

# **CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ HIDRAULICĂ A PIESELOR CU PEREȚI SUBȚIRI**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR  
de către

**Ing. Ioan Pernevan**

Conducător științific: prof.univ.dr. Ion Sporea  
Referenți științifici: prof.univ.dr. Marin Bica  
prof.univ.dr.ing. Ioan Ciupitu  
prof.univ.dr.ing. Gheorghe Aurel Gherman

Ziua susținerii tezei: 17.11.2007

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, 2007

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

Prezenta lucrare este rezultatul activității prestate în perioada stagiului ca doctorand fără frecvență la Facultatea de Mecanică din Universitatea Politehnică din Timișoara.

Datorită faptului că tehnologia de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri este o tehnologie relativ nouă, referirile legate de această tehnologie în literatura de specialitate sunt destul de puține, relativ dispersate și în general nu sunt făcute publice de către marile companii care dezvoltă cercetări în acest domeniu. Situația prezentată mai sus justifică, chiar și impune, abordarea unor cercetări legate de deformarea plastică la rece sub acțiunea unei presiuni hidraulice a semifabricatelor cu pereți subțiri.

Astfel, în această teză de doctorat pe care am intitulat-o „Cercetări teoretice și experimentale privind deformarea plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri” am realizat o sinteză a problemelor legate de tehnologiile de execuție a pieselor cu pereți subțiri și am abordat preponderent cercetări teoretice și experimentale privind fenomenul deformării plastice hidraulice a pieselor de tip placă.

Pentru realizarea actualei lucrări doresc să aduc alese mulțumiri conducătorilor științifici, domnului prof. univ. dr. ing. Ștefan Rosinger și domnului prof. univ. dr. ing. Ion Sporea pentru sprijinul și competența îndrumare acordată pe întreaga perioadă a elaborării tezei.

Îmi exprim întreaga considerație față membrii comisiei de doctorat, domnul președinte al comisiei prof. univ. dr. ing. Richard HERMAN prodecan al Facultății de Mecanică din Universitatea Politehnică din Timișoara și domnii prof.univ.dr. Marin BICA de la Universitatea din Craiova, prof. univ. dr. ing. Ioan CIUPITU de la Universitatea din Craiova și prof. univ. dr. ing. Gheorghe Aurel GHERMAN de la de la Universitatea „Aure Vlaicu” din Arad, care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei, pentru observațiile făcute și pentru timpul acordat lucrării.

Timișoara, noiembrie 2007

Ioan Pernevan

Pernevan, Ioan

**Cercetări teoretice și experimentale privind deformarea plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 11, Nr. 3, Editura Politehnica, 2007, 186 pagini, 195 relații de calcul, 73 figuri, 14 tabele.

ISSN: 1842-7855

ISBN: 978-973-625-430-7

Cuvinte cheie:

deformare plastică hidraulică, plăci circulare subțiri, deformații mari

Rezumat:

În prima parte a lucrării se face o descriere unitară a procedeeilor tehnologice de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri prezentând o clasificare a procedeeilor, problemele specifice acestor procedee, precum și domeniile prioritare de aplicabilitate ale acestora. În continuare s-a făcut o trecere în revistă a stării de tensiune și deformare a corpurilor solificate în domeniul plastic precum și o descriere a legilor care guvernează deformarea plastică a metalelor. Datele prezentate în acest capitol sunt necesare pentru studiul cazului particular al deformării plastice hidraulice a pieselor cu pereți subțiri.

Au fost determinate mai multe expresii originale de calcul a presiunii necesare deformării libere cu deformații mari ale unor plăci circulare subțiri încastrate pe contur, care descriu dependența dintre presiune, grosimea semifabricatului și gradul de deformare pentru materiale caracterizate prin constantele de material, în mai multe ipoteze de calcul. De asemenea a fost elaborată o metodologie de calcul a grosimii curente a semifabricatului după deformare.

Cercetările experimentale au vizat în principal următoarele obiective : validarea ipotezei de formă de calotă sferică a pieselor obținute prin deformare plastică hidraulică liberă a plăcilor circulare încastrate pe contur, determinarea experimentală a relației dintre presiune, grad de deformare și grosimea semifabricatului precum și determinarea a grosimii curente a semifabricatului deformat. Rezultatele experimentale au confirmat ipotezele de calcul teoretic formulate .

## CUPRINS

<b>Introducere</b> .....	9
<b>Capitolul 1 - Definierea și clasificarea procedeelor de prelucrare prin deformare plastică hidraulică (DPH) a pieselor cu pereți subțiri</b> .....	<b>13</b>
1.1. Generalități .....	13
1.2. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor .....	14
1.2.1. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune interioară.....	14
1.2.2. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune exterioară.....	19
1.2.3. Probleme specifice procedeelor de deformare plastică hidraulică a tuburilor .....	20
1.2.3.1. Determinarea proprietăților materialului .....	20
1.2.3.2. Alegerea lubrificației .....	21
1.2.3.3. Alegerea utilajului.....	22
1.2.4. Domenii prioritare de aplicabilitate a procedeelor de deformare plastică hidraulică a pieselor tubulare.....	26
1.3. Deformarea plastică hidraulică a tablelor .....	28
1.3.1. Deformarea hidraulică a tablelor prin presiune înaltă .....	28
1.3.1.1. Deformarea plastică hidraulică a plăcilor simple .....	28
1.3.1.1.1. Etape caracteristice din proces .....	28
1.3.1.1.2. Deformarea hidraulică a perechilor de plăci .....	31
1.3.2. Ambutisarea adâncă hidromecanică .....	33
1.3.3. Domenii prioritare de aplicabilitate a procedeelor de deformare plastică hidraulică a tablelor .....	39
1.4. Procede speciale de deformare plastică hidraulică a tablelor. Deformarea plastică hidraulică a tablelor la temperaturi ridicate .....	40
1.4.1. Deformarea plastică hidraulică la cald cu presiune înaltă a plăcilor .	41
1.4.2. Ambutisarea adâncă hidromecanică la cald a plăcilor.....	42
1.5. Perspective de dezvoltare a tehnologiilor de deformare plastică hidraulică (DPH) .....	43
1.6. Concluzii.....	44
<b>Capitolul 2 - Noțiuni generale privind deformarea plastică a metalelor</b> ....	<b>48</b>
2.1. Generalități .....	48
2.2. Starea de tensiune a materialelor .....	48
2.3. Starea de deformare a materialelor .....	52
2.4. Legile de bază ale deformării plastice .....	55
2.5. Criterii de plasticitate.....	60
2.5.1. Criterii de plasticitate izotrope .....	61
2.5.2. Criterii de plasticitate anizotrope .....	65
2.6. Concluzii.....	68
<b>Capitolul 3. Cercetări teoretice cu privire la deformarea plastică cu deformații mari a unei membrane (plăci subțiri) sub acțiunea presiunii hidraulice</b> .....	<b>70</b>
3.1. Elemente comparative referitoare la ambutisarea clasică și deformarea hidraulică a plăcilor subțiri.....	70

