâncimea de 70mm s-a executat o strunjire la cota de 185 mm diametru, după care s-a realizat găurirea locașului central la cota de 102,5 mm urmând ca până la cota de 103 mm, pentru a asigura un joc între poanson și matriță conform stas și o calitate a suprafeței matriței, să se facă o rectificare. Calitatea suprafeței interioare a matriței fiind necesară pentru a nu zgâria reperul care se formează, acesta fiind în contact direct cu suprafața matriței. Locașul central la cota de 103 mm se va unge cu lubrifianț pentru a asigura o lunecare bună a reperului în interiorul matriței sub acțiunea poansonului. Raza de atac a matriței R10 mm se va lăsa cu adaos 10,5 pentru rectificarea profilată necesară ca operație pentru a obține cota de R=10 mm. Găurile de diametru 13,5 cu zencuială de 20mm 8 la număr se vor executa pe freză cu comandă numerică sau pe freză cu platou cu divisor.

În figura 5.2 avem desenul de execuție pentru coloanele de ghidare a dispozitivului de ambutisare, acestea având rolul de a centra toate piesele componente ale dispozitivului cu matrița și poansonul de acționare.

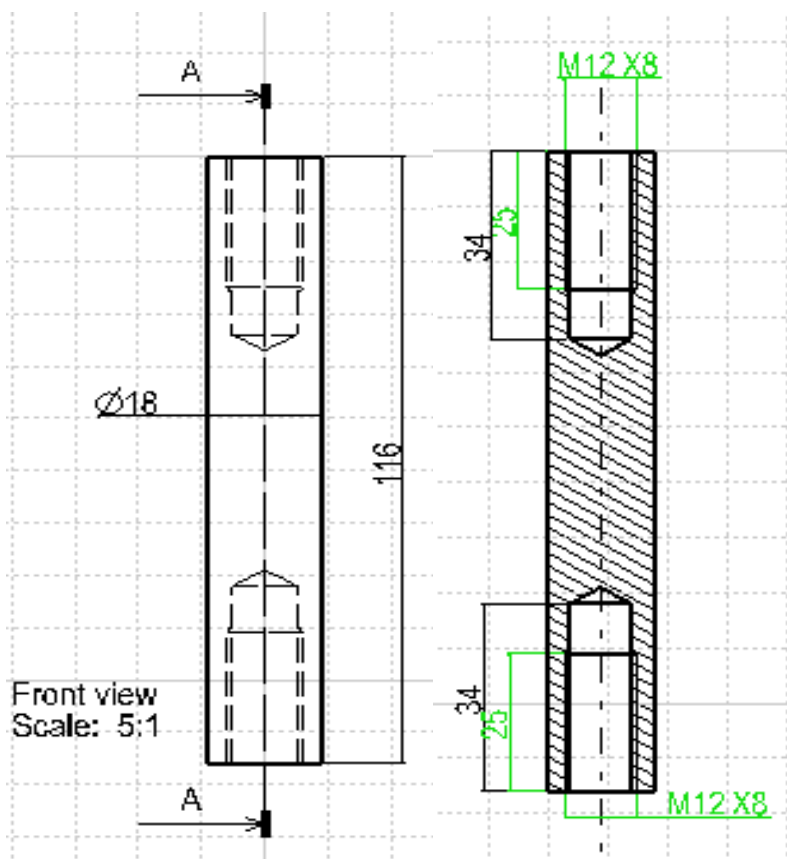


Figura 5.2. Desenul de execuție al coloanelor de ghidare a dispozitivului de ambutisare

Sunt executate la strung la cota de 18,5 mm diametru și 116 mm lungime apoi rectificate la cota finală de 18 mm. Apoi se dau la capetele coloanelor găurile de M12X8 (8 bucăți) adânci de 34mm și filetate pe o adâncime de 25mm. Următoarea componentă ce intră în ansamblul dispozitivului de ambutisare este placa de apăsare pe foaie figura 5.3. Ca și gabarit, placa de apăsare pentru început se debitează dintr-o foaie de tablă de grosime 20 mm la cota de 220 mm diametru după care se prelucrează pe strung la cota de 210 mm. Se prelucrează cu burghiu de 50mm, după care se execută cota de 112 mm diametru. Frezările de diametru 33 mm pe adâncime de 10mm se execută pe freză cu comandă numerică sau pe platou divizor. Frezările sunt dispuse la un pas unghiular de 45 de grade între ele și cu centrele cercurilor de diametru 33 mm pe un cerc de construcție de cota 156 mm. Materialul folosit pentru executarea pieselor componente este OL 37.

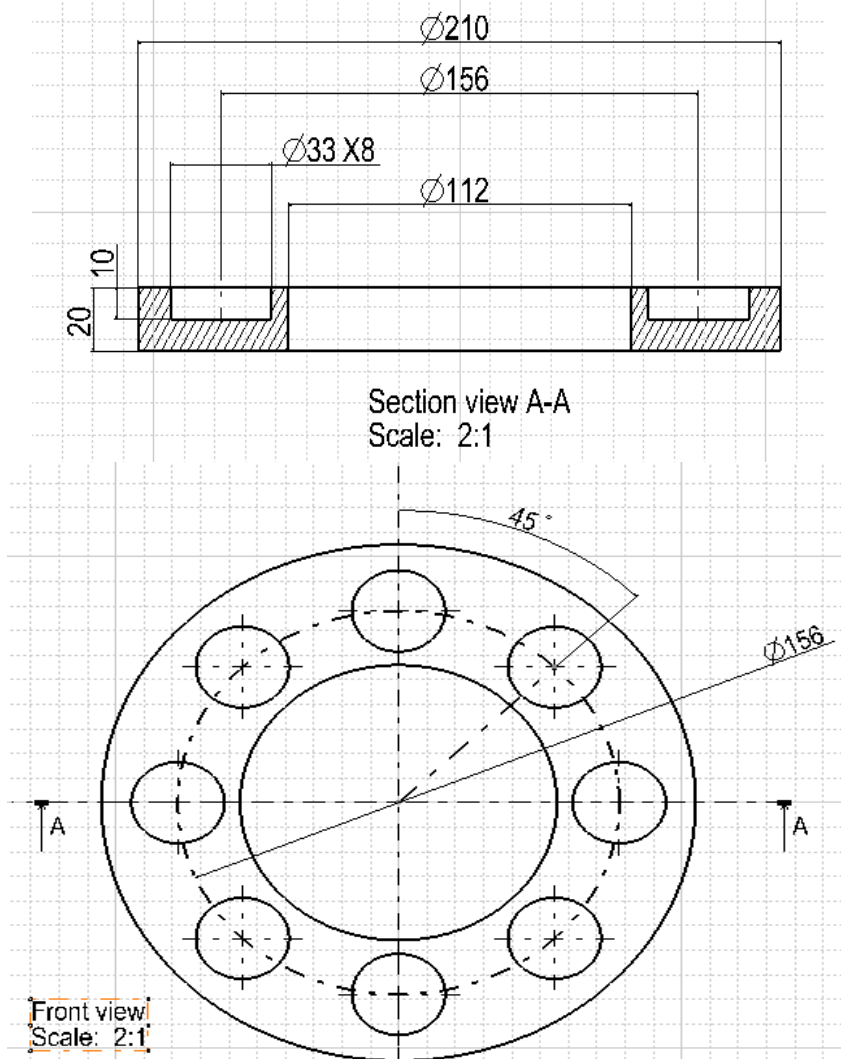


Figura 5.3 Desenul de execuție al plăcii de apăsare pe foaie

În cele 8 frezări adânci de 10mm și de diametru 33mm intră opt arcuri elicoidale cilindrice, care constituie elementul de tensiune al dispozitivului de ambutisare, figura 5.4.

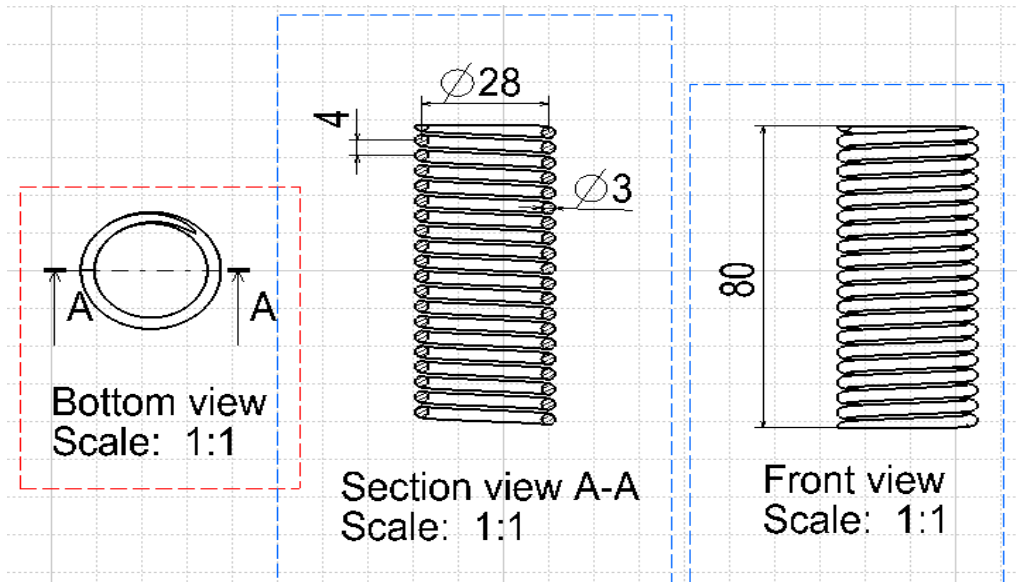
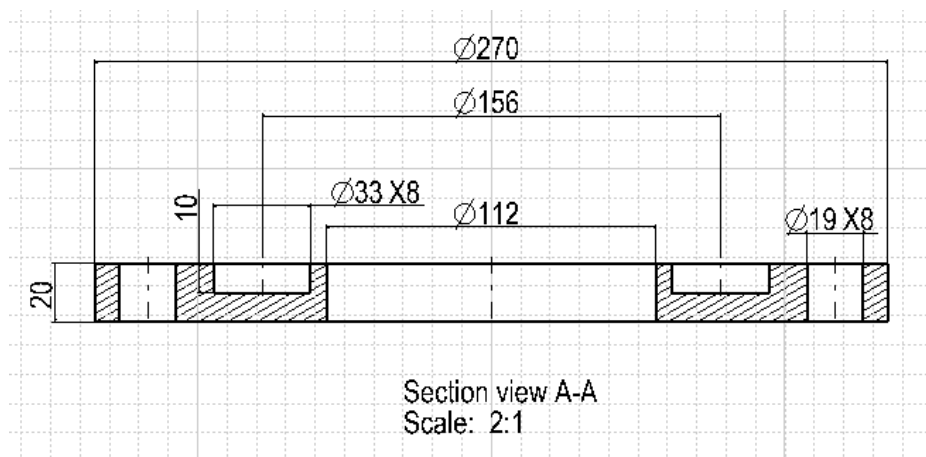


Fig 5.4. Desenul de execuție al arcurilor de tensionare

Cotele arcurilor din figura de mai sus sunt date pe arcul comprimat. Diametrul de 28 mm este diametru mediu al arcului care are grosimea sârmei spirei de 3mm, pasul arcului fiind de 4 mm iar materialul din care este executat este ARC14. Arcurile se fixează centrându-se în locașurile de diametru 33mm și adânci de 10 mm, atât în placa de apăsare pe foaie cât și în locașurile din placa culisantă (figura 5.5)



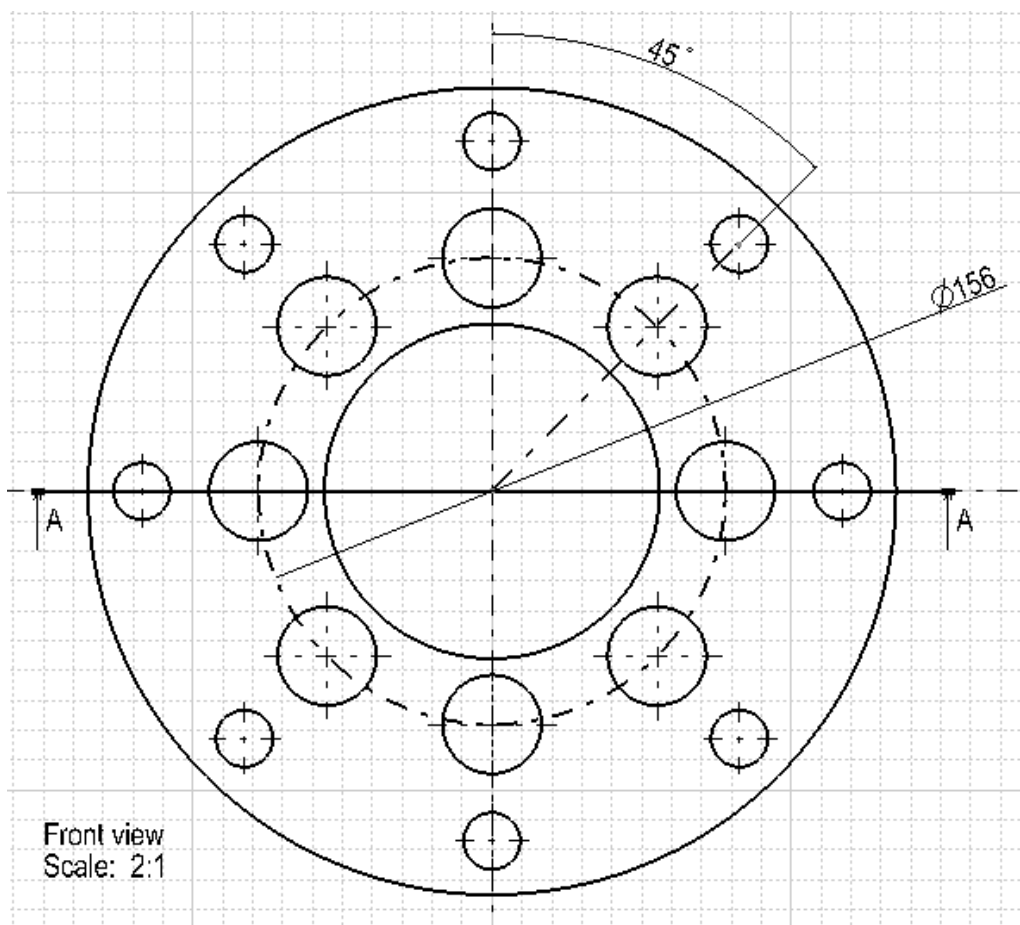


Figura 5.5. Desenul de execuție al plăcii culisante

Ca și la placa de apăsare pe foaie, placa culisantă se obține prin tăiere oxigaz dintr-o foaie de tablă de grosime 20 mm.

După prelucrare cu burghiu de 50 mm, placa se prelucrează pe strung atât pentru cota de 112 mm cât și pentru cea de 270mm eliminând adaosul de la tăierea cu flacăra.

Cu burghiu de 19 mm diametru se execută găurile de diametru 19 în număr de 8 bucăți care servesc la centrarea pe coloanele prezentate la figura 5.2. Ultima operație constă în realizarea frezărilor de diametru 33 mm, adânci de 10mm.

Componenta care leagă pachetul de tensionare și care se prinde cu șuruburi pe coloanele de la figura 5.2, este prezentată în figura 5.6. Debitarea semifabricatului cu prelucrările pe strung aferente sunt similare ca la celelalte componente. Pentru găurile filetate de M30X8 și cele cu zencuire de 20mm de cotă 13,5 (8 bucăți) prelucrările se fac pe freză cu comandă numerică sau pe freză cu platou divizor.

În găurile de M30X8 se introduc șuruburi care strâng arcurile, respectiv cu ajutorul lor se realizează apăsarea pe foaia de tablă supusă ambutisării. În figura 5.7 este schițat poansonul dispozitivului de ambutisare. Este tratat termic, obținându-se

o oarecare duritate și se centrează pe contra-placa de apăsare în cota de 101 mm.

După realizarea pe strung a găurii centrale cu adaosul de prelucrare standardizat, gaura se rectifică la cota 101 mm pentru a asigura centrarea poansonului cu matrița de ambutisare.

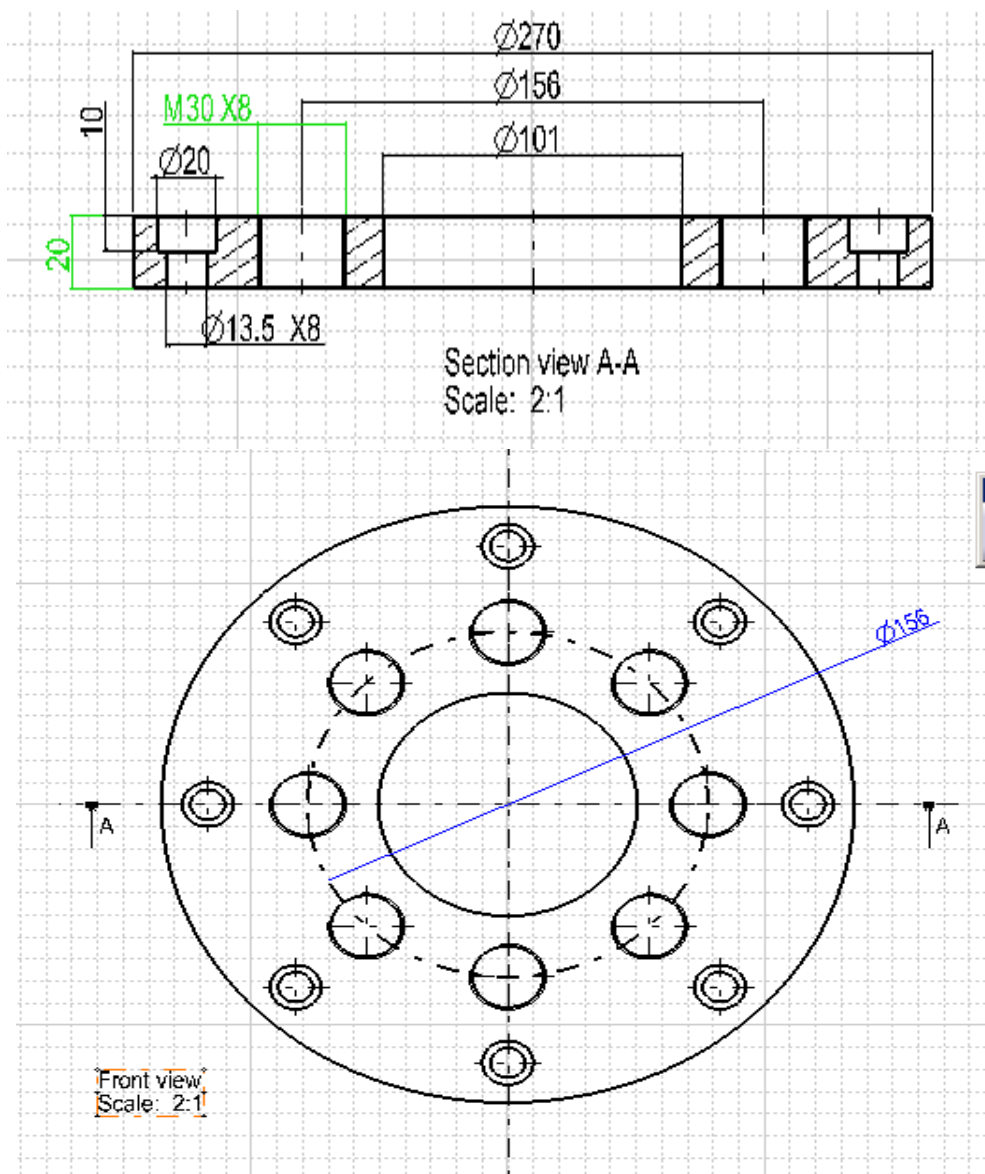


Figura 5.6. Desenul de execuție al contraplăcii de apăsare

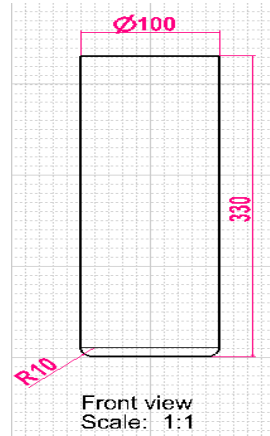


Figura 5.7. Desenul de execuție al poansonului

Componentele mai sus prezentate montate dau naștere la dispozitivul de ambutisare sau standul experimental. Pentru a ne face o idee cât mai precisă de modul cum ar arăta asamblat din punct de vedere tehnic în secțiune dispozitivul de ambutisare este prezentat în figura 5.9. În figura 5.8 se arată în secțiune 3D.