## 6 Cuprins

---

3.2. Descrierea analitică a tensiunilor și deformațiilor plăcilor circulare subțiri încastrate pe contur supuse unor presiuni hidraulice la solicitarea în domeniul plastic cu deformații mari .....	78
3.2.1. Considerații generale.....	78
3.2.2. Aplicarea teoriei deformațiilor plastice mari pentru o placă circulară subțire încastrată pe contur supusă unei presiuni hidraulice la deformare liberă .....	80
3.2.3. Rezolvarea analitică a problemei tensiunilor și deformațiilor în ipoteza unei forme de calotă sferică a plăcii deformate .....	85
3.3 Optimizarea calculului presiunii necesare deformării .....	94
3.4. Determinarea variației grosimii piesei deformate în funcție de rază.....	107
3.5. Concluzii.....	114
<b>Capitolul 4 - Cercetări experimentale privind deformarea plastică hidraulică plăcilor subțiri încastrate pe contur.....</b>	<b>116</b>
4.1. Generalități.....	116
4.2. Cercetări experimentale privind deformarea plastică hidraulică a plăcilor subțiri încastrate pe contur .....	116
4.2.1. Descrierea instalației experimentale pentru studiul deformării plastice hidraulice a plăcilor subțiri încastrate pe contur .....	116
4.2.2. Probleme specifice instalației experimentale.....	119
4.2.2.1. Asigurarea etanșeității.....	119
4.2.2.2. Strângerea semifabricatului. Calculul șuruburilor .....	126
4.2.3. Pregătirea semifabricatului în vederea încercării .....	129
4.2.4. Încercări pentru validarea ipotezei formei de calotă sferică a semifabricatului în timpul deformării .....	130
4.2.5. Determinarea experimentală a presiunii necesare deformării libere a semifabricatului .....	135
4.2.6. Determinarea experimentală a grosimii curente $h$ a piesei deformate ...	138
4.3. Concluzii.....	142
<b>Capitolul 5 – Concluzii și contribuții personale.....</b>	<b>145</b>
5.1. Concluzii.....	145
5.1.1. Concluzii cu privire la definirea și clasificarea procedeelor de deformare plastică hidraulică (DPH) a pieselor cu pereți subțiri .....	145
5.1.2. Concluzii cu privire la unele aspecte teoretice generale referitoare la fenomenele care apar în timpul procedeelor de deformare plastică a metalelor .....	146
5.1.3. Concluzii referitoare la cercetările teoretice efectuate pentru descrierea fenomenului de deformare plastică cu deformații mari a unei membrane (plăci subțiri) sub acțiunea presiunii hidraulice.....	146
5.1.4. Concluzii cu privire la cercetări experimentale privind deformarea plastică hidraulică a plăcilor .....	147
5.2. Contribuții personale .....	148
<b>Anexe</b>	
Anexa1. Secvențe de program Mathcad de calcul a presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza ecrusării materialului semifabricatului .....	150
Anexa2. Secvențe de program Mathcad de calcul a presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza deformării unui disc.....	155

---

Anexa3. Secvențe de program Mathcad de calcul a presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza asimilării discului semifabricat cu o suprafață pătrată echivalentă .....	160
Anexa4. Secvențe de program Mathcad de calcul a variației grosimii relative și a grosimii curente a piesei deformate în funcție de rază.....	165
Anexa5. Secvențe de program Mathcad pentru calculul profilului teoretic al secțiunii transversale prin calota sferică.....	178
<b>Bibliografie</b> .....	183





## INTRODUCERE

Metodele și procedeele de fabricare a produselor din construcția de mașini și aparate prin deformări plastice ocupă un volum de peste 35% din producția globală [9]. Mai mult decât atât, tendința este de a îmbunătăți acest procentaj în dauna altor metode de fabricare a produselor materiale (turnare, sudare, prelucrări mecanice etc.). Această tendință se consideră firească dacă se are în vedere avantajele incontestabile pe care le prezintă realizarea procedeelelor prin deformări plastice:

- proprietăți fizico-mecanice superioare față de starea turnată sau sudată;
- realizarea de produse la dimensiuni și calitate a suprafețelor cerute de desenul de execuție fără a necesita alte operații de prelucrare (de exemplu mecanice);
- productivitate ridicată;
- economie de materiale și manoperă;
- costuri mai reduse pe produs;
- condiții de muncă superioare;
- tehnologii mai puțin poluante

În cadrul multiplelor metode de prelucrare prin deformare plastică (la cald sau la rece), o pondere din ce în ce mai mare a obținut-o metoda de deformare plastică la rece a tablelor subțiri.

Datorită unor restricții ce țin în principal de libertatea proiectării formei pieselor, de tehnologia de execuție în sine care presupune pentru o singură fază a unui proces de deformare două scule conjugate rigide (poansonul și placa activă), de dimensiunile și precizia de prelucrare a pieselor, de volumul producției, de caracteristicile mecanice și tehnologice ale materialului semifabricatului, procedeele clasice de deformare plastică la rece se dovedesc a fi uneori nesatisfăcătoare și neeficiente, iar uneori chiar imposibil de aplicat. Ca urmare a acestor restricții au fost concepute diferite procedee speciale de deformare plastică la rece în mod special în domeniul ambutisării. Dintre acestea unele s-au extins la scară industrială în producția de serie sau masă iar altele sunt în stare de cercetare și dezvoltare sau sunt folosite la serii mici de piese sau chiar la unicate. Principalele procedee speciale de ambutisare [5] care diferă de cele clasice prin lipsa uneia dintre scule (poansonul sau placa activă) ca piesă rigidă și care au început să se dezvolte sunt:

- ambutisarea cu matrițe de plumb;
- ambutisarea cu matrițe de cauciuc;
- ambutisarea cu energii și viteze mari;
- ambutisarea hidraulică.

Tehnologia de deformare plastică la rece a unor piese cu pereți subțiri sub acțiunea presiunii hidraulice a unui lichid (denumită anterior ambutisare hidraulică) a început să fie cercetată și utilizată în urmă cu aproximativ 50 de ani, și este într-o continuă dezvoltare. Dinamica pronunțată a dezvoltării acestei tehnologii face ca atât definirea cât și clasificările actuale ale acestei tehnologii să fie abordate în mod diferit de diverși autori.

Într-o primă definiție se poate spune că prelucrarea de deformare plastică sub acțiunea presiunii hidraulice constă în aceea că pe semifabricatul plan, cav sau tubular acționează direct sau prin intermediul unei diafragme elastice (din cauciuc) un lichid cu presiune ridicată care deformează semifabricatul dându-i forma piesei active a dispozitivului de deformare.

**Principala caracteristică a tehnologiei de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri care o diferențiază față de alte procedee din punct de vedere al fenomenului de deformare este aceea că pe toată durata desfășurării fenomenului de deformare presiunea care acționează asupra semifabricatului este constantă pe toată suprafața acestuia.**

**Datorită faptului că tehnologia de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri este o tehnologie relativ nouă, referirile legate de această tehnologie în literatura de specialitate sunt destul de puține, relativ dispersate și în general nu sunt făcute publice de către marile companii care dezvoltă cercetări în acest domeniu. Situația prezentată mai sus justifică, chiar și impune, abordarea unor cercetări legate de deformarea plastică la rece sub acțiunea unei presiuni hidraulice a semifabricatelor cu pereți subțiri.**

Astfel, în această teză de doctorat pe care am intitulat-o „Cercetări teoretice și experimentale privind deformarea plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri” am realizat o sinteză a problemelor legate de tehnologiile de execuție a pieselor cu pereți subțiri și am abordat preponderent cercetări teoretice și experimentale privind fenomenul deformării plastice hidraulice a pieselor de tip placă.

Teza de doctorat a fost structurată pe 5 capitole, dezvoltându-se pe 197 de pagini și conținând 195 relații de calcul, 73 figuri, 14 tabele și 5 anexe care prezintă programele de calcul utilizate pentru rezolvarea calculelor numerice scrise în limbajul Mathcad 2001 Profesional. Deasemenea sunt prezentate 70 referințe bibliografice.

**Capitolul 1** intitulat „Definirea și clasificarea procedeelelor de prelucrare prin deformare plastică hidraulică (DPH) a pieselor cu pereți subțiri” face o descriere unitară a procedeelelor tehnologice de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri prezentând o clasificare a procedeelelor, problemele specifice acestor procedee, precum și domeniile prioritare de aplicabilitate ale acestora.

**Capitolul 2** intitulat „Noțiuni generale privind deformarea plastică a metalelor” face o trecere în revistă a stării de tensiune și deformare a corpurilor solicitate în domeniul plastic precum și o descriere a legilor care guvernează deformarea plastică a metalelor. Datele prezentate în acest capitol sunt necesare pentru studiul cazului particular al deformării plastice hidraulice a pieselor cu pereți subțiri.

**Capitolul 3** este intitulat „Cercetări teoretice cu privire la deformarea plastică cu deformații mari a unei membrane (plăci subțiri) sub acțiunea presiunii hidraulice”.

În prima parte a acestui capitol am prezentat elemente comparative între ambutisarea clasică și deformarea plastică hidraulică a plăcilor subțiri și am tratat comparativ starea de tensiune și deformație a plăcilor subțiri în cazul ambutisării clasice și în cazul supunerii acestora la o presiune hidraulică până la inițierea deformărilor plastice.

În continuare am făcut o descriere analitică a tensiunilor și deformațiilor plăcilor circulare subțiri încastrate pe contur supuse unor presiuni hidraulice la solicitarea în domeniul plastic cu deformații mari.

**Am determinat o expresie originală (3.66) de calcul a presiunii de deformare care descrie dependența dintre presiune, grosimea semifabricatului și înălțimea la polul calotei pentru un material caracterizat prin constanta de material  $K$  ce poate fi asimilată cu tensiunea de ecruisare,**

coeficientul de ecruisare  $n$  și coeficientul de anizotropie mediu  $\bar{r}$ , expresie care permite estimarea presiunii necesare pentru obținerea unui anumit grad de deformare plană  $\psi$  (3.76) definit în așa fel încât să descrie gradul de deformare prin punerea în evidență a modificării suprefetei semifabricatului.

În partea de optimizare a calculului presiunii am determinat două relații originale de calcul a presiunii necesare deformării (3.79 și 3.90) ținând seama doar de energia hidraulică transmisă semifabricatului de către fluidul de lucru și de energia totală minimă de deformare corespunzătoare volumului de material al semifabricatului, în două ipoteze de calcul: cazul transformării unui semifabricat în formă de disc într-o piesă de formă de calotă sferică și cel al deformării unei plăci pătrate echivalente (Fig.3.16) de aceeași grosime și suprafață cu cea a discului, prin modificarea uneia dintre dimensiuni, până când suprafața plăcii pătrate alungite devine egală cu suprafața calotei sferice obținute din disc.

În ultima parte a capitolului am elaborat o metodologie originală de calcul a grosimii curente a semifabricatului după deformare.

Pentru toate calculele și reprezentările grafice din cadrul acestui capitol am elaborat programe de calcul prezentate în anexele de la sfârșitul lucrării.

În final am prezentat o scurtă sinteză a problemelor abordate acest capitol.

**Capitolul 4** – intitulat “Cercetări experimentale privind deformarea plastică hidraulică a plăcilor subțiri încastrate pe contur” are ca obiectiv principal validarea rezultatelor teoretice obținute în capitolul 3.

În prima parte a capitolului am făcut o descriere a instalației experimentale pe care am proiectat-o și executat-o în totalitate, cu enunțarea și rezolvarea unor probleme specifice care au apărut la proiectarea și executarea acesteia..

**Principalele obiective urmărite în cadrul acestui capitol au fost: validarea ipotezei de formă sferică a pieselor obținute prin deformare plastică hidraulică liberă a plăcilor circulare încastrate pe contur, determinarea experimentală a relației dintre presiune, grad de deformare și grosimea semifabricatului și compararea acesteia cu rezultatele teoretice. În final am făcut determinarea experimentală a grosimii curente a semifabricatului deformat și am comparat aceste rezultate cu cele obținute teoretic. Rezultatele experimentale au confirmat ipotezele de calcul teoretic formulate în capitolul 3.**

În final am prezentat o scurtă sinteză a problemelor abordate acest capitol.

**Capitolul 5** – intitulat „Concluzii și contribuții personale” cuprinde o sinteză a problemelor tratate în lucrare cu evidențierea contribuției personale a autorului.

În ultima parte a lucrării, Anexe, am prezentat principalele secvențe de programe de calcul numeric utilizate în cadrul lucrării.

În finalul acestei introduceri doresc să mulțumesc tuturor profesorilor de la Facultatea de Mecanică a Institutului Politehnic din Timișoara care în decursul timpului, cu un deosebit profesionalism, au format și îndrumat generații de specialiști apreciați atât în țară cât și în străinătate, printre care cu modestie mă număr și eu.

Factul că am ajuns în această fază a studiilor postuniversitare se datorează într-o mare măsură regretatului Prof. Dr. ing. Ștefan Rosinger precum și domnului Prof. Dr. ing. Ion Sporea pentru competența și profesionalismul cu care m-au

## 12 Introducere

---

Îndrumat din punct de vedere științific și mi-au inspirat încredere în faptul că voi putea duce la bun sfârșit această lucrare.

De asemenea, mulțumesc colectivului catedrelor de Tehnologia Construcțiilor de Mașini și Tehnologia Materialelor din Facultatea de Mecanică a Universității Politehnica din Timișoara, care m-au îndrumat și sprijinit în perioada stagiului de pregătire a prezentei teze.

Mulțumesc pe această cale colegilor și prietenilor de la S.C. Feroneria S.A. Arad care mi-au acordat un ajutor prețios în realizarea instalației experimentale.

De asemenea, mulțumesc colegilor de la Facultatea de Inginerie a Universității „Aurel Vlaicu” din Arad care prin sfaturile lor utile m-au susținut în finalizarea prezentei teze.

Mulțumesc soției și fiicei mele pentru înțelegere și sprijin în elaborarea prezentei teze.

Mulțumesc Bunului Dumnezeu care mi-a dat putere și sănătate fără ajutorul căruia nu se poate face nimic.

# CAPITOLUL 1

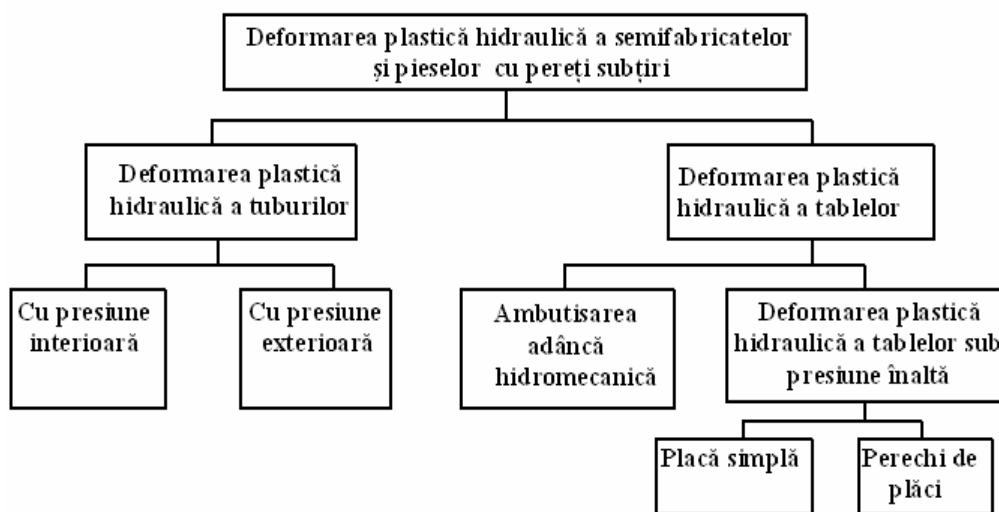
## DEFINIREA ȘI CLASIFICAREA PROCEDEELOR DE PRELUCRARE PRIN DEFORMARE PLASTICĂ HIDRAULICĂ (DPH) A PIESELOR CU PEREȚI SUBȚIRI

### 1.1. Generalități

Deformarea plastică la rece a tablelor subțiri se execută printr-o varietate de procedee, unul dintre acestea fiind și procedeul de deformare plastică hidraulică (DPH).