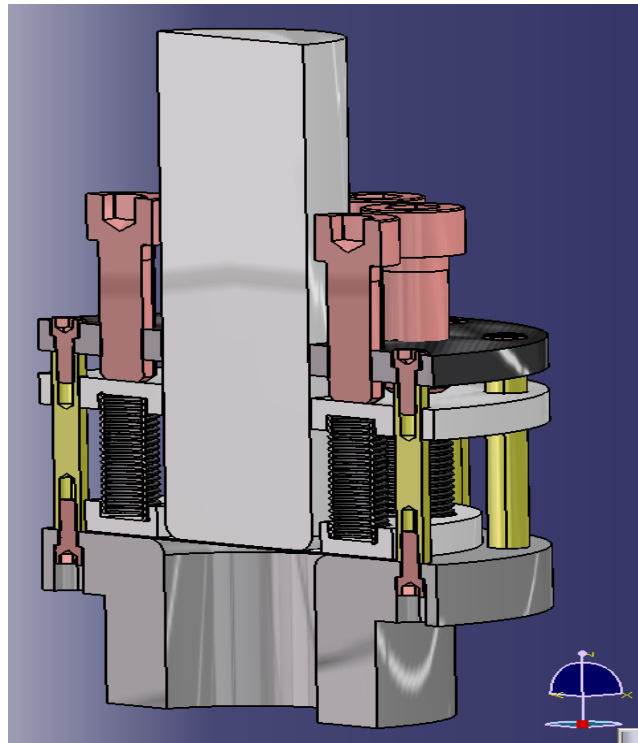


Figura 5.8. Dispozitivul de ambutisare reprezentat în secțiune 3D tridimensional

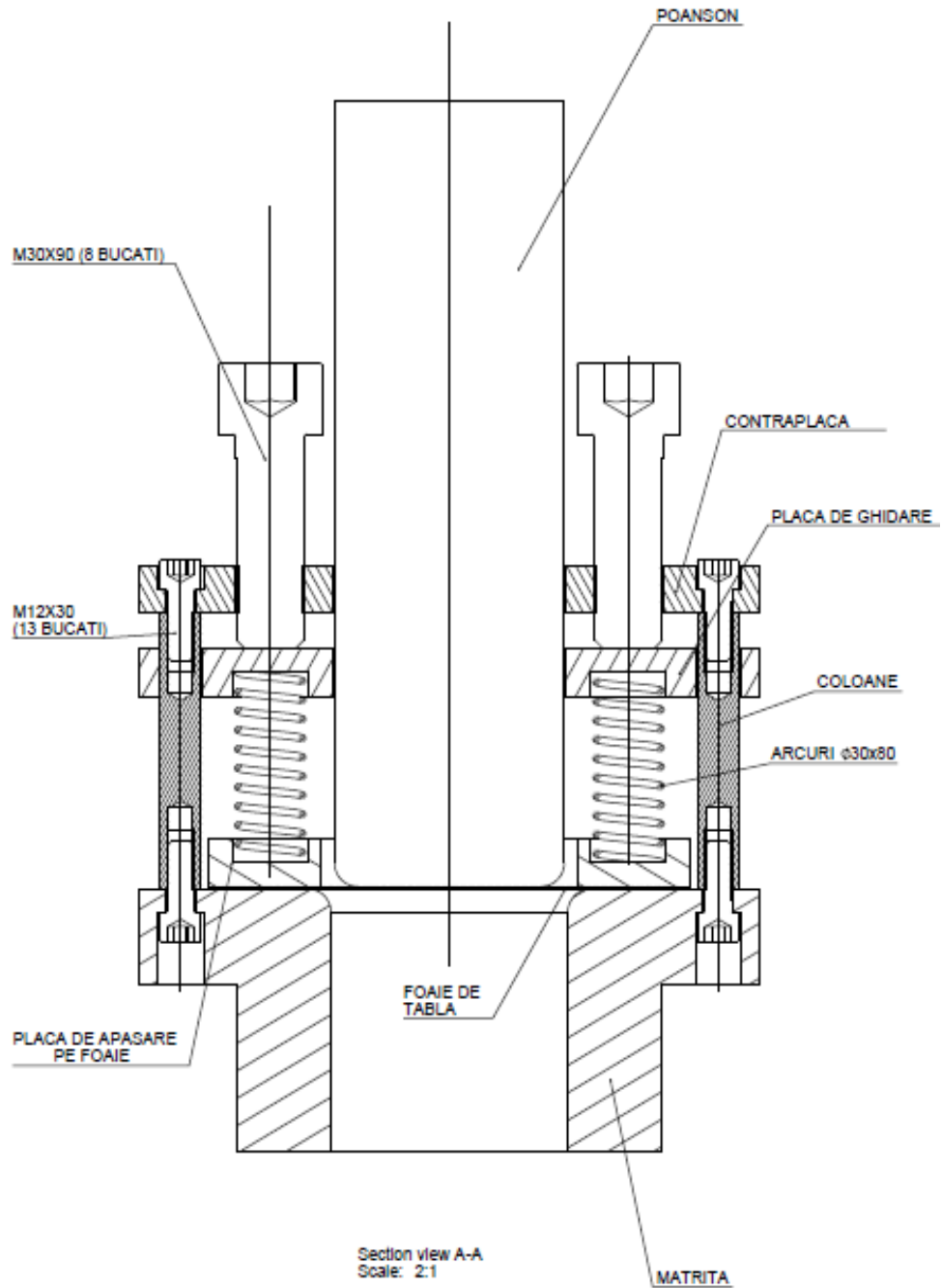


Figura 5.9. Desenul de ansamblu al dispozitivului de ambutisare pregătit pentru acționare.

În cele ce urmează foarte succint am să prezint (la modul grafic) operațiile care concură la pregătirea dispozitivului de ambutisare pentru ambutisat. Putem spune că prin prezentarea celor de mai jos se dă un mod de folosință și de funcționare a dispozitivului de ambutisare. Operațiile succesive de pregătire a dispozitivului de ambutisat sunt redată în figurile 5.10 ... 5.17.

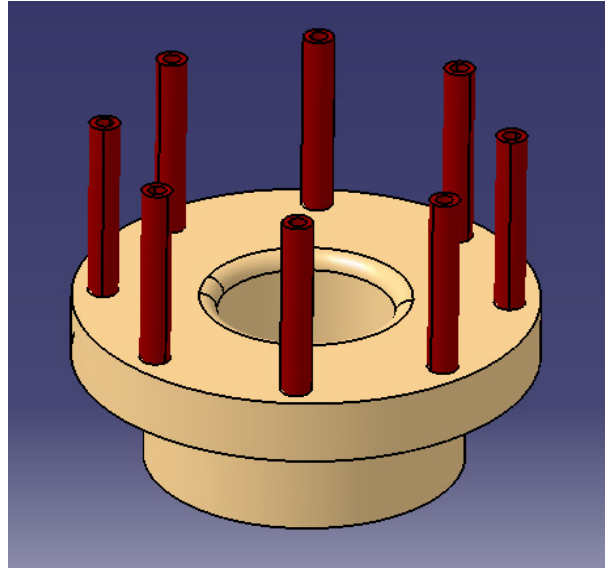


Figura 5.10. Așezarea matriței de ambutisat pe platoul mașinii de tracțiune cu coloanele montate în matriță

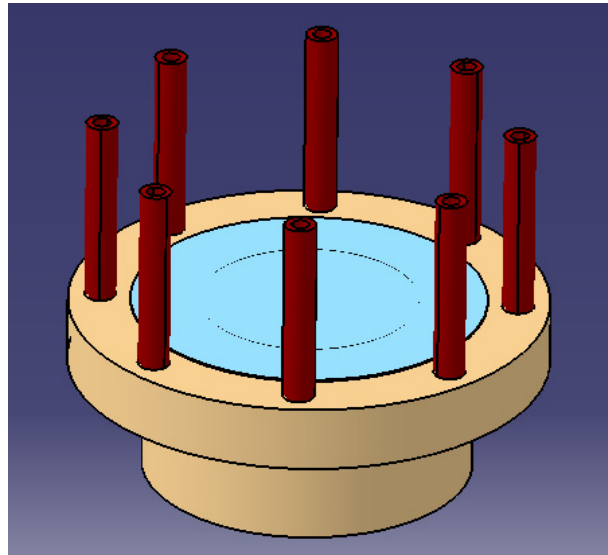


Figura 5.11. Așezarea în matrița unsă în prealabil a foii de tablă (culoarea albăstră)

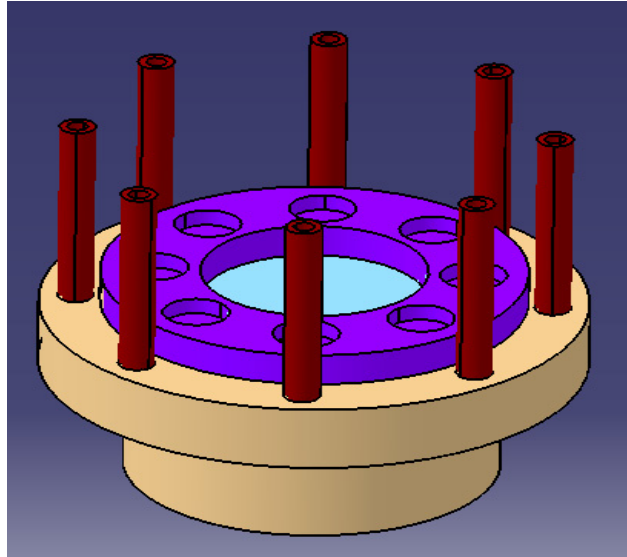


Figura 5.12. Așezarea pe foaia de tablă unsă pe cealaltă parte a plăcii de apăsare pe foaie (culoare mov)

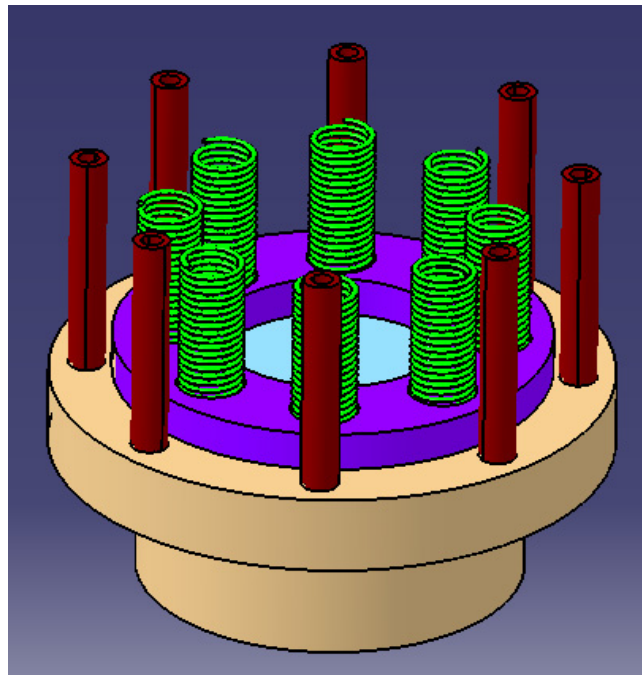


Figura 5.13. Poziționarea arcurilor pentru tensionare (culoare verde) în locașurile plăcii de apăsare pe foaie

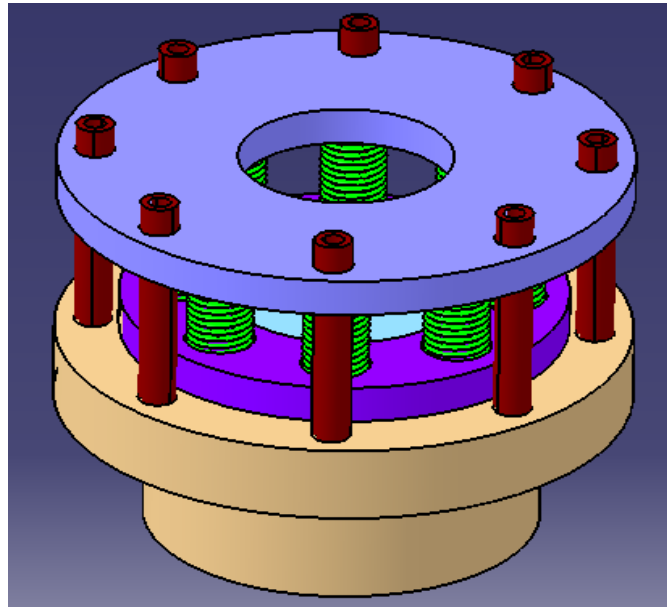


Figura 5.14. Poziționarea plăcii culisante centrată pe coloane, respectiv centrarea arcurilor pe poziție în locașurile de 33 mm diametru în placa culisantă

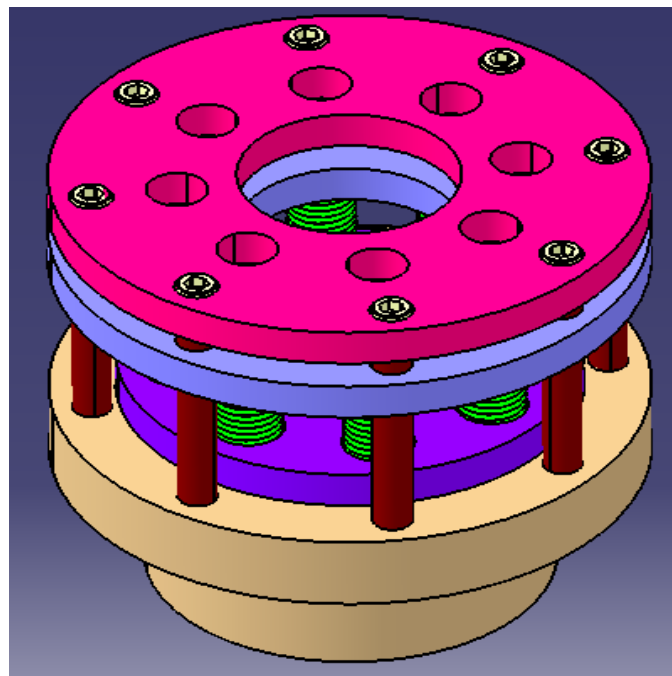


Figura 5.15. Poziționarea contra-plăcii și fixarea acesteia pe coloanele dispozitivului

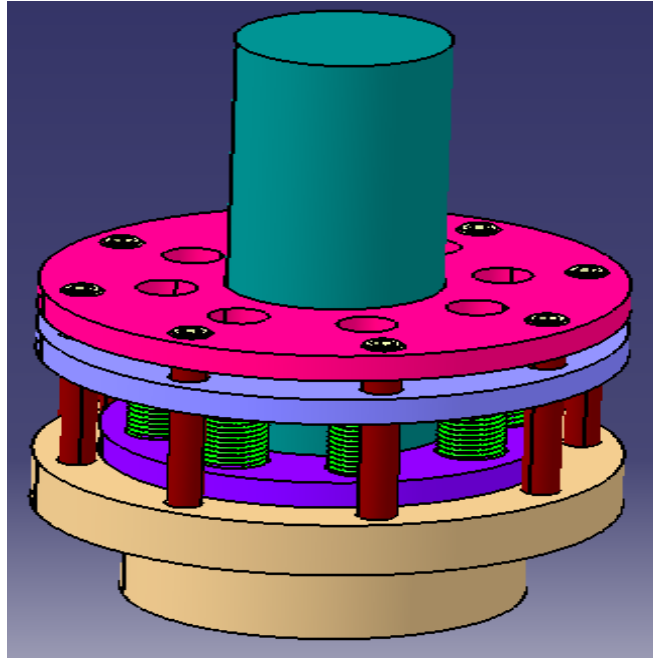


Figura 5.16. Poziționarea poansonului și fixarea acestuia pe foaia de tablă din dispozitiv

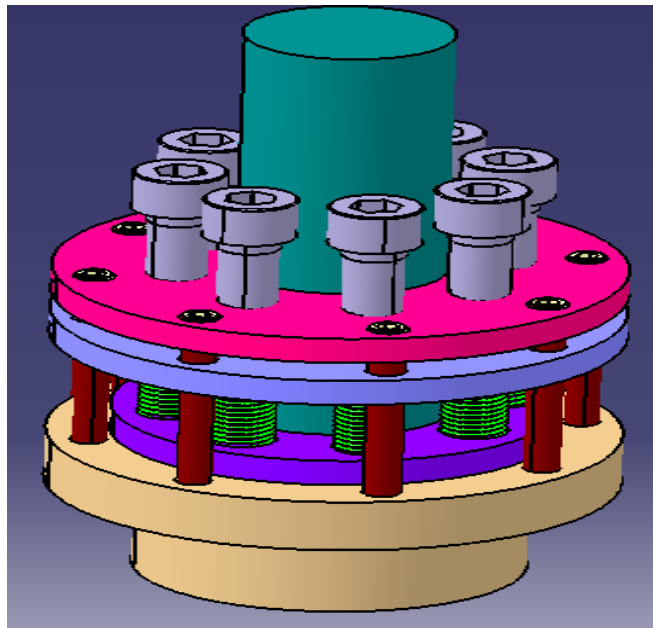


Figura 5.17. Poziționarea șuruburilor de tensionare și preîncărcarea dispozitivului

5.3. Încercări experimentale

Desfășurarea experimentului cuprinde două faze. Într-o primă fază se realizează tracțiunea unor fâșii de tablă din materialul supus ambutisării, urmând ca datele prelucrate să servească ca suport în simularea numerică, iar a doua fază este realizarea experimentului propriu - zis.