Prin definiție, deformarea plastică hidraulică se consideră a fi un procedeu de prelucrare prin deformare plastică la rece a pieselor cu pereți subțiri prin care acestea își modifică forma și dimensiunile, la volum constant, datorită acțiunii unui fluid de lucru sub presiune ce acționează asupra lor, obligându-le să ia forma cavității matriței în care sunt așezate [38,45].

Odată cu diversificarea procedeelelor de prelucrare prin DPH a pieselor cu pereți subțiri s-a impus și o nouă abordare din punct de vedere a clasificării acestor procedee. O astfel de clasificare cu un caracter mult mai cuprinzător este prezentată în Fig.1.1. [18 ]



**Fig.1.1. Clasificarea procedeelelor de prelucrare prin DPH a pieselor cu pereți subțiri**

După cum se observă din Fig.1.1, primul criteriu după care se face diferențierea procedeelelor de prelucrare prin DPH este forma inițială a semifabricatului, având astfel două procedee distincte: deformarea plastică hidraulică a tuburilor și deformarea plastică hidraulică a tablelor.

Deformarea plastică hidraulică a tuburilor poate fi efectuată supunând tubul la presiune interioară sau presiune exterioară.

În continuare, deformarea plastică hidraulică a tablelor este divizată în două procedee distincte și anume: ambutisarea adâncă hidromecanică și deformarea plastică hidraulică a tablelor sub presiune înaltă. Ultimul procedeu poate fi aplicat unei singure plăci sau unei perechi de plăci, în acest caz presiunea fiind aplicată între ele.

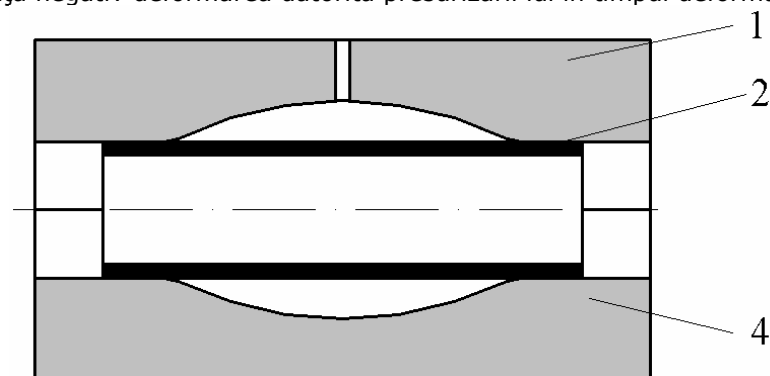
## **1.2. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor**

Deformarea plastică hidraulică a tuburilor (semifabricatul este de formă tubulară) destinată fabricării pieselor tubulare constă în aceea că deformarea se produce ca urmare a presiunii exercitate în interiorul sau exteriorul tubului semifabricat, suprafața cilindrică a acestuia luând forma plăcii active dispuse corespunzător în exteriorul respectiv interiorul semifabricatului.

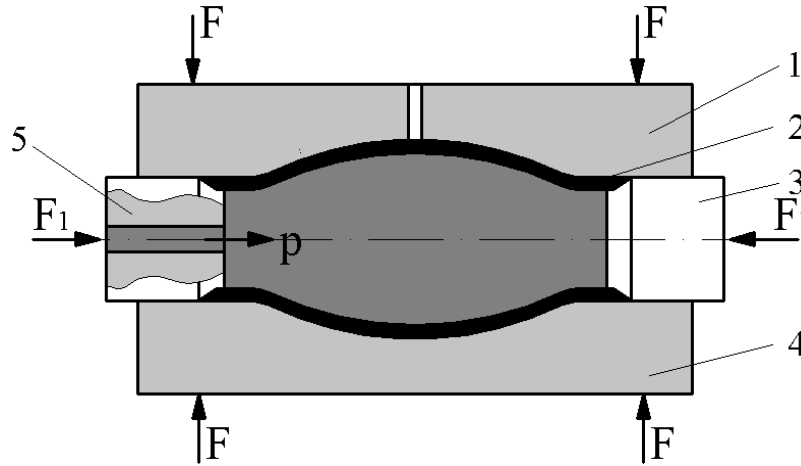
### **1.2.1. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune interioară**

Deformarea plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune interioară este prezentată în Fig.1.2 și, principial, procedeul se desfășoară astfel: tubul semifabricat 2 este dispus între două plăci active 1 și 4, (Fig.1.2.a), după care cu ajutorul poansoanelor 3 și 5, (Fig.1.2.b), semifabricatul este comprimat în spațiul dintre cele două plăci active prin aplicarea forțelor  $F_1$  asupra poansoanelor. Simultan cu aplicarea forțelor  $F_1$  în interiorul tubului este introdus un lichid sub presiune  $p$  care produce deformarea plastică hidraulică propriu-zisă. În timpul procesului de deformare, plăcile active sunt strânse prin aplicarea forțelor  $F$ . Forma poansoanelor în zona de contact cu tubul semifabricat este realizată în așa fel încât să asigure etanșarea interioară a tubului. Introducerea lichidului sub presiune în spațiul din interiorul tubului trebuie să fie făcută corelat cu deplasarea axială a poansoanelor. În cazul presurizării tubului fără o deplasare axială a poansoanelor se poate pierde contactul dintre acestea și tub ceea ce ar putea duce la pierderea etanșeității interiorului semifabricatului. De asemenea, dacă se face comprimarea axială a tubului fără presurizarea interiorului acestuia pot apărea deformări necontrolate (încrețiri) ale semifabricatului [16].

Spațiul dintre tubul semifabricat nedeformat și plăcile active este pus în legătură cu atmosfera pentru a permite evacuarea aerului din acest spațiu, aer ce ar putea influența negativ deformarea datorită presurizării lui în timpul deformării.



**a) dispunerea semifabricatului**



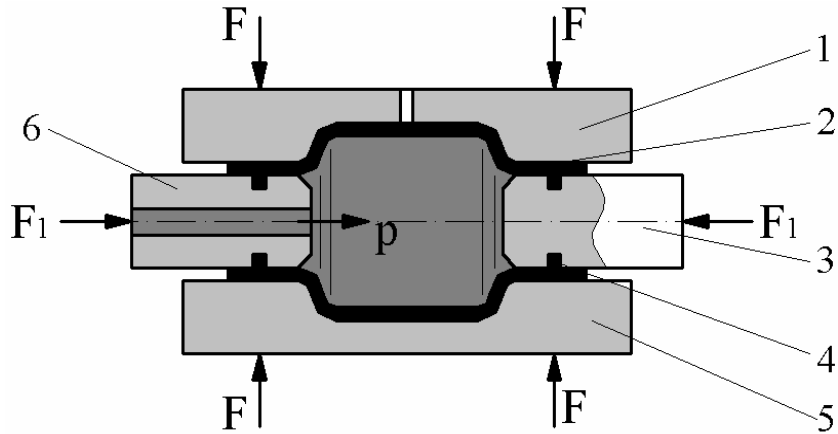
b) tubul deformat

**Fig.1.2. Deformarea plastică hidraulică a tubului supus la presiune interioară**

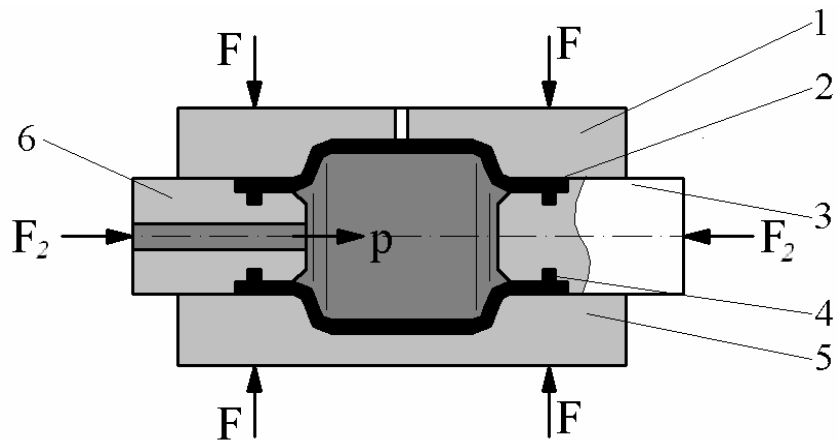
Din punct de vedere tehnologic, deformarea plastică hidraulică a tuburilor cu presiune interioară se poate realiza fără aport suplimentar controlat de material în zona de deformare sau cu aport suplimentar de material în zona de deformare prin scurtarea controlată a semifabricatului.

În cazul deformării plastice hidraulice fără aport suplimentar controlat de material în zona de deformare (Fig.1.3.a) poanșoanele 3 și 6 asigură etanșarea dintre ele și semifabricatul 2 prin intermediul garniturilor de etanșare 4. Presurizarea interiorului tubului cu presiunea  $p$  se face de la o sursă exterioară de presiune. În timpul deformării poanșoanele 3 și 5 sunt menținute fixe cu ajutorul forțelor  $F_1$  care au ca efect echilibrarea forțelor de presiune care ar conduce la ieșirea poanșoanelor din interiorul tubului semifabricat. În timpul deformării se produce o scurtare a semifabricatului dar aceasta nu este controlată. Datorită acestui fapt lungimea semifabricatului trebuie să fie suficient de mare astfel încât și după finalizarea procesului de deformare să nu se piardă etanșarea dintre tub și elementele de etanșare ale poansonului.

În cazul deformării plastice hidraulice cu aport suplimentar controlat de material în zona de deformare (Fig.1.3.b) poanșoanele 3 și 6 asigură etanșarea dintre ele și semifabricatul 2 prin intermediul garniturilor de etanșare 4. Aportul suplimentar de material în zona de deformare se face prin deplasarea axială controlată a poanșoanelor 3 și 6 produsă de forța  $F_2$  care compensează atât forța de presiune din interiorul semifabricatului cât și forța de rezistență datorată comprimării tubului semifabricat. Poanșoanele, prin forma zonei frontale care prezintă un guler, produc scurtarea tubului semifabricat. Presurizarea interiorului tubului cu presiunea  $p$  se face de la o sursă exterioară de presiune. În timpul procesului de deformare în cazul ambelor situații menționate anterior plăcile active 1 și 5 sunt strânse prin aplicarea forțelor  $F$ .



a) deformarea plastică hidraulică a tuburilor cu presiune interioară fără aport suplimentar controlat de material în zona de deformare



b) deformarea plastică hidraulică a tuburilor cu presiune interioară cu aport suplimentar controlat de material în zona de deformare

**Fig.1.3. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor cu presiune interioară fără aport suplimentar controlat de material în zona de deformare și cu aport suplimentar controlat de material în zona de deformare**

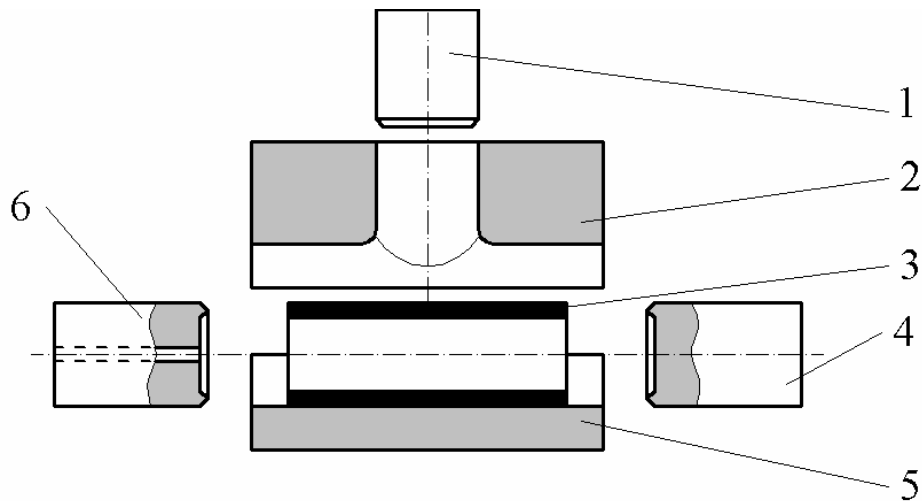
Pentru punerea în evidență a secvențelor unui proces de deformare plastică hidraulică a tuburilor, în Fig.1.4 este exemplificată tehnologia de execuție a unei piese tubulare în formă de "T".



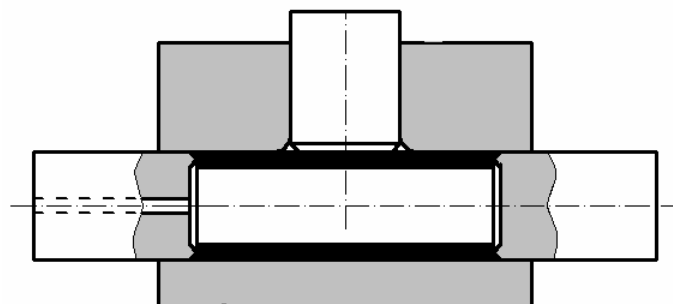
Principalele secvențe ale acestui procedeu sunt următoarele:

- a) amplasarea tubului semifabricat (Fig.1.4.a)
- b) închiderea sculei (Fig.1.4.b)
- c) comprimarea axială a tubului concomitent cu menținerea unei presiuni interioare corespunzătoare (presarea axială și presiunea interioară trebuie să fie corelate optim pentru a evita defectele de orice fel, precum spargerea sau încrețirea piesei finite). (Fig.1.4.c)
- d) extragerea piesei finite (Fig.1.4.d)