5.3.1 Determinarea curbei de tracțiune sigma-epsilon a materialului foii de tablă

După cum am arătat și în capitolele precedente, aceste date de material din curba caracteristică a materialului în care au fost reprezentate tensiunea funcție de deformație, au servit la realizarea simulării. Aceste solicitări la tracțiune au fost făcute în faza de experiment. În figura 5.18 a și b este prezentată mașina LBG TC 100 pe care se realizează procesul de tracțiune a fâșiilor de tablă.

Cu ajutorul acestei mașini de tracțiune, epruveta este trasă până la rupere așa cum se observă din figurile 5.18 și 5.19 și în același timp se măsoară și modulul de elasticitate al materialului cu ajutorul extensiometrului montat cu două role de prindere pe epruveta de tablă (figura 5.19).



Figura 5.18. Mașina de încercat epruvete la tracțiune LBG TC 100



Figura 5.19. Fâșia de tablă cu extensiometru montat între bacurile mașinii de încercat epruvete la tracțiune, LBG TC 100

5.3.2. Încercări experimentale la ambutisare

5.3.2.1 Introducere

În urma simulării numerice s-au obținut o serie de rezultate care necesită o verificare experimentală spre a obține o validare modelului implementat. Deși există o serie de alte programe care pot să dea și ele o formă grafică a fenomenelor ce însoțesc un proces complex de ambutisare, cu ajutorul softului Abaqus 6.8-1 studiul tensorial și al deformațiilor în cazul ambutisării este unul foarte amplu și în plus redă și elemente dinamice ceea ce nu se obține cu alte programe.

Modelul realizat cu ajutorul softului Abaqus varianta 6.8-1 este unul complex cu ajutorul căruia se pot obține atât distribuții ale tensiunilor și deformațiilor cât și graficele aferente nu numai la regim static ci și la regim dinamic și regim tranzitoriu. Tensiunile rezultate din simulare se pot prezice de către program cu ajutorul modelului în orice moment al simulării și la orice alte setări impuse modului de desfășurare a experimentului.

Programul cu ajutorul căruia se face simularea modelului conține în structura sa o serie de elemente de soft care impun verificarea legilor de rezistență a materialelor și a deformațiilor.

Conform [107] în urma simulării, modelul rulat cu ajutorul programului Abaqus afișează zona care rămâne în continuare tensionată. Această zonă rezultă ca element de control a modului de desfășurare a procesului dinamic rulat de model.

Dacă în urma comparării anumitor rezultate obținute cu ajutorul modelului numeric și rezultatele obținute experimental diferența se încadrează într-o eroare admisă sub 5 la sută, rezultă că modelul implementat în simulare este corect și pe baza acestuia se poate face o serie de setări ale mașinii de ambutisat, respectiv o serie de predicții referitoare la modul de desfășurare a procesului de ambutisare și a rezultatelor finale și intermediare obținute.

5.3.2.2 Implementarea dispozitivului de ambutisare în standul experimental

Într-o primă fază doresc să enumăr o serie de factori determinanți cu privire la desfășurarea experimentului în acest capitol. Datorită faptului că nu am avut acces la o mașină de ambutisat cu dublă acțiune, respectiv timbre tensiometrice pentru deformații și tensiuni care sunt foarte scumpe, am optat pentru o variantă mai simplă a realizării experimentului.

În locul mașinii de ambutisat am folosit o mașină de tracțiune - compresiune de 100 t, iar ca și element de acțiune pentru ambutisarea tablei am proiectat un dispozitiv cu ajutorul căruia am realizat experimental ambutisarea.

Dispozitivul executat pe componente a fost montat direct pe placa mașinii de ambutisat (figura 5.20), acționarea poansonului standului experimental proiectat făcându-se cu ajutorul plăcii active a mașinii de tracțiune compresiune.

Ca element de măsură pentru forța de ambutisare, fiind singura variabilă pe care am putut să o determin în condițiile date, am folosit un sistem de achiziție denumit ESA Messtechnik GmbH (Signal Conditioner - Amplifier System Esam Traveller 1), sistem de achiziție pe care îl voi prezenta ulterior. Interfața între sistemul de achiziție și mașina de tracțiune cu dispozitivul de ambutisat, este realizată de un computer pe care rulează un program de culegere a datelor. Pentru a putea culege date despre forța la poansonul dispozitivului de ambutisat, între

poansonul dispozitivului și placa activă a mașinii am interpus o doză tensometrică de 1000 kN, iar pentru măsurarea adâncimii de ambutisare s-a folosit un traductor de adâncime cu cursor cititor pe programul de interfață dintre calculator și elementele de lucru, mașină și dispozitiv.



Figura 5.20. Ansamblul experimental compus din dispozitivul de ambutisare și mașina de tracțiune-compresiune

Suportul de lucru în cazul de față îl constituie mașina de tracțiune - compresiune și dispozitivul de ambutisare care servește ca și stand experimental.

Deoarece nu am putut măsura tensiunile din foaia de tablă, datorită imposibilității montării timbrului tensometric pe foaie, m-am limitat la verificarea valorii forței la poanson și respectiv măsurarea subțierii locale a tablelor ambutisate la diferite adâncimi.

Deci ca strategie de abordare a părții experimentale în validarea modelului, am adoptat verificarea forței la poanson la diferite adâncimi, respectiv a subțierii locale la finalul fiecărei adâncimi setate.

Pentru a putea îndeplini această variantă de verificare a rezultatelor obținute de model prin simulare, un rol important l-au avut sistemul de achiziție împreună cu accesoriile de legătură dintre interfețele de lucru. Aceste accesorii de legătură fiind doza tensometrică de 1000 kN și traductorul de adâncime cu cursor cititor pe programul de interfață, pentru măsurarea adâncimii de ambutisare respectiv

avansul automat al mașinii de compresiune.

În acest moment o foarte mare importanță o are avansul mașinii. În timpul ambutisării dinamice cu ajutorul modelului implementat, la momentul secțiunilor (frame-urilor) setate de program pentru măsurători, programul înregistrează ceea ce se întâmplă în foaia de tablă la o viteză foarte mică (cu alte cuvinte, în momentul citirii oprește pur și simplu timpul real de curgere pentru o fracțiune de secundă).

Setând avansul automat al mașinii de compresiune - tracțiune la valoarea cea mai mică, se respectă întru totul condițiile din simulare. Cu acest control setat al vitezei, care se suprapune ca valoare peste valoarea simulării, creăm condițiile de ambutisare din secțiunile de citire ale valorilor variabilelor urmărite în simulare.

Avansul la mașină poate fi setat și manual, însă valoarea vitezei de ambutisare diferă de cea setată în simulare, astfel ne putem abate de la cazul de studiu.

Varianta simulării cu viteză diferită, care își schimbă valoarea diferit într-un anumit interval de timp, nu face studiul prezentei teme de doctorat.

Un element important de amintit este cel legat de forța de apăsare pe inelul de reținere al dispozitivului de ambutisare. Sistemul de tensionare este cu arcuri și șuruburi care antrenează o placă de apăsare. Apăsarea asupra foii de material se face la o valoare, la care foaia nu se mai cucează.

Strângerea șuruburilor se face cu cheie dinamometrică etalonată până la valoarea pe care o dictează simularea.

Standul experimental este compus din următoarele secțiuni: dispozitivul de ambutisare, mașina de tracțiune - compresiune de 100 Tf cu elementele de măsură (doza tensometrică și traductorul de adâncime), respectiv sistemul de achiziție Esam Traveller.

Toate aceste componente ale standului sunt conectate la softul sistemului de achiziție Esam Traveller.

Utilajul folosit pentru ambutisat tablele cu ajutorul dispozitivului, este mașina de încercări de tracțiune - compresiune în regim static sau dinamic, model VEB 1000 KN sarcina maximă și acționare hidraulică, figura 5.21a.



Figura 5.21.a Mașina de încercări de tracțiune-compresiune în regim static sau dinamic, model VEB 1000 KN sarcina maximă, acționare hidraulică

Ca și elemente de măsură au fost folosite: doza tensometrică (celula de forță Lorenz Messtechnik K-450, domeniu de măsurare 0-1000 KN) respectiv traductorul de adâncime cu care s-a măsurat adâncimea de ambutisare (fig. 5.21.b, respectiv 5.22).

Celula de forță de mai sus poate prelua până la 1000 kN forță sau undeva la 100 tf forță de apăsare. Principiul de încărcare al celulei este similar cu principiul de încărcare cu element elastic. Cu ajutorul elementului elastic din interiorul celulei de forță se face transformarea forței în impuls electric, fiind înregistrat de către sistemul de achiziție Esam Traveller, care redă grafic dependența forței din elementul elastic al celulei, în funcție de un parametru static cu ajutorul căruia se face măsurarea.



Figura 5.21.b. Celula de forță Lorenz Messtechnik K-450, domeniu de măsurare 0-1000kN



Figura 5.22. Traductorul de adâncime folosit pentru determinarea adâncimii de ambutisare, valoare de măsurare 0-100 mm

Toate datele măsurate cu ajutorul elementelor de măsură sunt centralizate sub formă de semnal electric cu ajutorul sistemului de achiziție Esam Traveller (figura 5.23) care este de fapt o punte tensometrică cu descărcare electrică prin semnal într-un program de achiziție propriu.

SIGNAL CONDITIONER/AMPLIFIER SYSTEM ESAM Traveller 1



Figura 5.23. Sistemul de achiziție folosit Esam Traveller 1

Cea mai importantă parte a standului experimental o constituie dispozitivul de ambutisare din figura 5.24.

Dispozitivul de ambutisare este executat din oțel OLC 45 și are o construcție masivă, fiind dimensionat în funcție de elementele teoretice furnizate de simularea numerică cu ajutorul modelului implementat.

După cum se observă din figura 5.24, dispozitivul are următoarea componență: poanson, matriță, contra-placă, placă de ghidare, coloane, placă de apăsare pe foaie, arcuri elicoidale, șuruburi de fixare și șuruburi de tensionare. Placa de apăsare pe foaie cu arcurile elicoidale, cu placa de ghidare și cu șuruburile de tensionare realizează sistemul de tensionare mecanic al dispozitivului. Contra-placa este în legătură cu matrița prin intermediul coloanelor, care sunt prinse cu ajutorul a 12 șuruburi M12X30. Coloanele servesc ca și element de ghidare pentru placa de ghidare. Placa de ghidare și contra-placa servesc ca element de ghidare pentru poanson ca acesta să se așeze relativ concentric cu foaia de tablă de secțiune circulară groasă de 1mm OLC 10.

Pentru a nu se cuta în timpul ambutisării, foaia de tablă este apăsată în timpul procesului de ambutisare cu ajutorul plăcii de apăsare pe foaie care este apăsată prin intermediul arcurilor și a șuruburilor de tensionare în număr de 8 bucăți M30X90 folosind placa de ghidare. Dispozitivul este unul experimental de aceea nu s-a implementat un sistem de ejectare a poansonului și a reperului format, scoaterea acestora realizându-se prin demontarea dispozitivului.

După cum se vede, arcurile elicoidale sunt ghidate atât în placa de apăsare pe foaie cât și în placa de ghidare, ceea ce parțial înlocuiește un element de ghidare a arcului sub formă de coloană. Pentru scoaterea reperului format în urma

ambutisării, demontarea se face până la coloane și matriță, apoi se face ungerea matriței pe locul unde se așează foaia, după care se pune foaia de tablă.

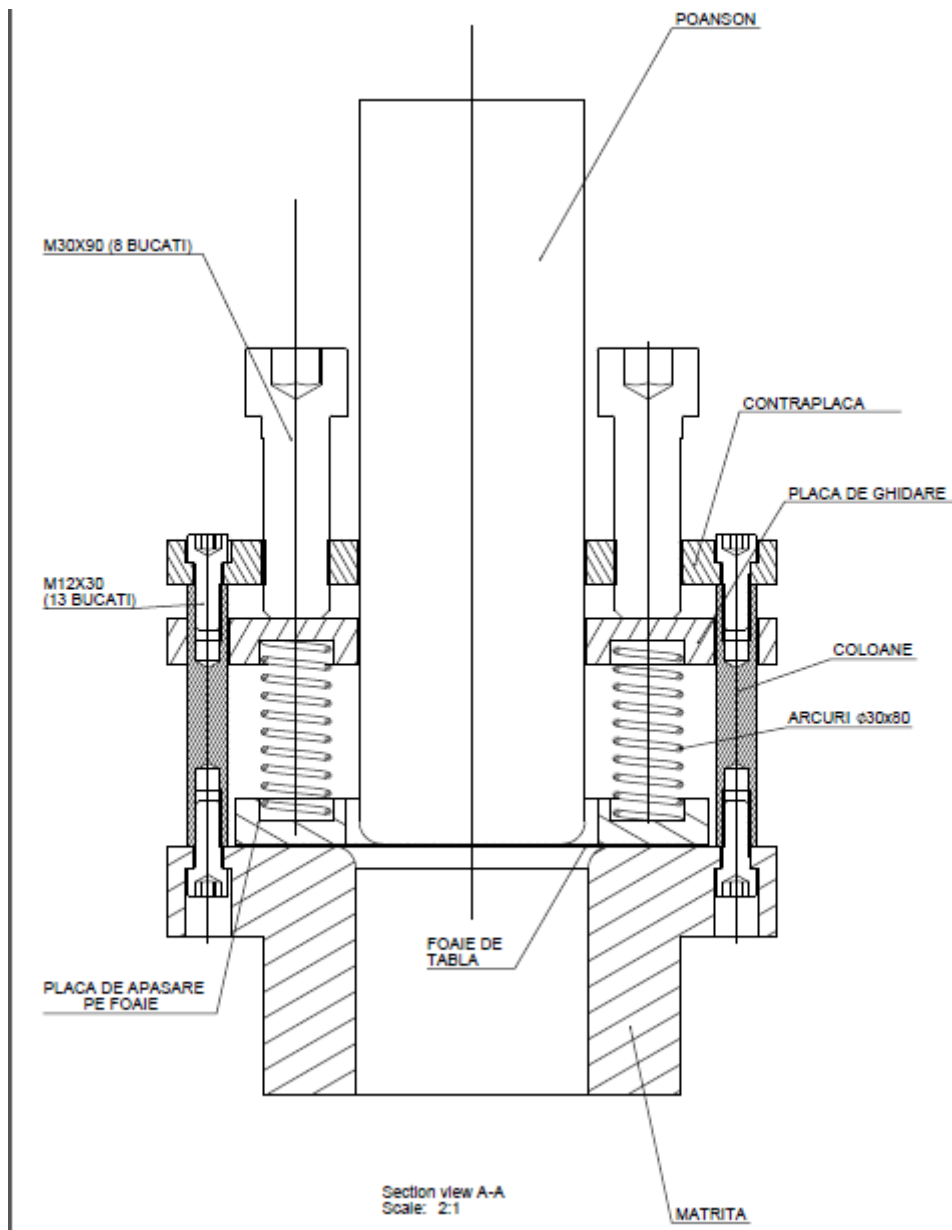


Figura 5.24. Schema de ansamblu (în secțiune) a dispozitivului de ambutisare

5.3.2.3. Fazele procesului de ambutisare

Sucesiunea fazelor de lucru în realizarea experimentului este prezentată în figurile 5.25 - 5.29.

În figura 5.25, pe matrița în care sunt montate coloanele este așezată foaia de tablă de secțiune circulară și grosime 1mm. Înainte de așezarea foii se unge matrița atât pe suprafața de așezare a foii de tablă cât și în interiorul acesteia pentru a se asigura o bună alunecare a reperului în matriță, prin lubrifiere.

Lubrifierea foii de tablă se face atât pe zona dintre matriță și reper cât și între reper și inelul de reținere, dar doar cât ține suprafața de demarcare a inelului de reținere, nu pe toată foaia de tablă.



Figura 5.25. Alimentarea dispozitivului de ambutisare cu foaie de tablă pentru experiment

Peste foaia așezată pe baza matriței se pune placa de apăsare pe foaie sau inelul de reținere (figura 5.26). Referitor la ungerea foii de tablă pe suprafața de contact cu inelul de reținere, trebuie precizat faptul că doar pe această suprafață de contact se face ungerea deoarece dacă ar fi și pe suprafața de contact cu poansonul, la contactul brutal cu acesta ar avea loc o deplasare prin alunecare a foii de tablă sub poanson și s-ar obține excentricitate la ambutisare.

În plus, pelicula de aer care este prinsă la ambutisarea pe o anumită adâncime împreună cu lubrifiantul, ar face ca extragerea reperului de pe poanson să fie foarte greoaie (dispozitivul nefiind prevăzut cu sistem de ejectare a reperului nou format).

Pentru a evita din start o plasare excentrică a semifabricatului de tablă circulară de grosime 1 mm OLC10, gabaritul semifabricatului circular a fost astfel dimensionat, încât cercul descris de foaia de tablă s-a așezat tangent la suprafața fiecărei coloane de ghidare.



Figura 5.26. Montarea inelului de reținere pe foaia de tablă

La rândul lui, inelul de reținere, ca și gabarit, referindu-ne la diametrul exterior este ca și cotă, la fel ca foaia de tablă, tangent la coloanele de ghidare.

Arcurile cu placa de ghidare și cu placa de apăsare pe foaia de tablă formează subansamblul de reținere a foii de tablă pentru a se evita cutarea acesteia. Acest fenomen este nedorit, datorită încărcării suplimentare cu tensiune a foii de tablă și duce la ruperea acesteia. Conform figurii 5.25 arcurile sunt așezate pe inelul de reținere în niște locașuri cu rol de ghidare a acestora în inelul de reținere.

La partea superioară, arcurile sunt centrate pe o placă (placă de ghidare figura 5.27) care are rolul de a centra arcurile pe poziție și în timpul ambutisării. Cu ajutorul plăcii de ghidare se face apăsarea inelului de reținere utilizând arcurile.

Placa de ghidare din construcție îndeplinește și rolul de a asigura un plus de centrare pentru poanson pe direcția de ambutisare în timpul desfășurării procesului de ambutisare.

Placa de ghidare este centrată față de matrită prin intermediul unor locașe de ghidare prin care trec cele 8 coloane, așa cum se vede din figura 5.28.



Figura 5.27. Asamblarea elementelor elastice de acțiune, arcurile



Figura 5.28. Asamblarea plăcii de ghidare pentru tensionarea arcurilor și apăsarea foii de tablă

În figura 5.29 se finalizează montarea dispozitivului de ambutisare prin prinderea contra-plăcii în șuruburi de coloane și nu în ultimul rând așezarea poansonului în matriță și a șuruburilor de tensionare a arcurilor pentru apăsarea inelului de reținere.

Montajul astfel realizat asigură centrarea poansonului centric pe foaie și apăsarea pe foaia de material a inelului de reținere.

Conform cu titlul acestui capitol, înainte de a acționa asupra poansonului dispozitivului cu ajutorul mașinii de tracțiune, se face încărcarea tensiometrică a arcurilor, realizând o oarecare apăsare pe foaia de tablă prin intermediul inelului de reținere.

Din cauza lipsei tehnologice și a posibilității de a măsura exact valoarea de apăsare asupra inelului de reținere, forța de apăsare pe inelul de reținere se va determina empiric.

Se vor strânge progresiv șuruburile, la aceeași forță măsurată cu o cheie dinamometrică, până la valoarea pe care o indică simularea numerică.

Datorită faptului că acțiunea sistemului de tensionare a arcurilor este una defensivă, adică răspunde cu o oarecare întârziere la modul cum lucrează foaia de tablă la cutare sau la ondulare, arcurile nu mențin săgeata uniformă peste tot.

Din această cauză s-a recurs la introducerea între placa de ghidare și placa de apăsare pe foaie a unor cale standardizate de anumite cote progresiv alese de la 5 mm – 40 mm, rigidizând astfel subansamblul de tensionare a arcurilor.

Folosind această metodă am determinat materialul foii de tablă să se supună interstițiului de 1 mm grosime dintre foaia de tablă și placa de apăsare pe foaie.

Asigurând păstrarea cotei fixe a grosimii foii de tablă între placa de apăsare și foaia de tablă, se realizează o apăsare forțată din partea foii de tablă ca reacțiune asupra inelului de reținere.

Interstițiul impus obligă tabla să nu se cuteze, asigurând astfel o bună deformabilitate a tablei, respectiv obținerea reperului finit în bune condiții. În urma procesului de ambutisare realizat se demontează dispozitivul și se constată dacă rezultatele sunt cele scontate.

Se verifică realizarea reperului la adâncimea dorită, respectiv controlarea forței de ambutisare și a grosimii reperului format în zonele de risc tensometric pentru a vedea subțierea locală.

Aceste aspecte fac corp comun cu capitolul următor, cel al validării modelului numeric.

Se vor urmări două obiective:

- forța de ambutisare din poanson rezultată din experiment la sistemul de achiziție ESAM traveller trebuie să se găsească într-o marjă de maxim 5 la sută față de ambutisarea realizată în simulare;
- subțierea locală în zonele de risc tensometric (adică în zonele de pe reper în care tensiunea se apropie de cea de rupere) trebuie să fie apropiate față de subțierea rezultată din simulare.



Figura 5.29. Asamblarea contraplăcii pentru tensionarea arcurilor, a plăcii de ghidare și apăsare a foii de tablă

Pe lângă aceste două elemente de validare a modelului, se mai poate măsura și valoarea strângerii cu ajutorul cheii tensometrice a șuruburilor de tensionare a arcurilor și compararea valorii acesteia cu forța de apăsare rezultată din simulare.

Elementele de comparație directă rămân forța de ambutisare din poanson măsurată cu sistemul de achiziție a datelor și subțierea locală măsurată cu șublerul electronic, în zonele de risc pentru fisuri.

5.4 Concluzii

1. Încercările experimentale de determinare a curbei σ funcție de ε furnizează date reale ale caracteristicilor mecanice ale tablelor necesare rulării modelului de calcul cu rezultate apropiate de cele experimentale.
2. Încercările experimentale de ambutisare tehnologică în laborator cu date similare utilizate în modelul numeric face posibilă atât calculul erorilor reale între modelul numeric și modelul real cât și modul cum ar trebui condusă simularea ambutisării pentru a putea valida modelul numeric

6. VALIDAREA MODELULUI NUMERIC

6.1 Obiective

1. Validarea algoritmului informatic teoretic prin compararea cu rezultatele experimentale de laborator cu aceleași condiții ca în simularea numerică
2. Schema logică a itinerarului în implementarea în programul Abaqus 6.8-1 a cazurilor concrete de realizare a diverselor forme de ambutisare și a soluțiilor de depășire a blocajelor determinate de erori de implementare

6.2. Validarea modelului numeric de simulare

Unul din elementele de noutate a tezei de față este modelul numeric implementat. Pentru a putea finaliza teza și în plus de asta pentru a valida modelul implementat trebuia făcută o verificare a rezultatelor prelucrate cu ajutorul modelului numeric realizat.

Această verificare s-a făcut cu ajutorul unui experiment de ambutisare identic în mare măsură cu scheletul procesului de ambutisare schițat în modelul numeric. Scopul urmărit în urma acestui studiu al tezei este acela de a putea reda cu precizie mare și de a predicționa o serie de evenimente care au loc pe parcursul unei ambutisări adânci.

Acest lucru este posibil în cazul realizării unui model de lucru care se poate supune unei simulări numerice, în care rezultatele prelucrate în urma simulării și verificate cu un experiment real coexistă într-o marjă de eroare inginerescă de maxim 5 la sută.

Modelul numeric este realizat și rulat cu ajutorul programului Abaqus 6.8-1 cu ajutorul căruia au fost prelucrate datele. În urma realizării experimentului s-au obținut și aici o serie de date care s-au comparat cu cele din simulare ducând astfel la afirmarea sau infirmarea unor rezultate teoretice rezultate. Datorită constrângerii care o creează experimentul, s-au putut prelucra două variabile fundamentale: forța de ambutisare înregistrată la sistemul de achiziție ESAM Traveller, respectiv subțierea materialului reperului format în anumite zone critice.

Cazul forței de ambutisare și al deformațiilor globale îl tratez în capitolul acesta deoarece putem face comparația acestor variabile cu cazul din experiment.

În simulare, conform figurii 6.1 este arătat modul de variație a forței de ambutisare în funcție de adâncimea de ambutisare, ca rezultat al prelucrării datelor din simulare. După cum arată graficul din figura 6.1 observăm că, componentele forței pe direcțiile X și Z sunt apropiate ca alură și ajung maxim undeva la aproape 100 kN. Din aceste valori ale componentei forței după direcția X și Z, o parte se transmite și la foaia de tablă și matriță, acestea din urmă preluând o parte din forță. Pe noi ne interesează componenta forței pe axa Y unde valoarea forței ajunge undeva la 170,23 kN forță maximă.

Confruntând graficul, observăm că forța maximă se atinge undeva la aproximativ 30,5 mm din adâncimea setată în simulare. Punctul de maxim este atins deoarece aici se află cele mai multe solicitări ca număr și complexitate. La această adâncime, între solicitarea compusă dintre încovoiere cu întindere pe raza matriței și cea a poansonului respectiv a solicitării de întindere din peretele

materialului reperului ce se formează, granița de demarcație este foarte mică și se întrepătrunde. După această adâncime critică la care reperul ori se poate gătui, fisura sau rupe, chiar componenta forței pe axa Y scade proporțional cu adâncimea de ambutisare. De fapt la o adâncime imediat superioară celei de 30.5 mm, forța de ambutisare depășește valoarea de rezistență pe care o realizează materialul și construcția dispozitivului de ambutisare. Până la adâncimea de 30.5 mm după cum observăm din grafic, componenta forței pe axa Y crește brusc ducând la o oarecare alungire maximă a materialului, deoarece acesta este reținut de inel pentru a nu se cuta.

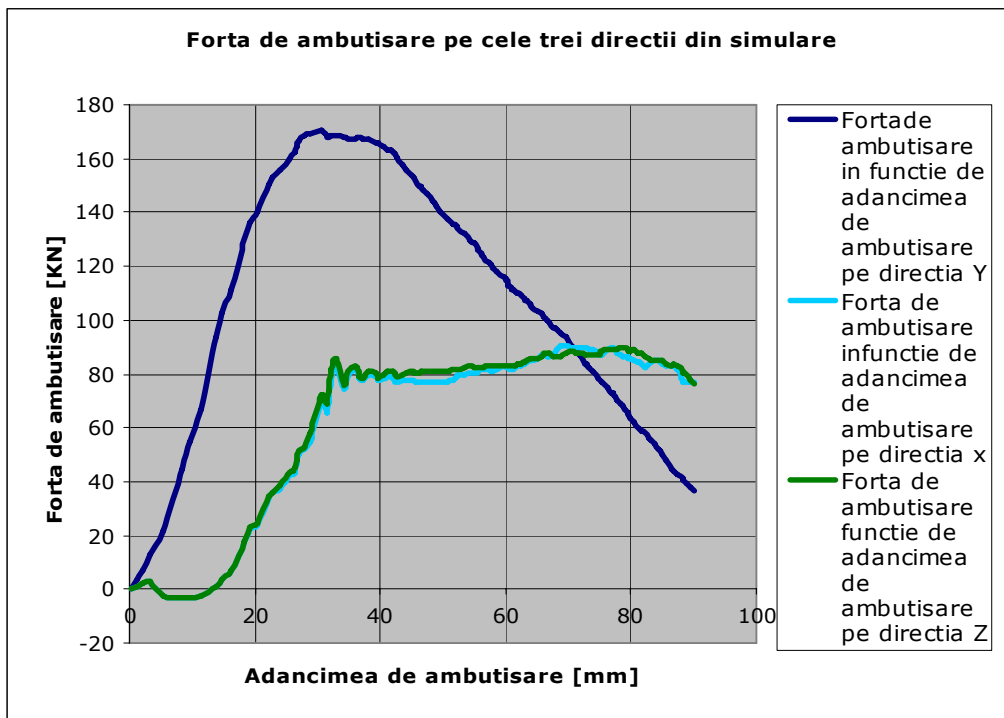
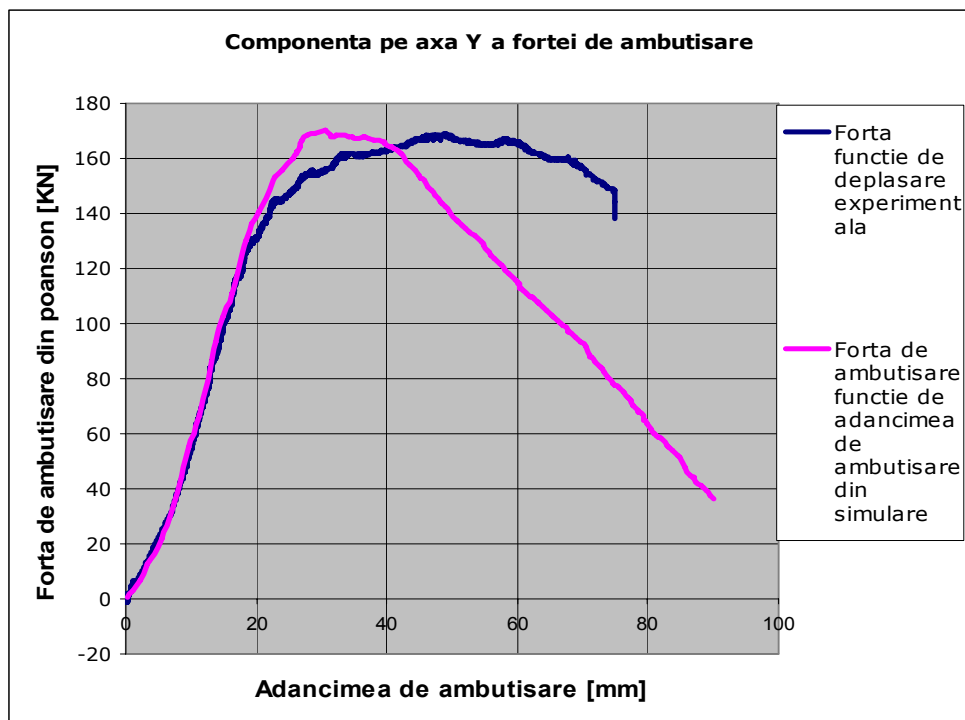


Figura 6.1. Variația forței de ambutisare după cele trei direcții ortogonale rezultată din simularea numerică

Pornind de la aceste componente teoretice determinate cu ajutorul simulării, s-a pretat la prelucrarea datelor experimentale și a comparării acestora cu forța din simulare. Componentele forței pe X și Z atât din simulare cât și din experiment nu prezintă interes. Ne interesează doar componenta pe axa Y din ambele cazuri. Pentru o cât mai bună măsurare a evenimentelor ce țin de experiment, fiecare măsurătoare s-a repetat de 3 ori atât pentru forță cât și pentru măsurarea subțierii locale a reperului format. S-au prelevat un număr de 5 cote de adâncime de ambutisare a câte trei încercări pentru fiecare cotă de adâncime. Cotele de adâncime de ambutisare sau valorile seturilor de trei măsurători până la ce adâncime se realizează ambutisarea, sunt: 30, 40, 50, 60 și 70 mm. Pentru fiecare din adâncimile scrise mai sus s-au înregistrat componentele instantanee pe axa Y ale forței de ambutisare. Pentru trasarea graficului de variație a componentei forței instantanee pe axa Y, s-a mers pe adâncimea cea mai mare până la 70 mm

adâncime, pentru a obține o continuitate a curbei. Adâncimea de 70 mm în experiment este maximă față de cea de 90 mm din simulare, deoarece sonda de adâncime folosită avea scara de măsurare maximă de 75 mm. În urma prelucrării datelor experimentale a setului cu trei măsurători succesive pentru adâncimea de 70 mm și prin compararea cu a celor din simulare, s-a obținut graficul din figura 6.2 care validează modelul numeric implementat, printr-o eroare maximă între experiment și simulare, de maxim 2,6%.



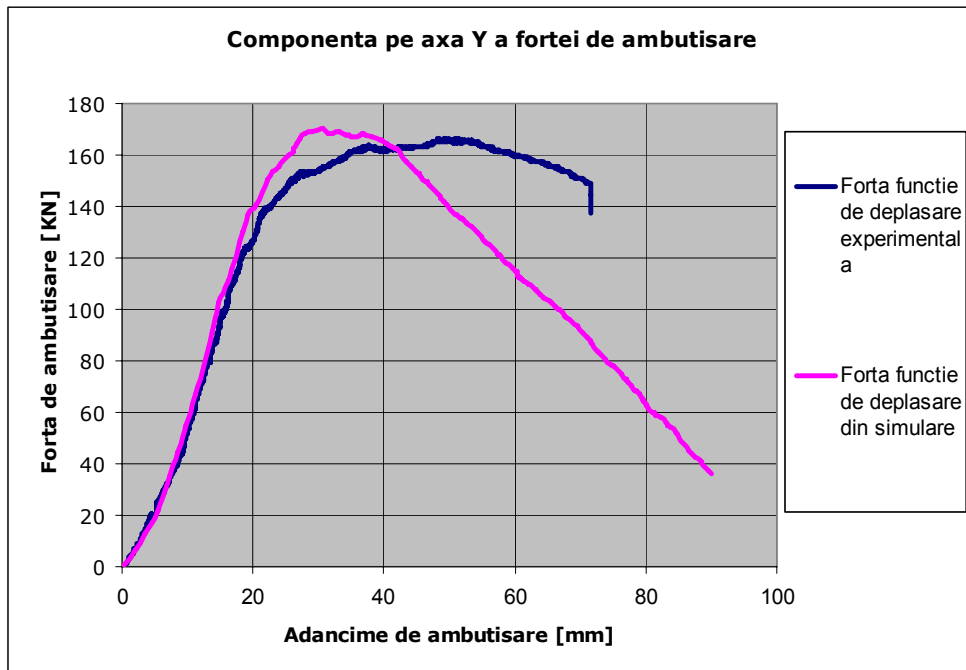


Figura 6.2. Variația componentei forței de ambutisare pe axa Y atât din simulare cât și din experiment

Valoarea maximă a componentei pe axa Y a forței de ambutisare este de 165,93 KN în timp ce, valoarea din simulare este de 170,23 KN. Făcând un mic calcul, rezultă că eroarea este de 2,6%, ceea ce denotă că modelul numeric este valid și în consecință toate variabilele măsurate cu ajutorul rulării modelului sunt apropiate de realitate. În toate cele trei măsurători comparative reprezentate grafic, care reprezintă variația componentei pe axa Y a forței de ambutisare din experiment și simulare, observăm că până la adâncimea de 30 mm, pantele ambelor componente pe axa Y se suprapun în proporție de 70%. Locurile unde nu se suprapun sunt din cauza modului de interpretare a modelului numeric față de experiment cauzat fiind de mărimea mesh-ului. La un mesh mai fin, suprapunerea curbelor ar fi mai pronunțată. În ceea ce privește subțierea materialului foi de tablă din simulare, a rezultat în urma prelucrării datelor o subțiere globală, dată de graficul din figura 6.3, în care se arată variația subțierii reperului în timpul procesului de ambutisare pe cele trei axe de coordonate X,Y și Z. Cu ajutorul experimentului nu s-a putut face în mod direct măsurarea subțierii, deoarece nu a existat un modul laser sau cititor tip traductor să facă acest lucru.

Ca și metodă indirectă, putem depista cu cât s-a subțiat local foaia de tablă rezultată în reper cu ajutorul măsurătorilor făcute cu șublerul electronic, asta după ce în prealabil s-a secționat reperul pentru a putea fi măsurat.

Măsurătorile s-au făcut pentru componenta Z a deformației pe reperul secționat pentru fiecare set de adâncimi de ambutisare.