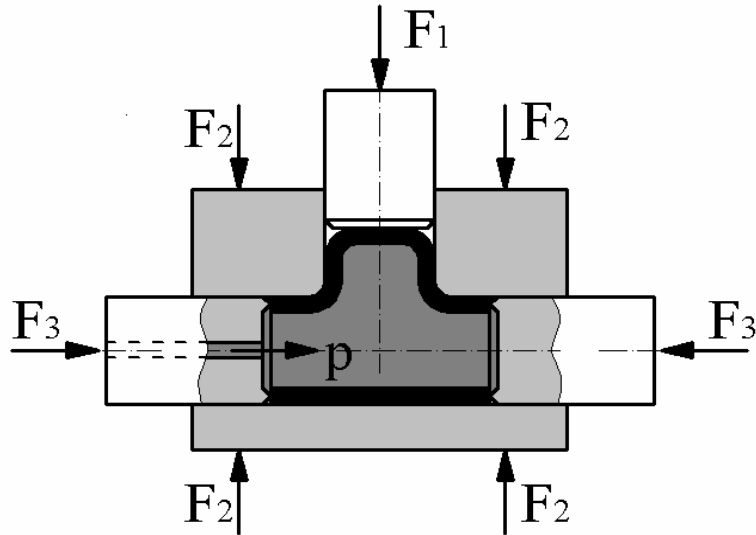
Specific pentru piesele de acest tip, în afara elementelor principale ale sculei de deformare (placa activă superioară 2, placa activă inferioară 5 și poansoanele 4 și 6), apare poansonul 1 care asigură o contrapresiune pe zona de deformare principală în vederea realizării unei deformări cât mai corecte a semifabricatului 3.



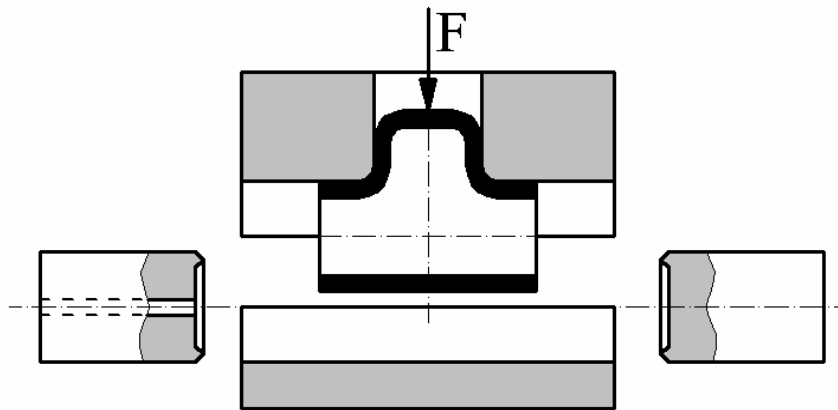
**a) amplasarea tubului semifabricat**



**b) închiderea sculei**



c) comprimarea axială și presurizarea tubului



d) extragerea piesei finite

**Fig.1.4. Tehnologia de execuție a unei piese tubulare în formă de "T" (reprezentare schematică)**

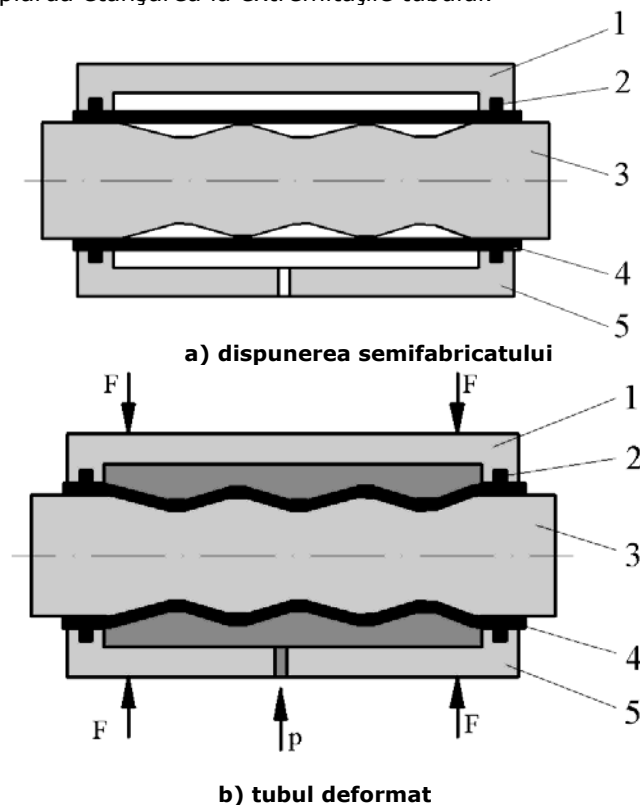
Procesul de deformare plastică hidraulică a tuburilor este influențat în principal de următorii factori:

- parametri tubului semifabricat (lungime, diametru, grosimea peretelui, caracteristicile mecanice și tehnologice ale materialului).
- parametri procesului (forța și viteza de avans a apăsării axiale, presiunea internă)

- limitele tehnologice ale procesului (flambajul semifabricatului, fisurarea-spargerea, încrețirea)
- influența sculei (forma, rugozitatea suprafeței, duritatea suprafeței, caracteristicile frecării între sculă și semifabricat)

### 1.2.2. Deformarea plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune exterioară

Deformarea plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune exterioară este prezentată în Fig.1.5 și principial, se desfășoară astfel: în interiorul tubului semifabricat 4 se dispune placa activă 3 realizată constructiv din elemente modulare astfel încât după deformarea semifabricatului aceasta să poată fi extrasă din interiorul tubului semifabricat 4. Pe exteriorul tubului sunt dispuse două elemente 1 și 5 care realizează etanșarea spațiului dintre tub și aceste elemente cu ajutorul garniturilor de etanșare 2. Operația de deformare propriu-zisă se desfășoară astfel: simultan cu strângerea elementelor 1 și 5, pe exteriorul tubului, prin orificiul executat în elementul 5 se introduce un lichid sub presiune care produce deformarea semifabricatului. În timpul procesului de deformare este posibil să apară o deplasare axială a extremităților semifabricatului (scurtarea), motiv pentru care lungimea inițială a acestuia trebuie să fie suficient de mare astfel încât, după o eventuală scurtare, să nu se piardă etanșarea la extremitățile tubului.



**Fig.1.5. Deformarea plastică hidraulică a tubului supus la presiune exterioară**

### 1.2.3. Probleme specifice procedeelor de deformare plastică hidraulică a tuburilor

Pentru realizarea cu succes a unor deformări plastice hidraulice a pieselor tubulare este necesară asigurarea unor condiții tehnologice atât din punct de vedere al semifabricatului cât și din punct de vedere al utilajului și tehnologiei propriu-zise.

#### 1.2.3.1. Determinarea proprietăților materialului

Întrucât la deformarea plastică hidraulică a tuburilor condițiile de solicitare a materialului semifabricatului sunt relativ complexe, existând de obicei o solicitare de întindere longitudinală și deformare radială, ERC/NSM (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) și [45] recomandă pentru determinarea proprietăților materialului tubului o testare prin introducerea unei presiuni interne în semifabricat (umflare, "bulge test"). Schema testului de umflare pentru materiale tubulare este prezentată în Fig.1.6. și Fig.1.7

**a) Testul de umflare cu comprimarea materialului semifabricatului** (Fig.1.6.) constă din introducerea unui fluid sub presiune  $p$  în interiorul tubului concomitent cu comprimarea axială a semifabricatului sub acțiunea forței  $F_1$  care compensează și forța ce se exercită asupra poansonelor datorită presiunii  $p$ , etanșarea asigurându-se prin forma suprafețelor frontale ale plunjerelor care realizează comprimarea cât și prin existența unor elemente de etanșare nemetalice. În timpul procesului de deformare se face măsurarea continuă a zonei deformată a semifabricatului până la spargere.