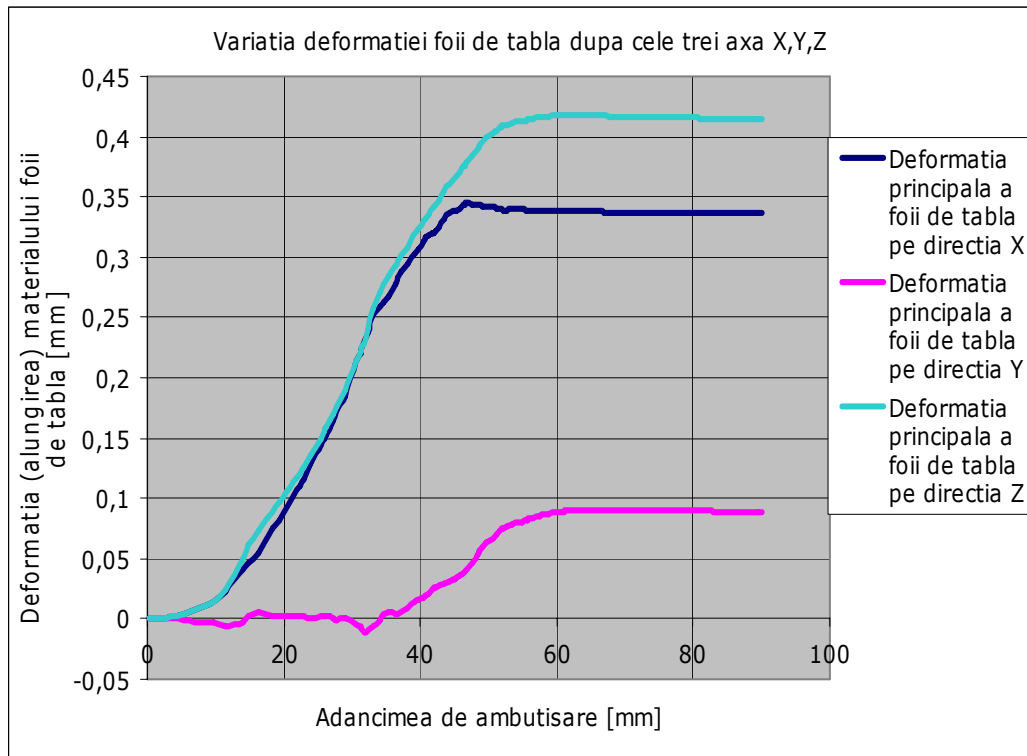


Figura 6.3. Variația componentei pe axa Z deformației din simulare

În ceea ce privește deformațiile pe axele X și Y, acestea se regăsesc complet în foaia de material rezultată sub formă de reper și în bavurile rezultate în procesul de ambutisare (figura 6.4).

Măsurarea acestor deformații pe direcțiile X și Y se face foarte greu, posibil doar cu o serie de timbre tensometrice de presiune la contact și un sistem de achiziție special destinat pentru aceasta.

Din graficul din figura 6.3 observăm că pentru deformația pe axa Y care este cea mai mică deformație a materialului foi de tablă, valoarea alungirii în cazul nostru crește până la o valoare de o zecime de milimetru și rămâne constantă la această valoare.

După direcția axei X, deformația foi de tablă este mai mare, aproape 0,35 mm, fiind și componenta care duce la formarea bavurilor, mai pronunțată decât deformația după axa Y a foi de tablă.

Observăm că la toate deformațiile după cele trei axe se constată o stabilizare a acestora după adâncimea de 40 mm, adâncime de ambutisare.

După această cotă se constată o curgere mai bună a materialului foi de tablă între inelul de apăsare și matriță, curgere care este necesar să fie mai bună, deoarece dacă la acest nivel tabla ar fi întâmpinat probleme, s-ar fi ajuns la găuire și fisurarea materialului, deci ar rebuta reperul format.



Figura 6.4. Modul de transformare fizică a deformațiilor pe direcțiile X și Y sub formă de festoane sau bavuri (reper debavurat stânga și dreapta reper format cu festoane, bavuri)

Măsurătorile care s-au făcut pentru determinarea subțierii foi de tablă în timpul ambutisării, sunt apropiate ca valoare de cele care se regăsesc în graficul 6.3. Calibrarea pe grosime s-a făcut cu șublerul electronic în zonele critice ale foi de tablă imediat după raza poansonului, fiind zona cea mai afectată în timpul ambutisării. Referitor la deformația după axa Z a foi de tablă în timpul procesului de ambutisare măsurată în zonele cele mai periclitare la subțiere, în faza experimentală s-au obținut o serie de valori care sunt arătate în figurile 6.5, 6.6, 6.7 a și b.



Figura 6.5. Subțiere de 0,04 mm sub raza matriței la adâncimea de 60mm

În figura 6.5 subțierea este relativ mică deoarece este măsurată în zona imediat inferioară razei matriței sau în zona inferioară a peretelui reperului format.

O altă zonă periculoasă ca și subțiere a foii de tablă este zona imediat adiacentă razei matriței (vezi figura 6.6). În această zonă, subțierea cauzată materialului foii de tablă datorită acțiunii matriței este de o zecime de milimetru..

Această subțiere prin comparație cu graficul de la figura 6.3 este dată de deformația principală pe axa Y (vezi figura 6.3). Acest lucru se explică prin faptul că componenta pe axa Y, care duce la formarea festoanelor este de fapt deformația pe care o exercită raza matriței asupra foii de tablă, fiind de o zecime de milimetru. Aceasta se poate observa comparând figurile 6.6 ca valoare măsurată la micrometru și valoarea din grafic obținută prin simulare. Deformația pe axa X care atinge o valoare aproape de 0,35 mm nu se poate determina în cazul nostru fără realizarea unui experiment în care sunt implicate o serie de elemente de măsură speciale care se pot pune sub inelul de reținere al dispozitivului în timpul ambutisării.

În figura 6.7.a se arată valoarea deformației sub formă de subțiere pe axa Z sau în sensul realizării ambutisării. Am măsurat două puncte din secțiunea foii de tablă ambutisate până la 60 mm adâncime. Am luat adâncimea de 60 mm deoarece după graficul din figura 6.3, la curba de la axa Z, punctul maxim de creștere a subțierii este undeva la 60 mm adâncime după care subțierea rămâne într-un palier constant.

Din măsurătorile experimentale, conform figurii 6.7.a într-un punct superior din zona critică de subțiere (cea imediat superioară după raza poansonului [107]) s-a constatat că grosimea tablei este de 0,85 mm, subțierea fiind de 2,5 zecimi și cinci sutimi de milimetru.

Nu am mai făcut măsurători la adâncimi mai mici deoarece o dată cu adâncimea de ambutisare urma să crească și subțierea, controlând doar secțiunile critice pe raza matriței și în zona imediat superioară a razei poansonului, în două puncte de măsură.



Figura 6.6. Subțiere de 0,1 mm la raza matriței la ambutisarea totală a materialului



Figura 6.7.a Subțiere de 0,25 mm în zona critică de subțiere deasupra razei poansonului la ambutisarea pe 60 mm adâncime de ambutisare

Figura 6.7.b prezintă subțierea materialului foii de tablă în cazul în care ne apropiem mai mult, sau mai exact suntem în centrul zonei critice de subțiere de deasupra razei poansonului. Aici, grosimea este de 0,82 mm având undeva la 0,28, două zecimi și opt sutimi de milimetru subțiere. Comparând cele două cazuri, simularea dinamică în care avem procesul dinamic cu experimentul realizat, putem trage o serie de concluzii:

Subțierea instantanee dinamice pe direcția Y prezentată mai sus în graficul de la figura 6.3 este aproape ca valoare de cea din experiment, deși aceasta din experiment a fost măsurată la finalizarea procesului de ambutisare.

Apropierea ca valoare a deformațiilor după axa Y între experiment și simulare este cauzată de subțierea după direcția X care contrabalansează puțin diferența mare care ar fi trebuit să apară între dinamic și static cu privire la valorile subțierilor pe axa Y, preluând astfel din mărirea valorii deformației pe axa Y.



Figura 6.7.b Subțiere de 0,27 mm în zona critică de subțiere deasupra razei poansonului la ambutisarea pe 60 mm adâncime de ambutisare

Nu același lucru se întâmplă dacă privim modul de evoluție a deformației după axa Z din simulare respectiv din cazul experimentului. Graficul din figura 6.3 înregistrează un salt undeva la 0,42 - 0,43 mm, evidențiind o deformație subțiere destul de considerabilă. Având în vedere că materialul își exercită în timpul procesului de ambutisare nu numai partea de domeniu plastic, ci și partea de domeniu elastic, ducând subțierea în regim dinamic la o valoare instantanee de 0,42 - 0,43 mm (vezi figura 6.3), observăm că domeniul elastic contribuie într-o oarecare pondere în proces realizând reducerea subțierii până la 0,25 - 0,27 mm, restul de până la grosimea foii de tablă fiind amprenta definitivă a domeniului plastic.

6.3. Schema logică de rulare a modelului

În acest paragraf s-a prezentat schema logică de rulare a modelului, respectiv de optimizare a acestuia în ceea ce privește scăderea erorilor. Schema logică conceptuală a modelului numeric este foarte extinsă și nu am inserat-o în lucrarea de față, deoarece ar fi ocupat mai mult de o sută de pagini.

Ceea ce s-a poate prezenta este schema logică informativă generală a modelului numeric, redată sub forma unui model conceptual redus de deformare plastică, având în vedere că modelul numeric implementat în teză face parte din categoria modelelor conceptuale reduse de deformare plastică.

Schema logică din figura 6.8 este prezentată în detaliu în raportul proiectului de grant ID 1759/2008 conform contract 676/2009, raport cu titlul – „Dezvoltarea unui nou concept de conducere a proceselor de deformare plastică bazat pe noi tehnici de reducere a dimensionalității”[124]

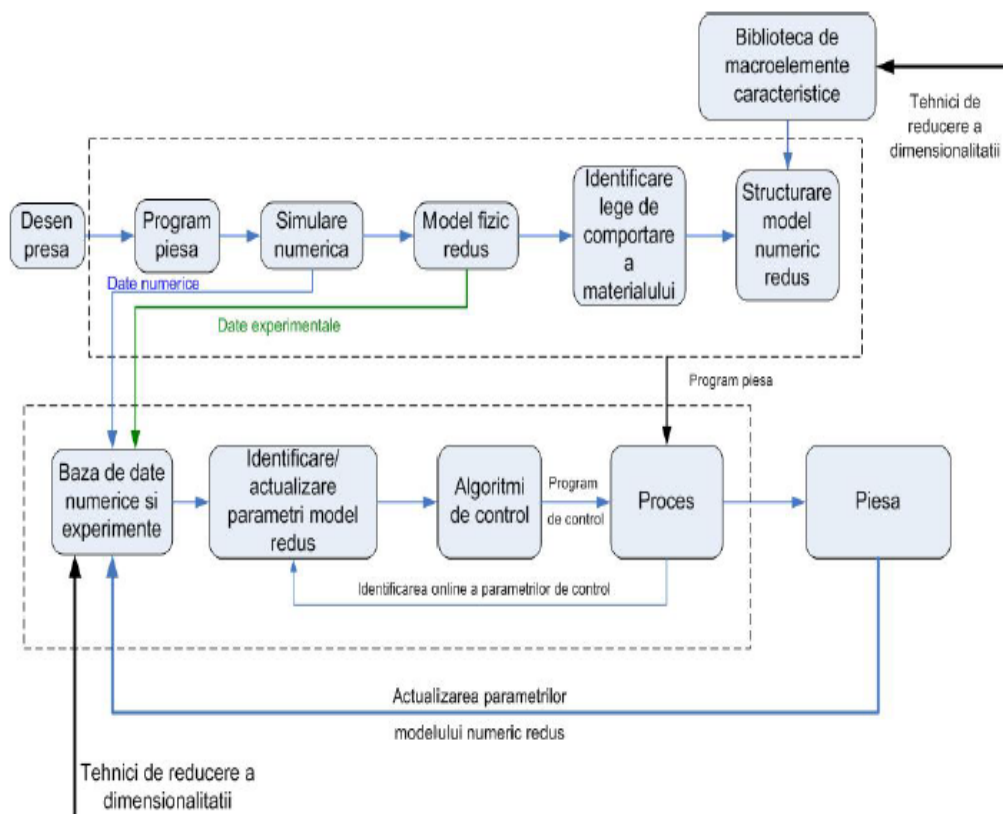


Figura 6.8. Schema logică de realizare a unui model conceptual de deformare plastică la rece [124]

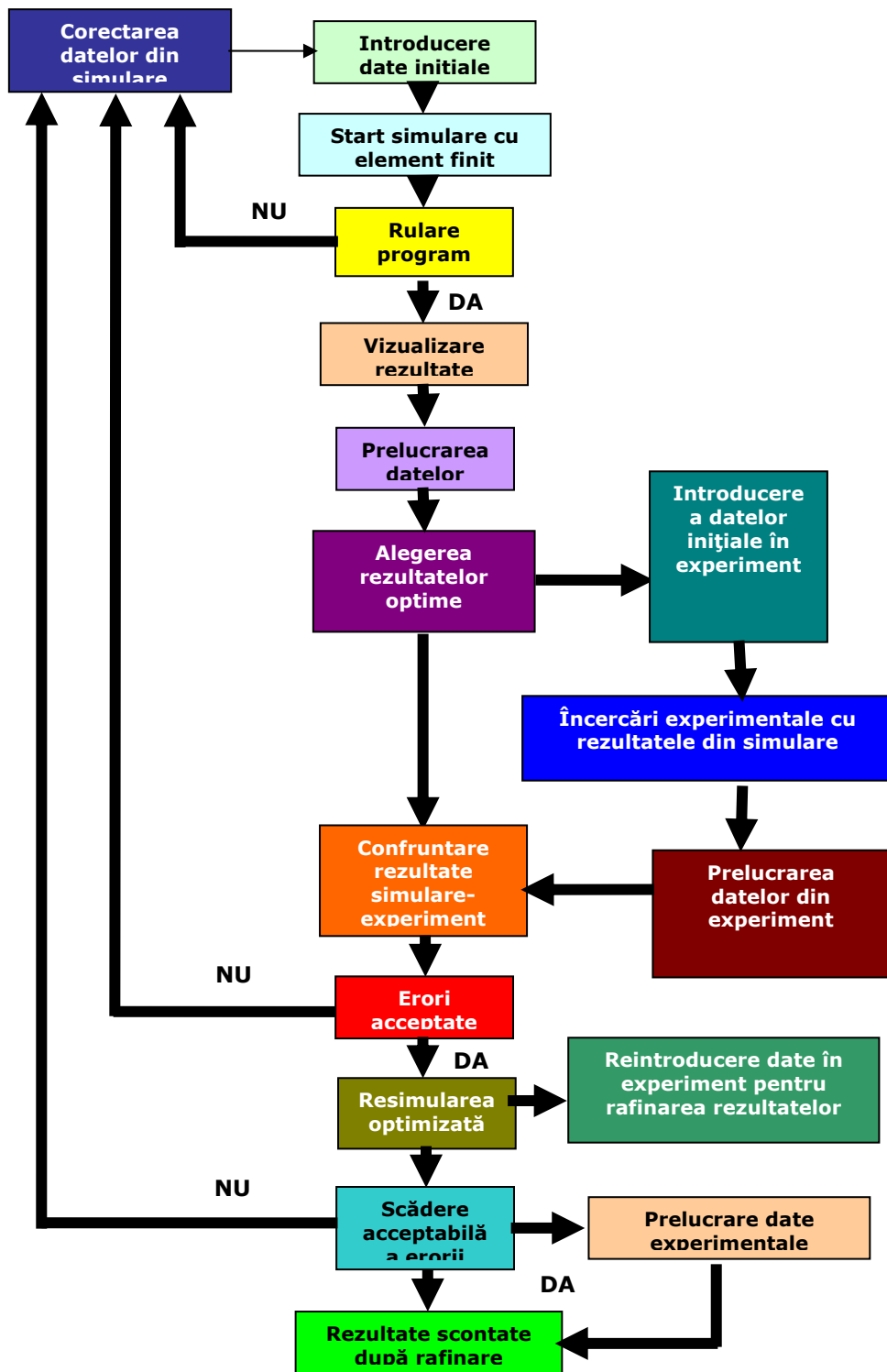


Figura 6.9. Schema logică de rulare a modelului numeric.

Conform schemei logice de rulare a modelului numeric primul pas este cel al introducerii datelor, apoi se dă drumul simulării până are loc simularea numerică. Sunt două situații: simularea evoluează pozitiv și avem un rezultat sau nu se poate realiza sau programul rulează programul și apoi se oprește.

Luăm prima situație, simularea nu se poate realiza sau se oprește sau se întrerupe brusc, atunci trebuie să ne întoarcem la model și să corectăm datele din simulare reintroducând datele cum trebuie până la rularea optimă a modelului.

Dacă datele din simulare prin intermediul modelului sunt introduse corect respectiv modelul este rulat de către program până la final, atunci se pot vizualiza rezultatele obținute în urma simulării.

În caseta de prelucrare a datelor din schema logică, se rată că rezultatele obținute în urma simulării sunt brute și sunt redată după un limbaj propriu programului. Astfel datele din simulare sunt prelucrate spre o mai bună asimilare a acestora. Apoi se aleg datele optime și necesare experimentului pentru a se putea realiza.

Rezultatele din simulare sunt implementate în experiment, se fac încercările experimentale cu prelucrarea datelor din experiment și se compară rezultatele din experiment cu omoloagele acestora din simulare, pentru a fi cercetate erorile dintre realitate și simulare, dacă sunt acceptate sau nu.

Dacă erorile dintre simulare și experiment nu sunt acceptate rezultă că datele introduse în simulare sunt grosiere și se reface introducerea datelor prin corectare și optimizare a datelor introduse, apoi se repetă arborele de lucru din schema logică până la caseta cu erori acceptate.

Dacă însă erorile dintre simulare și experiment sunt acceptate undeva aproape la limită sau erorile sunt relativ mici, se continuă arborele de lucru al schemei logice în vederea realizării unei erori mult mai mici. De fapt se urmărește optimizarea simulării în vederea obținerii unei erori cât mai mici posibile dintre experiment și simulare. Astfel cu simularea optimizată, și prelucrarea datelor din simulare se aleg valori ale rezultatelor optimizate din simulare și se reface experimentul. Dacă nu avem o scădere acceptabilă a erorii se reface parcursul arborelui de lucru al schemei logice de la introducerea datelor, dar cu date optimizate în urma experimentului. Dacă avem o scădere acceptabilă a erorii după resimularea optimizată și implementată în experiment avem la final un rezultat rafinat scontat cât mai apropiat de realitate ceea ce este de dorit.

6.4. Concluzii

Implementarea dispozitivului de ambutisare în experiment s-a realizat cu succes și elementele de legătură între dispozitiv mașina de tracțiune și sistemul de achiziție s-au interconectat foarte bine cu dispozitivul.

Apăsarea inelului de reținere asupra foii de tablă s-a făcut progresiv cu ajutorul șuruburilor de tensionare până la o valoare optimă de curgere elasto-plastică a tablei între poanson și matriță.

În urma prelucrării datelor din simulare s-au implementat în experiment date teoretice din simulare, în urma cărora s-au urmărit o serie de mărimi fizice de comparație între simulare și experiment

În urma prelucrării datelor experimentale a setului cu trei măsurători succesive pentru adâncimea de 70 mm și prin compararea cu a celor din simulare, s-a obținut graficul din figura 6.2 care validează modelul numeric implementat, printr-o eroare maximă între experiment și simulare, de maxim 2,6%.

Asfel în urma simulării numerice și a validării modelului numeric cu ajutorul

experimentului se poate rula foarte multe variante de parametrii ai procesului de ambutisare, rulând modelul și îmbunătățind procesul de ambutisare din punct de vedere al predicțiilor asupra tensiunilor efective și a deformațiilor la orice adâncime dorită.

Valorile tensiunilor și deformațiilor dinamice pe diferite adâncimi se suprapun ca valoare peste cele din experiment în procent de 97,5%. Diferența de 2,5% se datorează gradului de discretizare pe care programul îl are. Discretizarea ar putea fi mai mare, adică gradul de rafinare al problemei de ambutisare din simulare s-ar putea mări însă ca și resurse hardware nu aș fi putut realiza simularea. Un calcul estimativ făcut ne spune că eroare de 2,5% s-ar reduce la maxim 1,5 %. Suprapunerea totală și perfectă între simulare și experiment nu s-ar fi putut face deoarece vibrațiile și șocurile de lucru suprapuse peste uzura mașinii de compresiune nu le putem asimila în simulare deoarece nu avem o secțiune dedicată acestora, acest lucru putându-se face doar în modulul explicit al programului Abaqus unde se poate studia regimuri dinamice variabile și cu șoc.

Deformațiile după direcțiile compuse se regăsesc complet sub forma festoanelor respectiv conform acestui capitol subțierile în peretele reperului format se regăsesc într-o plajă acceptabilă de mărimi, iar din punct de vedere a veridicității obținute, putem observa atât la tensiuni cât și la deformații zona periclitată este în imediata vecinătate a razei poansonului.[107]

7. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI ELEMENTE DE CONTINUITATE A STUDIULUI DE FAȚĂ

7.1 Concluzii finale

Plecând de primele capitole observăm că cele mai importante concluzii sunt cele legate de fiecare capitol și sunt redată la sfârșitul acestora

Cu ajutorul modelului numeric implementat și validat prin experiment se poate face o serie de predicții în timp real asupra procesului de ambutisare utilizând o paleta variată de parametrii dinamici, respectiv o serie de caracteristici mecanice și fizice

Tensiunile și deformațiile obținute sunt foarte apropiate de cele reale obținute ca valoare și datorită preciziei modelului numeric pot fi apreciate în avans ca valoare pentru o adâncime de ambutisare în prealabil setată.

Cu ajutorul modelului numeric putem determina tensiunile și deformațiile dinamice instantanee care pot influența stabilitatea procesului de ambutisare pozitiv sau negativ pentru o adâncime de ambutisare setată înainte de a ajunge la adâncimea vizată.

Referitor la implementarea dispozitivului de ambutisare pe o mașină de tracțiune-compresiune pentru a înlocui o mașină de ambutisare cu dublă acțiune, pot spune că pentru gabarite minime industriale de repere ambutisate se poate face o astfel de înlocuire a mașinii de ambutisat cu condiția ca dispozitivul de ambutisare să fie echipat cu sistem de apăsare a foii de tablă.

Sistemul de achiziție mi-a permis să măsoar doar forța de ambutisare funcție de adâncimea de ambutisare însă conectat la o serie de timbre tensometrice de presiune se poate determina și deformațiile dinamice în timp real.

7.2. Contribuții personale

După studiul bibliografic și cercetarea unei alte posibilități de studiu menținând pe cât posibil o linie ce ține de Ingineria industrială, am ales să studiez un aspect important din cadrul unei deformații plastice la rece - ambutisarea adâncă.

Pe parcursul perioadei de studiu, am observat dintr-o serie de tratate și lucrări științifice că există un teren nu prea bine elucidat cu privire la modul de comportare a materialul în timpul procesului de ambutisare. De asemenea, nu se poate face o predicție prea bună a modului de desfășurare a procesului din punct de vedere al tensiunilor existente și a deformațiilor. Există la ora actuală programe foarte empirice care evaluează un proces dinamic și dau puține informații, în plus cel puțin pe partea de vest a țării, o simulare dinamică cu elemente finite a unui proces încă nu s-a realizat și nici nu a fost implementată. Toate simulările au fost de natura statică.

Elementele de proprie contribuție sunt enumerate în cele ce urmează:

Primele 3 capitole au fost structurate în așa fel încât să pună în evidență o bază teoretică solidă referitoare la procesele de deformare plastică la rece.

În capitolul 4 am pus în evidență analiza stării de tensiune la ambutisare.

Am executat un model 3D în softul Catia V5, soft de proiectare pe care l-am reprezentat în secțiune în figura 4.2

Desenele care corespund figurilor de la fiecare capitol le-am realizat în totalitate în microsoft word și microsoft excel. Am ales să studiez cele mai noi tehnologii de ambutisare pe care le-am expus la stadiul actual al procesului în capitolul 4.

O primă contribuție majoră este realizarea unui model numeric statico-dinamic de simulare complexă a unui proces de ambutisare dinamică la rece a unei table de grosime 1 mm. Ca și parte distinctă a tezei această contribuție este prezentată sub forma unei anexe speciale, anexa numărul 1.

În cele de mai jos voi prezenta principalele acțiuni în realizarea modelului numeric.

Modelul numeric este cuprins în capitolul 5, majoritatea elementelor fiind implementate în model în urma studiului amănunțit al programului Abaqus și a unor lucrări de specialitate.

Am realizat modelul numeric plecând de la premisa combinării a două elemente distincte de simulare. Acestea sunt elemente solide deformabile și nedeformabile de tip coajă sau membrană suprafață.

Am realizat și impus în model o corelare între elementele de lucru din simulare și elementele componente ale procesului în cazul real al procesului de ambutisare.

Am realizat o simplificare a elementelor dinamice din cazul procesului de ambutisare, astfel:

- poansonul a fost reprezentat de o suprafață așa cum o arată figura 5.4 a
- matrița a fost reprezentată simplificat (vezi figura 5.4 b)
- inelul de reținere a fost reprezentat simplificat ca în figura 5.4 c

Am impus ca elementele active prezentate mai sus să fie recunoscute de program prin intermediul modelului ca fiind piesele dinamice din lanțul cinematic al unui caz real de ambutisare.

Această recunoaștere de către programul de simulare a elementelor mai sus menționate sub formă simplificată a fost posibilă prin realizarea unor parametrii de mișcare și de poziție respectiv a unor parametrii de material al elementelor active.

Am realizat după cum am menționat și mai sus interfața de recunoaștere a elementelor active de lucru dintre simularea numerică și cazul real.

Interfața astfel obținută prin alegerea tipului de element a fost declarată în arborele de lucru.

Am realizat declararea ca element nedeformabil rigid a celor trei elemente de lucru active, respectiv am impus în ceea ce privește încărcarea dinamică a procesului, o serie de puncte de interacțiune a forțelor din cadrul procesului.

Am realizat aceste puncte de interacțiune ca fiind (rigid point-uri) RP, programul considerând astfel că forța sau încărcările care acționează, se manifestă asupra elementelor active de lucru ca și cum ar fi o acțiune uniformă în toată masa de material a elementelor active de lucru.

Am realizat o dată cu simplificarea elementelor active, pentru a se putea realiza ambutisarea și micșorarea problemei de simulare ca și volum pentru program, impunând ca simularea să se desfășoare doar pe un sfert din reperul ce trebuia format, respectiv și elementele de lucru fiind doar pe un sfert ca și

discretizare sau ca și vizualizare, neafectând totodată valoarea procesului ca răspuns al acțiunilor încărcărilor.

Am realizat o simetrie în acțiunile procesului față de axele X și Z pentru toate elementele active de lucru cât și pentru reper.

Am implementat ca foaia de material metalic folosită la ambutisarea reală să aibe aceleași proprietăți și în simulare și să fie deformabilă introducând de pe curba de tracțiune realizată o serie de puncte succesive cu tensiunea și deformația materialului metalic al foii de lucru la o anumită valoare.

Am creat interacțiunile reale ale procesului de ambutisare în modelul numeric pentru fiecare etapă a procesului de ambutisare.

Am impus o serie de zone de coeziune între elementele active de lucru și foaia de material metalic pentru a implementa în program modurile de interacțiune dintre elementele active de lucru și foaia de tablă respectiv direcțiile de deformare rezultate în urma interacțiunilor.

Revenind la momentul introducerii valorilor tensiunii și a deformațiilor, am realizat în faza experimentală tracțiunea unei lamele de tablă din același material care a fost supus ambutisării trasând astfel un grafic de dependență între tensiune și deformație.

Am realizat și impus în modelul numeric o împărțire caracteristică a materialului foii de tablă sub formă de tetraedre regulate denumit mesch. Împărțirea este foarte importantă deoarece simularea nu se realizează din cauza aceasta până la adâncimea setată.

În partea a doua a simulării am prelucrat datele rezultate din simulare, acestea se regăsesc în totalitate și explicit detaliate în anexa 3 a tezei de doctorat, în format electronic.

La prelucrarea datelor experimentale am extras tabelar valorile tensiunii și a deformației pe cele trei axe de coordonate și am trasat grafic dependențele acestora în funcție de adâncimea de ambutisare.

În paralel cu extragerea valorilor pentru tensiune și deformație și trasarea graficelor aferente, am vizualizat prin interfața programului Abaqus 6-8.1 aceste valori sub formă de imagini 3D, în care sunt schematizate încărcările aferente pentru fiecare din cei doi parametri tensiunea și deformația instantanee.

O a doua contribuție majoră este realizarea prin forțe proprii a unui dispozitiv de ambutisare care mi-a servit ca stand experimental proiectat și gândit în totalitate de mine. Prelucrările datelor atât experimentale cât și cele din simulare s-au concretizat în teză sub forma capitolelor însă pentru o detaliere mai amplă am relevat o serie de tabele centralizatoare cu datele de lucru de unde am extras datele care explică numeric procesul de ambutisare.

Pornind cu proiectarea standului am realizat în această teză proiectul dimensional în principal, aceasta reflectându-se foarte bine în anexa 2 a tezei de doctorat.

Am realizat în partea experimentală legătura de interfață dintre standul experimental, mașina de tracțiune-compresiune pe care am realizat experimentul și sistemul de achiziție.

Am trasat graficele de dependență între forță și deformație (subțiere) în funcție de adâncimea de ambutisare. Valorile numerice pentru forță și subțiere, din experiment au fost puse în același grafic cu aceleași variabile extrase din simularea numerică.

Am realizat un studiu comparativ între simulare și experiment pentru cele două variabile studiate în experiment, forța și deformația reperului, sub formă de subțiere a peretelui. În urma studiului comparativ pentru forța din experiment și

simulare s-a obținut o eroare de 2,6% iar pentru subțiere 3,6%.

Pentru a putea măsura subțierea peretelui reperului format, am secționat și am măsurat cu șublerul electronic reperatele formate la diferite adâncimi.

În timpul experimentului am uns foile de tablă supuse la ambutisare, am realizat alimentarea dispozitivului cu foi de tablă debitate circular în prealabil la diametrul de 210 mm și am acționat mașina de tracțiune la diferite regimuri.

Tot la faza experimentală am fotografiat întreg experimentul, am setat progresiv viteza de coborâre a poansonului mașinii, am reglat efectul de decalare între forța transmisă prin poanson de la mașină și cea înregistrată prin doza tensometrică la sistemul de achiziție.

7.3. Perspective de dezvoltare a temei

În ceea ce privește posibilitățile de continuare a studiului de față pot preciza următoarele:

Cu prezentul model numeric validat în capitolul anterior se poate face predicții în timp real acoperitoare pentru o multitudine de parametri setați în prealabil atât la mașină de ambutisat cât și la modul de abordare a procesului (forțe de apăsare la inel, forțe de ambutisare, timpi de lucru, viteze instantanee). Prin aceasta se elimină consumul excesiv de material folosit pentru setarea parametrilor de lucru ai mașinii, timpii efectivi de lucru și un rol important este cel al susținerii în timp a bunei menținere a mașinilor de ambutisat.

Ca și elemente de continuitate a studiului propun realizarea încă o dată a experimentului cu implementarea unor timbre tensometrice speciale de compresiune sub inelul de apăsare și măsurarea dinamică a forței de apăsare într-un mod direct de citire pe sistemul de achiziție prin aceasta putându-se face predicția cu mai mare acuratețe a problemei de apăsare a inelului.

Propun realizarea unui studiu de simulare cu ajutorul modelului în care la adâncimile critice de ambutisare unde procesul necesită o a doua trecere sau mai multe, realizarea unei ambutisări combinate rece-cald în zona critică pentru a vedea rezultatele în situația creșterii adâncimii de ambutisare prin realizarea unei recoaceri locale a foii de tablă pentru detensionare.

7.3.1. Dezvoltarea cercetărilor teoretice

1. Determinarea plajelor de valori ale constantelor utilizate de program care țin cont de natura materialului și calitatea tablei de ambutisat
2. În cazul în care determinând modulele de elasticitate și tensiunile pentru cele trei zone specifice majoritar elastică, elasto-plastică și majoritar plastică se poate face o predicție asupra cauzelor intrării forfecare și fisuri la nivelul grăunților care ulterior duc la generarea fisurilor și rupturilor pe suprafața reperului.
3. Determinarea evoluției dinamice tensiune-deformație funcție de un regim variabil optimal (viteză variabilă de avans a poansonului la ambutisare respectiv forță variabilă de ambutisare) pe produse industriale dedicate.

7.3.2. Dezvoltarea cercetărilor experimentale

1. Crearea pentru simularea numerică dedicată în cazul produselor din industrie bine definite a unei biblioteci speciale atașate cu elemente deformabile și nedeformabile declarate cu un anumit cod pentru a satisface condițiile reale optime ale unor variabile necesare simulării.
2. Realizarea unor modele numerice avansate pentru predicția ruperilor, forfecărilor respectiv deformațiilor de tipul subțierilor în secțiuni anterioare secțiunile cu rupere
Se pot face o serie de predicții pentru a elimina eventuale fisuri în zone periculoase și mări adâncimea de ambutisare la rece prin implementarea în construcția matriței a unui circuit inductiv de încălzire locală.
Tratamentul termic de recoacere realizat are rolul de efect de descărcare a tensiunilor din tabla de material cât și a ecruisării acumulate în timpul procesului.
Acesta este aplicat într-o secvență precedentă în care tensiunile nu sunt periculoase pentru fisuri, astfel materialul recoapt avansează sub acțiunea ambutisării până la o secvență unde tensiunile excesive dacă nu ar fi fost descărcate prin tratamentul de recoacere ar fi produs fisuri și ruperi de material.
3. Realizarea unui experiment de ambutisare pe mașină de ambutisat cu dublă acțiune folosind timbre tensometrice de presiune locală pentru înregistrarea dinamică a deformațiilor și a tensiunilor la un regim variabil optimal bine stabilit

8. BIBLIOGRAFIE

- [1] Abaqus, 2009. Reference Manuals v6.9. Dassault Systemes Simulia Corp. Bai, Y., 2008. Effect of loading history in necking and fracture, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- [2] Altan, T. (1971), Computer simulation to predict load, stress and metal flow in an axisymmetric closed die forging, in A.L. Hoffmann (Ed.), Metal Forming, Plenum Press, New York, pp. 249-274.
- [3] Anand L, Balasubramanian S. Polycrystal plasticity: application to earring in cup drawing. Ann CIRP 1996;45:263-8.
- [4] Asaro RJ, Needleman A. Texture development and strain hardening in rate dependent polycrystals. Acta Metall 1985;33:923-53.
- [5] Attaf, D., Penazzi, L., Boher, C., Levallant, C., 2002. Mechanical study of a sheet metal forming dies wear. In: Bergstrom, J., Fredriksson, M., Johansson, M., Kotik, O., Thuvander, F. (Eds.), Proceedings of 6th International Tooling Conference. Karlstad, Sweden, pp. 209-221
- [6] Avitzur, B. (1968), Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill, New York.
- [7] Banabic, D., Dorr, R. I. *Deformabilitatea tablelor metalice subțiri. Metoda curbelor limită de deformare*. Oficiul de informare documentară pentru industria construcțiilor de mașini, București, 1992
- [8] Banabic D., Bünge H.J., Pöhlandt K., Tekkaya A.E., *Formability of Metallic Materials*, Editor: Banabic D., Springer Verlag, Heidelberg, 2000 (358 pag), ISBN 3-540-67906-5
- [9] Banabic D., (Editor), *Advanced Methods in Material Forming*, Springer, Heidelberg, 2007 (376 pag), ISBN 3-540-69844-2.
- [10] Banabic D., Sheet metal predicted by using the new (1993) Hill's yield criterion, In: *Advanced Methods in Materials Processing Defects* (Studies in Applied Mechanics Serie, Vol. 45), (Editors: Predeleanu M., Gilormini P.), Elsevier Science, Amsterdam, 1997, p.257-265, ISBN 0-444-82271-2
- [11] B. Kroplin, E. Luckey (Eds.), Metal forming process simulation in industry, in: International Conference and Workshop, Baden-Baden, Germany, 28- 30, 1994
- [12] Bathe, K.J., Ramm, E. and Wilson, E.L. (1975), Finite element formulations for large deformation dynamic analysis, International Journal of Numerical Methods for Engineering, Vol. 9, pp. 353-386.
- [13] Bai, Y., Wierzbicki, T., 2008. Predicting fracture of AHSS sheets on the punch and die radii and sidewall. In: Proceedings of Numisheet 2008, Interlaken, Switzerland, pp. 297-306.
- [14] Bai, Y., Wierzbicki, T., 2010. Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture. International Journal of Fracture 161, 1-20.
- [15] Benzerga A, A., Besson, J., Pineau, A., 2004. Anisotropic ductile fracture. Part II: theory. Acta Materialia 52, 4639-4650
- [16] Bao, Y.B., Wierzbicki, T., 2004. A comparative study on various ductile crack formation criteria. Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the ASME 126, 314-324
- [17] Boher, C., attaf, D., Penazzi, L., Levallant, C., 2005. wear behaviour on the