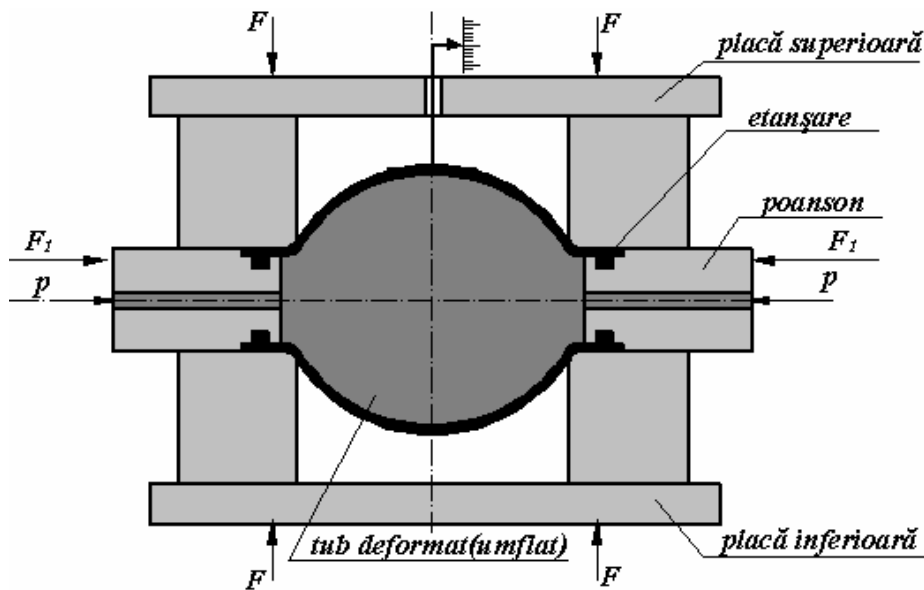
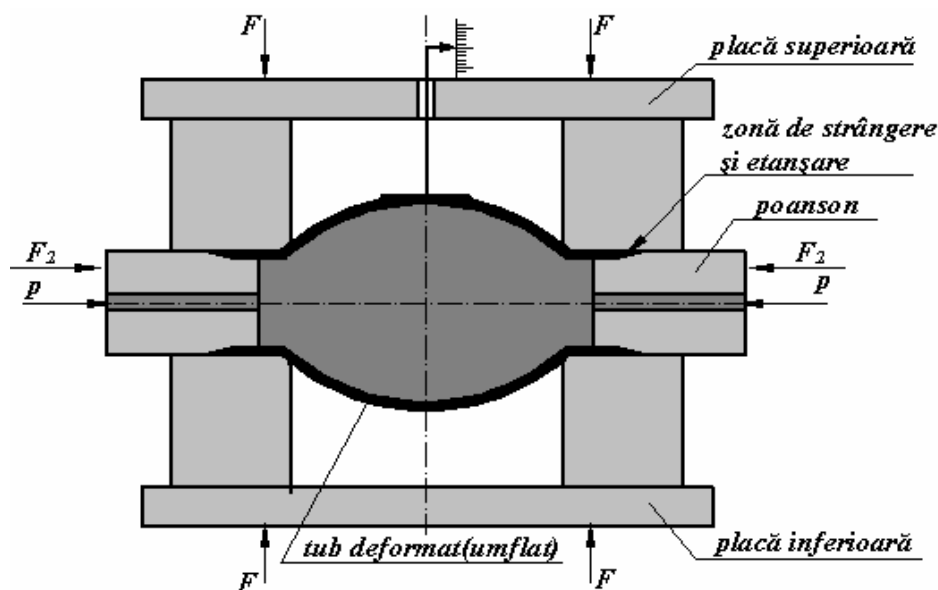


Fig.1.6. Testul de umflare a semifabricatului tubular cu comprimarea tubului

**b) Testul de umflare fără comprimarea materialului semifabricatului** (Fig.1.7) se efectuează similar cu testul anterior, singura deosebire fiind aceea că nu se realizează o comprimare axială, etanșarea asigurându-se prin intermediul formei

conice a poansoanelor în zona de contact cu semifabricatului, formă care asigură o strângere a semifabricatului tubular pe suprafața interioară a dispozitivului, strângere care trebuie să fie realizată în așa fel încât să fie împiedicată deplasarea axială a extremităților tubului. În timpul deformării poansoanele rămân fixe datorită forțelor  $F_2$  care se opun forțelor de presiune, aceste forțe putând avea ca efect ieșirea poansoanelor din interiorul tubului.



**Fig.1.7. Testul de umflare a semifabricatului tubular fără comprimarea tubului**

Datorită faptului că la testul de umflare cu comprimarea materialului deformarea semifabricatului se produce în principal pe seama creșterii diametrului tubului semifabricat în zona de deformare, deformările longitudinale ale tubului semifabricat fiind compensate de aportul suplimentar controlat de material în zona deformării prin comprimarea semifabricatului, spargerea semifabricatului supus testului se produce la o deformare radială mai mare decât în cazul testului de umflare fără comprimarea materialului. Aceasta, deoarece, în varianta a doua deformarea se produce atât prin creșterea diametrului tubului semifabricat cât și prin întinderi longitudinale, ceea ce are ca efect o reducere mai pronunțată a grosimii pereților semifabricatului și implicit o spargere mai precoce a acestuia.

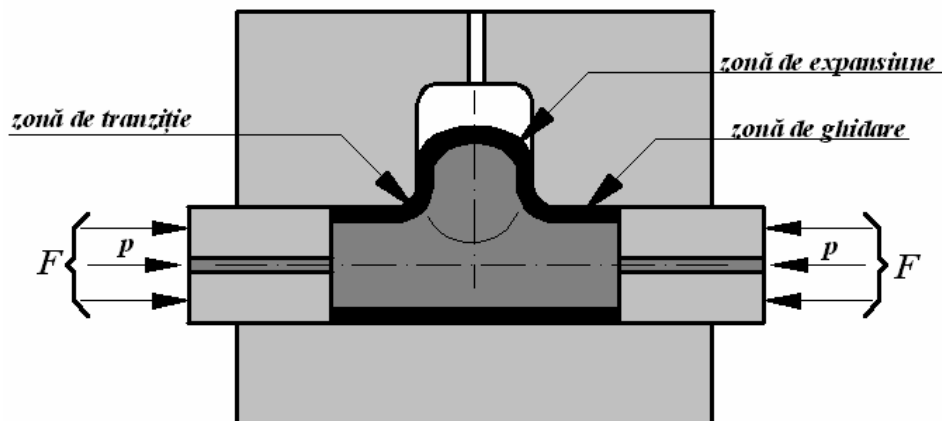
### 1.2.3.2. Alegerea lubrificației

În timpul procesului tehnologic de deformare plastică hidraulică a pieselor tubulare sunt situații în care există mișcări relative între semifabricat și matrită. Aceste mișcări pot avea drept consecințe deteriorări ale suprafețelor semifabricatului mergând chiar până la gripări, precum și majorări substanțiale ale forțelor necesare procesului de deformare. Acest fapt duce la necesitatea asigurării unei ungeri corespunzătoare specifice condițiilor impuse de contactul semifabricat-matrită [41, 44].

În Fig.1.8. este prezentat un exemplu de deformare plastică hidraulică în care sunt puse în evidență mai multe zone cu caracteristici de frecare diferite.