- radius portion of a die in deep-drawing: identification, localization and evolution of the surface damage. *Wear* 259, 1097-1108.
- [18] Constantin Iliescu *Tehnologia Presării la Rece Ed dactică și Pedagogică București* 1984.
- [19] C Ciocârdia *Tehnologia Presării la Rece Editura Dactică și Pedagogică București* 1991
- [20] Choi SH, Cho JH, Oh KH, Chung K, Barlat F. Texture evolution of FCC sheet metals during deep drawing process. *Int J Mech Sci* 2000;42(8):1571-92.
- [21] Chen, C.C. and Kobayashi, S. (1978), Rigid-plastic finite-element analysis of ring compression, in : H. Armen and R.F. Jones, Jr. (Eds.), *Application of Numerical Methods to Forming Processes, Proceedings of the Winter Annual Meeting of ASME, AMD, Vol. 28, pp. 163-174.*
- [22] Carter, Jr., W.T. and Lee, D. (1986), Further analysis of axisymmetric upsetting, *Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 198-204.*
- [23] Chakrabarty, J. (1987), *Theory of Plasticity, McGraw-Hill Book Company, New York.*
- [24] Colgan, M. and Monaghan, J. (2003), Deep drawing process: Analysis and experiment, *Journal of Materials Processing Technology, Vol. 132, pp. 35-41*
- [25] Chaboche, J. L., 1988a. Continuum damage mechanics. 1. General concepts. *Journal of Applied Mechanics - Transactions of the ASME* 55, 59-64
- [26] Chaboche, J. L., 1988b. Continuum damage mechanics. 2. Damage growth, crack initiation, and crack-growth. *Journal of Applied Mechanics - Transactions of the ASME* 55, 65-72
- [27] Clift, S.E., Hartley. P., Sturgess, C.E.N., Rowe, G.W., 1990. Fracture prediction in plastic-deformation processes. *International Journal of Mechanical Sciences* 32, 1-17
- [28] Crockcroft, M.G., Latham, D.J., 1968. Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals* 96, 33-39.
- [29] Coppola, T., Cortese, L., Folgarait, P., 2009. The effect of stress invariants on ductile fracture limit in steels. *Engineering Fracture Mechanics* 76, 1288-1302.
- [30] Christiansen, S., De Chiffre, L., 1997. topographic characterization of progressive wear on deep drawing dies. *Tribol. Trans.* 40, 346-352.
- [31] Coubrough, G.J., Alinger, M.J., Van Tyne, C.J., 2002. Angle of contact between sheet and die during stretch-bend deformation as determined on the bending-under-tension friction test system. *J. Mater. Process. Technol.* 130-131, 69-75.
- [32] Dadras, P. and Thomas, J.F. (1983), Analysis of axisymmetric upsetting based on flow pattern observation, *International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 25, pp.421-427.*
- [33] Dragan, I., *Tehnologia deformărilor plastice Ed Dactică și pedagogică București* 1976
- [34] E. Onate, M. Kleiber, C. Agelet de Saracibar, Plastic and viscoplastic flow of void-containing metals. Applications to axisymmetric sheet forming problems, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 25 (1988) 227-251.
- [35] G. Dhatt, G. Touzot, S.A. Maloine (Eds.), *Une pr´esentation de la m´ethode des ´el´ements finis, L'Universit´e Laval Qu´ebec, Paris, 1981.*
- [36] Green, A.P. (1951), A theoretical investigation of the compression of a ductile material between smooth flat dies, *Philosophical Magazine, Vol. 42, pp. 900-918.*
- [37] Gupta, S., Reddy, N.V. and Dixit, P.M. (2003), Ductile fracture prediction in axisymmetric upsetting using continuum damage mechanics, *Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, pp. 256-26.*

- [38] Guo, Y.Q., Batoz, J.L., Detraux, J.M. and Duroux, P. (1990), Finite element procedures for strain estimation of sheet metal forming parts, *Annals of CIRP*, Vol. 30, pp. 1385–1401
- [39] Gotoh, M., Katoh, M., Yamashita, M., 1997. Studies of stretch-drawing process of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology* 63, 123-128.
- [40] Gurson, A.L., 1975. Plastic flow and fracture behavior of ductile materials incorporating void nucleation, growth and interaction, Ph.D. Thesis, Brown University..
- [41]. Hecht, Gh. Hollanda, D., Mehedințeanu, M., Tdra, E., Oancea, N. și Iritnie, I. Îndrumător pentru tehnologia ștanțării și matritării la rece. 1972.
- [42] H. Sattari, R. Ganesan, R. Sedaghati, Analysis and design optimization of deep drawing process. Part 1. Three dimensional finite element and sensitivity analysis, *J. Mater. Process. Technol.*, submitted for publication.
- [43] H. Naceur, A. Delam´eziere, J.L. Batoz, Y.Q. Guo, C. Knopf-Lenoir, Some improvements on the optimum process design in deep drawing using the inverse approach, *J. Mater. Process. Technol.* 146 (2) (2004) 250– 262
- [44] Hill, R., Lee, E.H. and Tupper, S.J. (1923), A method of numerical analysis of plastic flow in plane strain and its application to the compression of a ductile material between rough platens, *Transaction of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, pp. 46–52
- [45] Hartley, P., Sturgess, C.E.N. and Rowe, G.W. (1979), Friction in finite element analysis of metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 21, pp. 301–311.
- [46] Hartley, P., Sturgess, C.E.N. and Rowe, G.W. (1980), Influence of friction on the prediction of forces, pressure distributions and properties in upset forging, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 22, pp. 743–753.
- [47] Hartley, P. and Pillinger, I. and Sturgess, C.E.N. (Eds.) (1992), *Numerical Modeling of Material Deformation Processes: Research, Development and Application*, Springer, London.
- [48] Hanaki, K., Kato, K., 1984. Pressure peak in bending and unbending process. *Adv. Technol. Plast* 1, 581-586.
- [49] Hortig, D., Schmoeckel, D., 2001. Analysis of local loads on the draw die profile with regard to wear using the FEM and experimental investigations]. *Mater. Process. Technol.* 115, 153-158.
- [50] Issa, D.L., 2009. Testing and prediction of failure of AHSS sheets and die radius and sidewall using novel fracture apparatus, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [51] J.K. Lee, G.L. Kinzel, R.Wagoner, Numerical simulation of 3D sheet metal forming processes, verification of simulations with experiments, in: *Third International Conference on NUMISHEET 96*, the Ohio State University, Dearborn, MI, September 29–October 3, 1994
- [52] J.C. Gerdeen, P. Chen, Geometric mapping method of computer modeling of sheet metal forming, *NUMISHEET 89* (1989) 437–444.
- [53] J.L. Batoz, P. Duroux, Y.Q. Guo, J.M. Detraux, An efficient algorithm to estimate the large strains in deep drawing, *NUMISHEET 89* (1989) 383–388.
- [54] J.L. Batoz, H. Naceur, O. Barlet, Y.Q. Guo, C. Knopf-Lenoir, Optimum design of blank contours in axisymmetrical deep drawing process, in: Z. Wan-Xie, C. Geng-dong, Xi-Kui Li (Eds.), *Advances in Computational Mechanics*, International Academic Publisher, Beijing, China, 1996, pp. 113–125
- [55] J.L. Batoz, G. Dhatt, Mod´elisation des structures par ´el´ements finis, vol. 3, Coques, Ed. Herm`es, Paris, 1992

- [56] Joun, M.S., Lee, S.W. and Chung, J.H. (1998), Finite element analysis of a multistage axisymmetric forging process, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 843–854.
- [57] Johnson, W. and Mellor, P.B. (1972), *Engineering Plasticity*, von Nostrand Co. Ltd.
- [58] Jensen, M.R., Damborg, F.F., Nielsen, K.B., Danckert, J., 1998. Applying the finite-element method for determination of tool wear in conventional deep drawing. *J. Mater. Process. Technol.* 115, 153-158.
- [59] Knockaert R, Chastel Y, Massoni E. Rate-independent crystalline and polycrystalline plasticity, application to FCC materials. *Int J Plastic* 2000;16: 179–98.
- [60] K. Chung, D. Lee, - Computer-aided analysis of sheet material forming processes, *First International Conference on Technology of Plasticity*, vol. 1, Tokyo, Japan, 1984, pp. 660–665.
- [61] K. Chung, O. Richmond, Sheet forming process design on ideal forming theory, *NUMISHEET 92* (1992) 455–460.
- [62] Kudo, H. (1960), Some analytical and experimental studies of axisymmetric cold forging and extrusion, I and II, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 2, pp. 102–127.
- [63] Kobayashi, S. Oh, S.I. and Altan, T. (1989), *Metal Forming and the Finite Element Method*, Oxford University Press, New York.
- [64] Kim, H.S., Im, Y.T. and Geiger, M. (1999), Prediction of ductile fracture in cold forging of aluminum alloy, *Transaction of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 121(3), pp. 336–344.
- [65] Kim, S.H. and Huh, H. (2001), Finite element inverse analysis for the design of intermediate dies in multi-stage deep drawing with large aspect ratio, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 779–785.
- [66] Ku, T.W., Lim, H.J., Choi, H.H., Hwang, S.M. and Kang, B.S. (2001), Implementation of backward tracing scheme of the FEM to blank design in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 90–97.
- [67] Kim, J, H., Wagoner R, H., 2009. Thermo-mechanical modeling of drawbend formability tests. In: *Proceedings of IDDRG Conference*, Golden CO, pp.503-512.
- [68] Kim, J., Gao, X.S., Srivatsan, T.S., 2004. Modeling of growth in ductile solids: effects of stress triaxiality and initial porosity. *Engineering Fracture Mechanics* 71, 379-400.
- [69] Li SY, Hoferlin E, Bael AV, Houtte PV, Teodosiu C. Finite element modeling of plastic anisotropy induced by texture and strain-path change. *Int J Plastic* 2003;19:647–74
- [70] Lorenzo, R.D., Fratini, L. and Micari, F. (1999), Optimal blank holder force path in sheet metal forming processes: an AI based procedure, *Annals of CIRP*, Vol. 48, pp. 231–234.
- [71] Lemaitre, J., 1985. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology – Transactions of the ASME* 107, 83-89.
- [72] Leroy, G., Embury, J.D., Edward, G., Ashby, M.F., 1981. A model of ductile fracture based on the nucleation and growth of voids. *Acta Metallurgica* 29, 1509-1522.
- [73] Luo, M., Wierzbicki, T., 2009. Ductile fracture calibration and validation of anisotropic aluminum sheets. In: *Proceedings of 2009 SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Albuquerque, NM, pp. 402-413.
- [74] Li., Y., Luo, M., Gerlach, J., Wierzbicki, T., 2010. Prediction of shear- induced

- fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, in press, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.06.021.
- [75] Lee, C.H. and Kobayashi, (1971), Analysis of axisymmetric upsetting and plane strain side-pressing of solid cylinders by finite element method, *Transaction of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 93, pp. 445–454.
- [76] Leblond, J.B., Perrin, G., Devaux, J., 1995. An improved Gurson-type model for hardenable ductile metals. *European journal of Mechanics A – Solids* 14, 499-527.
- [77] Miehe C, Schotte J. Anisotropic finite elastoplastic analysis of shells: simulation of earring in deep-drawing of single- and polycrystalline sheets by Taylor-type micro to macro transitions. *Comput Methods Appl Mech Eng* 2004;193:25–57
- [78] Miehe C, Schotte J. Crystal plasticity and evolution of polycrystalline microstructure. In: Stein E, de Borst R, Hughes TJR, editors. *Encyclopedia of computational mechanics*. Chichester: Wiley; 2004 [Chapter 8].
- [79] M.P. Sklad, B.A. Yungblud, Analysis of multi-operation sheet forming processes, *NUMISHEET 92* (1992) 543–547.
- [80] Michel, B. and Boyer, J.C. (1995), Elasto-visco-plastic finite-element analysis of a cold upsetting test and stress-state validation by residual-stress measurements, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 54, pp. 120–128.
- [81] Mungi, M.P., Rasane, S.D. and Dixit, P.M. (2003), Residual stresses in cold axisymmetric forging, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 256–266.
- [82] Majlessi, S.A. and Lee, D. (1993), Deep drawing of square-shaped sheet metal parts, part 1: Finite element analysis, *Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 102–109.
- [83] Menezes, L.F. and Teodosiu, C. (2000), Three dimensional numerical simulation of deep drawing process using solid finite elements, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 97, pp. 100–106.
- [84] Marciniak, Z., Duncan, J., 1992. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Edward Arnold, London, UK
- [85] Marciniak, Z., Duncan, J.I., Hu, S.J., 2002. *Mechanics of sheet Metal Forming*, 2nd edition. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [86] McClintok, F. A., 1968. A criterion of ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics* 35, 363-371.
- [87] Mortensen, J., Dirks, J., Christensen, P., 1994. A combined physical and numerical simulation of tool performance in conventional deep – drawing operations. In: *Proceedings of IDDRG 18th Biennial Congress*, Lisbon, Portugal, pp. 233-240.
- [88] Nahshon, K., Hutchinson, J.W., 2008. Modification of the Gurson model for shear failure. *European Journal of Mechanics A – Solids* 27, 1-17.
- [89] Nakamachi E, Dong XH. Elastic/crystalline-viscoplastic finite element analysis of dynamic deformation of sheet metal. *Eng Comput* 1996;13(2–4):308–26.
- [90] Nakamachi E, Hiraiwa K, Morimoto H, Harimoto M. Elastic/crystalline viscoplastic finite element analyses of single- and poly-crystal sheet deformations and their experimental verification. *Int J Plastic* 2000;16:1419–41.
- [91] Nakamachi E, Xie CL, Harimoto M. Drawability assessment of BCC steel by using elastic/crystalline viscoplastic finite element analysis. *Int J Mech Sci* 2001;43:631–52
- [92] Nakamachi E, Xie CL, Harimoto M. Drawability assessment of FCC aluminum alloy sheet by using elastic/crystalline viscoplastic finite element analysis. *Int J Plastic* 2002;18:617–32.
- [93] O. Barlet, J.-L. Batoz, Y.Q. Guo, F. Mercier, H. Naceur, C. Knopf-Lenoir, The inverse approach and mathematical programming techniques for optimum design of

- sheet forming parts, ESDA 96', 3rd. Biennial European Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Montpellier, France, July 1-4, 1996. © ASME 1996, PD-vol. 75, Eng. Syst. Des. Anal. Vol. 3, pp. 227-232.
- [94] Oh, S.I. and Kobayashi, S. (1976), Workability of aluminum alloy 7075-t6 in upsetting and rolling, Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 98, pp. 800-806.
- [95] Onate, E. and Saracibar, C.A.D. (1990), Finite element analysis of sheet metal forming problems using a selective viscous bending/membrane formulation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 30, pp. 1577-1593.
- [96] Osakada, K., Wang, C.C. and Mori, K.I. (1995), Controlled FEM simulation for determining history of blank holding force in deep drawing, Annals of CIRP, Vol. 44, pp. 243-246.
- [97] Oh, S.I., Chen, C.C., Kobayashi, S., 1979. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. 2. Workability in extrusion and drawing. Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME 101, 36-44.
- [98] Prakash M. Dixit • Uday S. Dixit Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods
- [99] Pierce D, Asaro RJ, Needleman A. An analysis of nonuniform and localized deformation in ductile single crystals. Acta Metall 1983;30:1087-119
- [100] Pierce D, Asaro RJ, Needleman A. Material rate dependent and localized deformation in crystalline solids. Acta Metall 1983;31:1951-76
- [101] Pegada, V.P., Chun, Y. and Santhanam, S. (2002), An algorithm for determining the optimum blank shape for deep drawing of aluminum cups, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 125/126, pp. 743-750
- [102] Pardoent, T., Hutchinson, J., 2000. An extended model for void growth and coalescence. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 48, 2467-2512.
- [103] Pereira, M.P., Yan, W., Rolfe, B.F., 2007. Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming. Mater Sci Forum 561-565, 1975-1978.
- [104] Pereira, M.P., Yan, W., Rolfe, B.F., 2007. Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming. Wear doi:10.1016/j.wear.2008.04.042.
- [105] Raabe D, Roters F. Using texture components in crystal plasticity finite element simulations. Int J Plastic 2004;20:339-61.
- [106] Rowe, G.W., Sturgess, C.E.N., Hartley, P. and Pillinger, I. (1991), Finite Element Plasticity and Metal Forming Analysis, Cambridge University Press, Cambridge.
- [107] Romanovski.V.P Stanțarea și matrițarea la rece Ed Tehnică București 1970.
- [108] Rice, J.R., Tracey, D.M., 1969. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 17, 201-217
- [109] Rata-Eskola, A., Kumpulainen, J., Sulonen, M., 1982. Comparison of strip drawing tests used for measuring surface interactions in press forming. In: Ligure, S.M. (Ed.), Proceedings of IDDRG 12th Biennial Congress. Italy, pp. 165-174.
- [110] Schmidt-Baldassari M. Numerical concepts for rate-independent single crystal plasticity. Comput Methods Appl Mech Eng 2003;192:1261-80.
- [111] Shah, S.N., Lee, C.H. and Kobayashi, S. (1974), Compression of tall, circular solid cylinders between parallel flat dies, in: Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, pp. 295-300.
- [112] Shima, S., Mori, K. and Osakada, K. (1978), Analysis of metal forming by the rigidplasticfinite element method based on plasticity theory for porous metals, in H. Lippmann (Ed.), Metal Forming Plasticity, Springer, Berlin, pp. 305-317.

- [113] Saran, M.J. and Samuelsson, A. (1990), Elastic-viscoplastic implicit formulation for finite element simulation of complex sheet forming processes, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 1675–1697.
- [114] Sriram, S., Wong, C., Hunag, M., Yan, B., 2003. Stretch-bendability of advanced high strength steels. In: *Proceedings of SAE 2003 World Congress*, Detroit, MI, SAE 2003-01-1151.
- [115] Shih, H., 2009. An experimental study on shear fracture of advanced high strength steels. In: *Presentation of Great Design in Steel 2009*, Detroit, MI.
- [116] Shih, H.-C., Shi, M.F., 2008. Experimental study of shear fracture of advanced high strength steels. In: *Proceedings of International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, MSEC 2008-72046.
- [117] Shih, H.-C., Shi, M.F., Xia, Z.C., Zeng, D., 2009. Experimental study on shear fracture of advanced high strength steels: part II. In: *Proceedings of International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, West Lafayette, IN, MSEC 2009-84070.
- [118] Takahashi H, Motohashi H, Tokuda M, Abe T. Stress-strain relations of polycrystalline metals: 3. Proportional loading of FCC Metals. *Int J Plastic* 1994;10(1):63–80.
- [119] Takahashi H, Motohashi H, Tsuchida S. Development of plastic anisotropy in rolled aluminum sheets. *Int J Plastic* 1996;12(7):935–49.
- [120] Takahashi H, Fujiwara K, Nakagawa T. Multiple-slip work hardening model in crystals with application to torsion-tension behaviors of aluminum tubes. *Int J Plastic* 1998;14(6):489–509.
- [121] Toh, C.H. and Kobayashi, S. (1985), Deformation analysis and blank design in square cup drawing, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 25, pp. 15–32.
- [122] Tvergaard, V., Needleman, A., 1984. Analysis of cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Materialia* 32, 157-169
- [123] Voyiadjis, G.Z., Dorgan, R.J., 2007. Framework using functional forms of hardening internal state variables in modeling elasto-plastic-damage behavior. *International Journal of Plasticity* 23, 1826-1859.
- [124] Vasile Marinescu, Viorel Păunoiu, Mitică Afteni, Epureanu Alexandru, Maier Cătălina, Florin Bogdan Marin., raportul anual grant ID 1759/2008 conform contract 676/2009, raport cu titlul – „Dezvoltarea unui nou concept de conducere a proceselor de deformare plastică bazat pe noi tehnici de reducere a dimensionalității”
- [125] Wagner S., Baur J., Banabic D., *Umformtechnik*, Litografia Universitatii Tehnice din Cluj Napoca, Cluj Napoca, 2008, 207 pag
- [126] Walp, M.S., Wurm, A., Siekirk, J.F., Desai, A.K., 2006. Shear fracture in advanced high-strength steels. In: *Proceedings of SAE 2006 World Congress*, Detroit, MI, SAE 2006-01-1433
- [127] Wierzbicki, T., Xue, L., 2005. On the effect of the third invariant of the stress deviator on ductile fracture. Technical Report 136, Impact and Crashworthiness Lab, Massachusetts Institute of Technology.
- [128] Wagoner, R., Kim, J., Sung, J., 2009 Formability of advanced high strength steels. *International Journal of Material Forming* 2, 359-362
- [129] X. Chateau, A simplified approach for sheet forming processes design, *Int. J. Mech. Sci.* 36 (6) (1994) 579–597.

- [130] Xue, L., 2007a. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *International Journal of Solids and Structures* 44, 5163-5181.
- [131] Xue, L., 2007b. Ductile fracture modeling: theory, experimental investigation and numerical verification, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [132] Y.Q. Guo, J.L. Batoz, H. Naceur, S. Bouabdallah, F. Mercier, O. Barlet, Recent developments on the analysis and optimum design of sheet metal forming parts using a simplified inverse approach, *Comput. Struct.* 78 (2000) 133-148.
- [133] Yang, D.Y., Im, Y.T., Yoo, Y.C., Park, J.J., Kim, J.H., Chun, M.S., Lee, C.H., Lee, Y.K., Park, C.H., Song, J.H., Kim, D.Y., Hong, K.K., Lee, M.C. and Kim, S.I. (2000), Development of integrated and intelligent design and analysis system for forging processes, *Annals of CIRP*, Vol. 49, pp. 177-180.
- [134] Zhao Z, Roters F, Mao WM, Raabe D. Introduction of a texture component crystal plasticity finite element method for anisotropy simulations. *Adv Eng Mater* 2001;3(12):984-90.
- [135] Zhao Z, Mao WM, Roters F, Raabe D. A texture optimization study for minimum earring in aluminum by use of a texture component crystal plasticity finite element method. *Acta Mater* 2004;52:1003-12.
- [136] Zhao, G., Wright, E. and Grandhi, R.V. (1996), Computer aided perform design in forging using the inverse die contact tracking method, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36, pp. 755-769.
- [137] Zhang, K.S., Bai, J.B., Francois, D., 2001. Numerical analysis of the influence of the Lode parameter on void growth. *International Journal of Solids and Structures* 38, 5847-5856
- [138] **Birlan Adrian**, Dobra Ramona Monica, Dynamic stress study during deep-drawing process. Vol.XVII no.4 (2012) METALURGIA INTERNATIONAL, pag 86-89 ISSN 1582-2214
- [139] **Birlan Adrian**, Dobra Ramona Monica. The study of dynamic state of deformation during a cold plastic deformation process in the case of deep-drawing, Vol.XVII no.4 (2012) METALURGIA INTERNATIONAL, pag 132-135 ISSN 1582-2214
- [140] **Birlan Adrian**, Jădăneanț, M., - Studiu de caz asupra deformării pieselor de tip disc din materiale termoplastice, injectate central., *Știință și Inginerie* vol.XVIII, Editura AGIR, 2010, p. 551/558, A X-a Conferință Națională „Prof. D. Pavel”, ISSN 2067-7138
- [141] **Birlan Adrian**, Jădăneanț, M., - Studiu experimental cu privire la apariția urechilor la ambutisarea pieselor cilindrice., *Știință și Inginerie* vol.XX, Editura AGIR, 2011, p. 431/436, A XI-a Conferință Națională „Prof. D. Pavel”, ISSN 2067-7138
- [142] **Birlan Adrian**, Jădăneanț, M., - Probleme de mentenanță în procesul de ambutisare la rece, *Prevenirea riscurilor în activitățile de mentenanță.*, Editura Mega, Cluj-Napoca, 2011, p.157/162, Simpozionul „Mentenanța în condiții de securitate” Cluj Napoca, 17-19.X.2011
- [143] **Birlan Adrian**, Jădăneanț, M., - Simularea numerică cu elemente finite a procesului de ambutisare., *Știință și Inginerie* vol.XXI, Editura AGIR, 2012, p. 457/462, A XII-a Conferință Națională „Prof. D. Pavel”, ISSN 2067-7138
- [144] **Birlan Adrian**, Faur, N., Jădăneanț, M., - Finit element modeling the temperature fields plastic injection., *Acta Technica Napocensis, Applied Mathematics and Mechanics* Nr.53, Vol.II, 2010, p.239/244, ISSN 1221 - 5872
- [145] **Birlan Adrian**, Jădăneanț, M., - Sisteme dinamice de influență în circulația feroviară., *Buletinul AGIR*, Anul XV nr. 2-3, aprilie-septembrie 2010, pag. 153/156; ISSN 1224-792

LISTA DE FIGURI

Figura 2.1. Contururi ale tensiunii echivalente și distribuțiile normalizate ale presiunii de contact determinate prin analiză cu elemente finite pentru cele trei etape distincte ale unui proces de ambutisare. Regiunile având culoarea albă în conturile von Mises indică valori ale tensiunilor sub limita de curgere a semifabricatului.....	21
Figura 3.1. Căile de lucru ale programului Abaqus Model și Results	26
Figura 3.2. Foaia de tablă simplificată	28
Figura 3.3. Discretizarea în elemente finite a foii de tablă	29
Figura 3.4. Condițiile de simetrie impuse pe contur	29
Figura 3.5.a. Poansonul simplificat, cu punctul de aplicație al forței de ambutisare	30
Figura 3.5.b. Matrița simplificată cu punctul de aplicație (RP) ca și fixare a acesteia	30
Figura 3.5.c. Inel de reținere simplificat cu punctul de aplicație a forței pentru întinderea tablei	31
Figura 3.6. Procesul ambutisării la rece sub ipoteza simplificării	31
Figura 3.7. Crearea foii de tablă cu arborele de lucru al modelului.....	32
Figura 3.8. Crearea unui element activ de lucru (inelul de reținere) cu arborele de lucru al modelului.....	33
Figura 3.9. Crearea materialului foii de tablă în modelul de simulare	35
Figura 3.10.a. Crearea pasului 3 sub-secțiunea basic din cadrul modelului de simulare al ambutisării.....	37
Figura 3.10.b. Crearea step-ului 3 sub-secțiunea Incrementation din cadrul modelului de simulare al ambutisării	38
Figura 3.10.c. Crearea step-ului 3 sub-secțiunea Other din cadrul modelului de simulare al ambutisării.....	39
Figura 3.11. Crearea step-ului 4 sub-secțiunea Basic din cadrul modelului de simulare al ambutisării.....	39
Figura 3.12.a. Crearea step-ului 5 și 6 sub-secțiunea Basic din cadrul modelului de simulare al ambutisării	40
Figura 3.12.b. Crearea step-ului 5 și 6 sub-secțiunea Incrementation din cadrul modelului de simulare al ambutisării	40
Figura 3.12.c. Crearea step-ului 5 și 6 sub-secțiunea Other din cadrul modelului de simulare al ambutisării	41
Figura 3.13. Interacțiunea dintre inelul de reținere și foaia de tablă	42
Figura 3.14. Interacțiunea dintre matriță și foaia de tablă	43
Figura 3.15. Interacțiunea dintre poanson și foaia de tablă	43
Figura 3.16. Reprezentarea grafică constructivă a elementelor active implicate în ambutisare	44
Figura 3.17. Reprezentarea discretizării foii de tablă pe un sfert de foaie și a elementelor active implicate în ambutisare	45
Figura 3.18. Reprezentarea BCs-ului 1 pentru foaia de tablă pe un sfert de foaie	46
Figura 3.19. Reprezentarea BCs-ului 2 pentru foaia de tablă pe un sfert de foaie	47
Figura 3.20. Reprezentarea BCs-ului 3 pentru inelul de reținere.....	48
Figura 3.21. Reprezentarea BCs-ului 4 impunerea deplasărilor și a rotirilor pentru poanson și matriță	48
Figura 3.22. Reprezentarea BCs-ului 5 impunerea deplasărilor blocate pe axele X și Z.....	49
Figura 3.23.a. Reprezentarea BCs-ului 6 impunerea deplasării inelului de reținere pe direcția axei Y	50
Figura 3.23.b. Modul de creare a elementelor active de lucru și dinamica acestora în cadrul modelului implementat	51
Figura 3.24. Reprezentarea BCs-ului 7 impunerea blocării deplasărilor și rotirilor pentru matriță.....	51
Figura 3.25. Reprezentarea BCs-ului 8 impunerea deplasării pe direcția axei Y a poansonului cu 0.3mm/s setarea vitezei de avans pentru poanson.....	52

Figura 3.26. Reprezentarea BCs-9 ÷ BCs-13, condiții de echilibru pentru poanson de blocare a deplasărilor pe axele X și Z, respectiv a blocării rotirilor pe toate axele.....	53
Figura 3.27. Reprezentarea BCs-ului 14 impunerea deplasării pe direcția axei Y a poansonului cu 100mm, setarea deplasării maxime pentru poanson.....	54
Figura 3.28. Reprezentarea BCs-ului 15, impunerea deplasării pe direcția axei Y a poansonului cu adaosul necesar ambutisării setarea deplasării pentru poanson fiind la liber lăsat la expansiunea programului	54
Figura 3.29. Modul de răspuns din partea programului în care finalizează simularea cu succes	55
Figura 3.30. Redarea tensiunilor instantanee în timpul procesului la diferite adâncimi.....	57
Figura 4.1. Domeniul problemei cu configurarea unui sfert de foaie.....	60
Figura 4.2. Diviziunea suprafețelor de sus și de jos ale tablei în funcție de condițiile limită .	62
Figura 4.3. Penetrarea de către nod a regiunii profilului razei poansonului.....	63
Figura 4.4. Normala și două direcții tangențiale la regiunea profilului razei matriței	65
Figura 4.5. Foaia de tabla 3D supusă deformării prin ambutisare	67
Figura 4.6. Mașina de tracțiune TC-100	68
Figura 4.7. Curba caracteristică convențională OLC10.....	69
Figura 4.8. Prezentarea secțiunii assembly din cadrul modelului de simulare implementat....	70
Figura 4.9. Principalele acțiuni ale elementelor active în timpul procesului de ambutisare.....	71
Figura 4.10. Ansamblul procesului de ambutisare la rece discretizat în elemente mesh	71
Figura 4.11. Modul de variație și distribuție a tensiunii la finalul ambutisării cilindrice la rece	72
Figura 4.12. Distribuția tensiunii maxime din foaia de tablă la adâncimea de 30 mm	76
Figura 4.13. Modul de alegere a timpului aferent frame-ului de lucru.....	77
Figura 4.14. Modul de distribuție al tensiunii la contactul poansonului cu foaia de tablă	78
Figura 4.15. Modul de distribuție al tensiunii la pretensionarea foii de tablă de către poanson pe adâncimea de 0.3mm adâncime de ambutisare Pasul 4 Secțiunea 0 H ambutisare 0,3mm.....	78
Figura 4.16. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de ambutisare 30 mm Pasul 4 Secțiunea 0 H ambutisare 30 mm	80
Figura 4.17. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 40 mm Pasul 4 Secțiunea 8 H ambutisare 40 mm.....	81
Figura 4.18. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 50 mm Pasul 4 Secțiunea 12 H ambutisare 50 mm	81
Figura 4.19. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 60 mm Pasul 4 Secțiunea 16 H ambutisare 60 mm	82
Figura 4.20. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 65 mm Pasul 4 Secțiunea 20 H ambutisare 65 mm	82
Figura 4.21. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 75 mm Pasul 4 Secțiunea 24 H ambutisare 75 mm	83
Figura 4.22. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 85 mm Pasul 4 Secțiunea 28 H ambutisare 85 mm	83
Figura 4.23. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 90 mm Pasul 4 Secțiunea 32 H ambutisare 90 mm.....	84
Figura 4.24. Modul de distribuție al tensiunii la adâncimea de 90 mm Pasul 5 Secțiunea 32 H ambutisare 90 mm.....	84
Figura 4.25. Variația tensiunii interne la simularea modelului numeric din foaia de tablă supusă ambutisării.....	85
Figura 4.26. Variația alungirii materialului foii de tabla la simularea modelului numeric.....	90
Figura 4.27. Modul de evoluție a alungirii instantanee dinamice după axa X... ..	91
Figura 4.28. Modul de evoluție a alungirii instantanee dinamice după axa Z	92
Figura 4.29. Modul de evoluție a alungirii instantanee dinamice după axa Y	93
Figura 4.30. Modul de evoluție a distribuției de deformații pentru componenta L12 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni.....	95
Figura 4.31. Modul de evoluție a distribuției de deformații pentru componenta L23 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	96
Figura 4.32. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L11 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	97
Figura 4.33. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru	

componenta L33 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	98
Figura 4.34. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L13 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	100
Figura 4.35. Modul de evoluție a distribuției de deformații instantanee pentru componenta L22 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	101
Figura 4.36. Evoluția deformației instantanee pentru componenta L13 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	102
Figura 4.37. Evoluția deformației instantanee pentru componenta L22 a tensorului deformație la diferite adâncimi setate de secțiuni	103
Figura 4.38. Evoluția tensiunii instantanee până la ruperea materialului foi de tablă pentru o forță de apăsare există	104
Figura 4.39. Modul de distribuție al tensiunii instantanee până la adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm	105
Figura 4.40. Evoluția tensiunii instantanee până la adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm	106
Figura 4.41. Comparatie între evoluțiile tensiunilor instantanee pe adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm respectiv 1mm	107
Figura 4.42. Evoluția deformațiilor instantanee până la adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm	108
Figura 4.43. Comparatie între evoluțiile deformațiilor instantanee pe adâncimea maximă de 90mm adâncime de ambutisare pentru o tablă de grosime 1,25mm respectiv 1mm	109
Figura 5.1. Desenul de execuție al matriței de ambutisare a dispozitivului	111
Figura 5.2. Desenul de execuție al coloanelor de ghidare a dispozitivului de ambutisare	112
Figura 5.3. Desenul de execuție al plăcii de apăsare pe foaie	113
Figura 5.4. Desenul de execuție al arcurilor de tensionare	114
Figura 5.5. Desenul de execuție al plăcii culisante	115
Figura 5.6. Desenul de execuție al contraplăcii de apăsare	116
Figura 5.7. Desenul de execuție al poansonului	117
Figura 5.8. Dispozitivul de ambutisare reprezentat în secțiune 3D tridimensional	117
Figura 5.9. Desenul de ansamblu al dispozitivului de ambutisare pregătit pentru acționare	118
Figura 5.10. Așezarea matriței de ambutisat pe platoul mașinii de tracțiune cu coloanele montate în matriță	119
Figura 5.11. Așezarea în matrița unsă în prealabil a foi de tablă	119
Figura 5.12. Așezarea pe foaia de tablă unsă pe cealaltă parte a plăcii de apăsare pe foaie	120
Figura 5.13. Poziționarea arcurilor pentru tensionare în locașurile plăcii de apăsare pe foaie	120
Figura 5.14. Poziționarea plăcii culisante centrată pe coloane, respectiv centrarea arcurilor pe poziție în locașurile de 33 mm diametru în placa culisantă	121
Figura 5.15. Poziționarea contra-plăcii și fixarea acesteia pe coloanele dispozitivului	121
Figura 5.16. Poziționarea poansonului și fixarea acestuia pe foaia de tablă din dispozitiv	122
Figura 5.17. Poziționarea șuruburilor de tensionare și preîncărcarea dispozitivului	122
Figura 5.18. Mașina de încercat epruvete la tracțiune LBG TC 100	123
Figura 5.19. Fâșia de tablă cu extensiomteru montat între bacurile mașinii de încercat epruvete la tracțiune, LBG TC 100	124
Figura 5.20. Ansamblul experimental compus din dispozitivul de ambutisare și mașina de tracțiune-compresiune	126
Figura 5.21. a. Mașina de încercări de tracțiune-compresiune în regim static sau dinamic, model VEB 1000 KN sarcina maximă, acționare hidraulică	128
Figura 5.21.b. Celula de forță Lorenz Messtechnik K-450, domeniu de măsurare 0-1000kN	129
Figura 5.22. Traductorul de adâncime folosit pentru determinarea adâncimii de ambutisare, valoare de măsurare 0-100 mm	129
Figura 5.23. Sistemul de achiziție folosit Esam Traveller 1	130
Figura 5.24. Schema de ansamblu (în secțiune) a dispozitivului de ambutisare	131
Figura 5.25. Alimentarea dispozitivului de ambutisare cu foaie de tablă pentru experiment	132
Figura 5.26. Montarea inelului de reținere pe foaia de tablă	133
Figura 5.27. Asamblarea elementelor elastice de acțiune, arcurile	134
Figura 5.28. Asamblarea plăcii de ghidare pentru tensionarea arcurilor și apăsarea foi de tablă	134

Figura 5.29. Asamblarea contraplăcii pentru tensionarea arcurilor, a plăcii de ghidare și apăsare a foii de tablă	136
Figura 6.1. Variația forței de ambutisare după cele trei direcții ortogonale rezultată din simularea numerică	139
Figura 6.2. Variația componentei forței de ambutisare pe axa Y atât din simulare cât și din experiment.....	141
Figura 6.3. Variația componentei pe axa Z a deformației din simulare	142
Figura 6.4. Modul de transformare fizică a deformațiilor pe direcțiile X și Y sub formă de festoane sau bavuri	143
Figura 6.5. Subțiere de 0,04 mm sub raza matriței la adâncimea de 60mm.....	143
Figura 6.6. Subțiere de 0,1 mm la raza matriței la ambutisarea totală a materialului.....	145
Figura 6.7.a. Subțiere de 0,25 mm în zona critică de subțiere deasupra razei poansonului la ambutisarea pe 60 mm adâncime de ambutisare	145
Figura 6.7.b. Subțiere de 0,27 mm în zona critică de subțiere deasupra razei poansonului la ambutisarea pe 60 mm adâncime de ambutisare	146
Figura 6.8. Schema logică de realizare a unui model conceptual de deformare plastică la rece	147
Figura 6.9. Schema logică de rulare a modelului numeric.....	148

LISTA DE TABELE

Tabelul 4.1. Alegerea jocului unilateral pentru ambutisarea pieselor cilindrice care se supun ulterioare calibrării fără subțiere	74
Tabelul 4.2. Valorile coeficientului k_{pi} pentru calculul razei de racordare a plăcii active la ambutisarea pieselor cilindrice	74
Tabelul 4.3. Variația tensiunii funcție de adâncimea de ambutisare între 0,3-30 mm	79
Tabelul 4.4. Variația tensiunii funcție de adâncimea de ambutisare între 30-40 mm frame4 - frame 8	80
Tabelul 4.5. Variația deformației (alungirii) pe cele trei axe de coordonate X, Y, și Z funcție de adâncimea de ambutisare între 0.3-90 mm Step 4 frame 0 - frame 32	86