În zona de ghidare, caracteristicile frecării sunt influențate pe lângă caracteristicile geometrice ale tubului semifabricat și matriță și de către forța suplimentară de apăsare dintre tubul semifabricat și matriță datorită presiunii interne.

În zona de tranziție, unde apar cele mai pronunțate deformări ale materialului, este necesară o lubrifiere mai bună, datorită faptului că această zonă asigură în mod preponderent realizarea formei finale a piesei.



**Fig.1.8. Zone de frecare în deformarea hidraulică**

În zona de deformare liberă a semifabricatului, practic nu există deplasări relative dintre semifabricat și matriță, astfel încât nu se impun condiții speciale de ungere. Ungerea zonelor de contact dintre semifabricat și matriță poate fi influențată și de către fluidul de lucru. De aceea alegerea fluidului de lucru este o problemă foarte importantă în DPH.

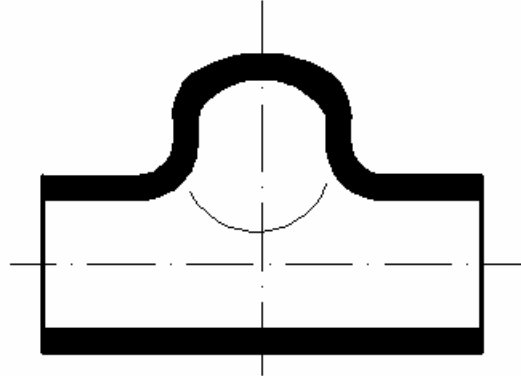
Fluidele de lucru utilizate în procesul deformării hidraulice sunt de o varietate destul de mare, începând de la uleiuri minerale, până la apă tratată în mod corespunzător pentru evitarea fenomenului de coroziune chimică și asigurarea unei ungeri corespunzătoare.

### 1.2.3.3. Alegerea utilajului

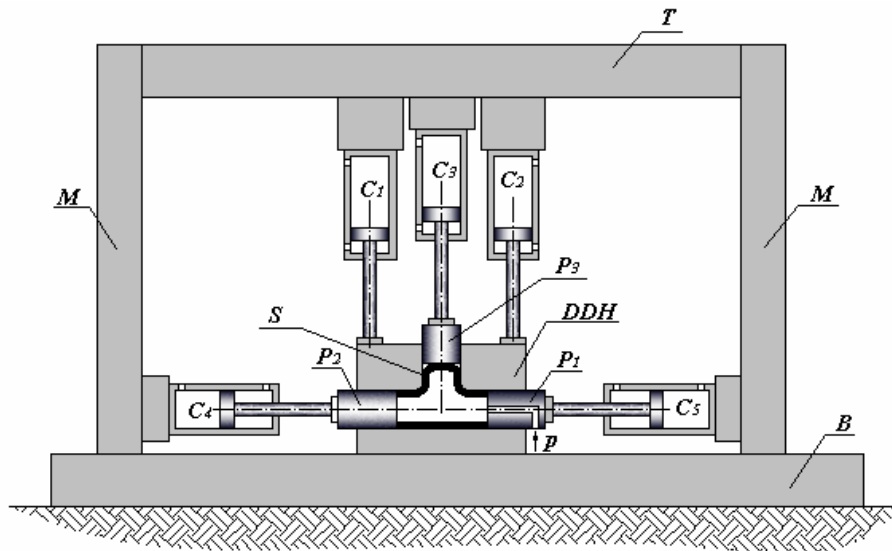
Construcția utilajelor folosite pentru realizarea pieselor tubulare prin deformare plastică hidraulică este determinată de forma, dimensiunile și caracteristicile materialului pieselor care urmează a fi realizate. Pentru exemplificare, în continuare se prezintă o schemă constructivă a unui utilaj (Fig.1.10) cu ajutorul căruia se pot realiza piese de forma prezentată în Fig.1.9, urmînd succesiunea operațiilor prezentată în Fig.1.4.

Acest utilaj, (Fig.1.10.) este constituit dintr-o presă hidraulică cu funcții multiple. Principalele părți componente sunt batiul  $B$  pe care sunt fixați doi montanți laterali  $M$  ce sunt rigidizați în partea superioară de o traversă  $T$ . Pe batiu este fixat dispozitivul de deformare hidrostatică  $DDH$ . Cilindri hidraulici  $C_4$  și  $C_5$  care asigură comprimarea axială a tubului semifabricat sunt fixați pe montanții laterali. Cilindri  $C_1$  și  $C_2$  care rigidizează partea superioară a dispozitivului de deformare sunt fixați pe

traversa  $T$ , traversă pe care este fixat și cilindrul  $C_3$  care are rolul de a realiza contrapresiunea necesară pe zona de deformare.



**Fig.1.9. Formă de piesă ce se poate realiza prin deformarea hidraulică a tuburilor**



**Fig.1.10. Utilaj pentru deformarea hidraulică a tuburilor (schema constructivă)**

Alimentarea cu ulei hidraulic a cilindrilor este realizată în așa fel încât să fie respectată succesiunea fazelor tehnologiei de execuție a piesei, prezentată în Fig.1.4. Această succesiune este realizată prin comanda distribuitorilor instalației hidraulice (Fig.1.11.a) în conformitate cu ciclograma mișcărilor din Fig.1.11.b.

Instalația hidraulică de alimentare a cilindrilor de lucru este alcătuită din patru grupuri independente de pompare și reglare a presiunii, comanda schimbării sensului de mișcare a pistoanelor cilindrilor fiind realizată de către patru distribuitori hidraulice (câte unul pentru fiecare grup). Reglarea vitezei de avans a pistoanelor cilindrilor se face cu ajutorul reguletoarelor de presiune dispuse pe sensul de ieșire din cilindri corespunzătoare cursei active.

24 Definierea și clasificarea procedeelor de prelucrare prin deformare plastică - 1

Necesitatea existenței a patru grupuri independente de pompare, reglare, distribuție a uleiului sub presiune se datorează faptului că fiecare mișcare a cilindrilor trebuie să fie riguros reglată și să fie independentă de celelalte mișcări. Un grup este compus dintr-un filtru  $F$  dispus pe aspirația pompei  $P$ . Pompa este antrenată de către un motor electric  $ME$ . Pe circuitul de ieșire din pompă este dispusă o supapă de presiune  $SP$  cu ajutorul căreia se poate regla presiunea pe circuitul respectiv, presiune care se pune în evidență cu ajutorul manometrului  $M$ . Comanda mișcărilor cilindrilor este realizată de către distribuitorul cu comandă electrică  $DE$  iar reglarea vitezei de avans a cilindrului se face cu ajutorul regulatorului de debit  $Rq$ . Cilindri  $C_1$  și  $C_3$  sunt alimentați de același distribuitor deoarece tijele lor sunt rigidizate mecanic între ele astfel încât mișcărilor lor sunt simultane.

Faza \ Electromagneți	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$e_8$	$e_9$
Presare placă activă superioară	—	—	—	+	—	—	—	—	—
Avans poansoane și presurizare	—	+	—	+	—	—	+	—	+
Retragere poansoane și depresurizare	+	—	+	+	—	—	—	+	—
Ridicare placă activă superioară	+	—	+	—	—	—	—	+	—
Extragere semifabricat	—	—	—	—	—	+	—	—	—
Ridicare cilindru C2	—	—	—	—	+	—	—	—	—

Fig.1.11. b) ciclograma secvențelor de lucru

Fig.1.11. Schema hidraulică și ciclograma secvențelor de lucru ale utilajului de deformare plastică hidraulică a tuburilor



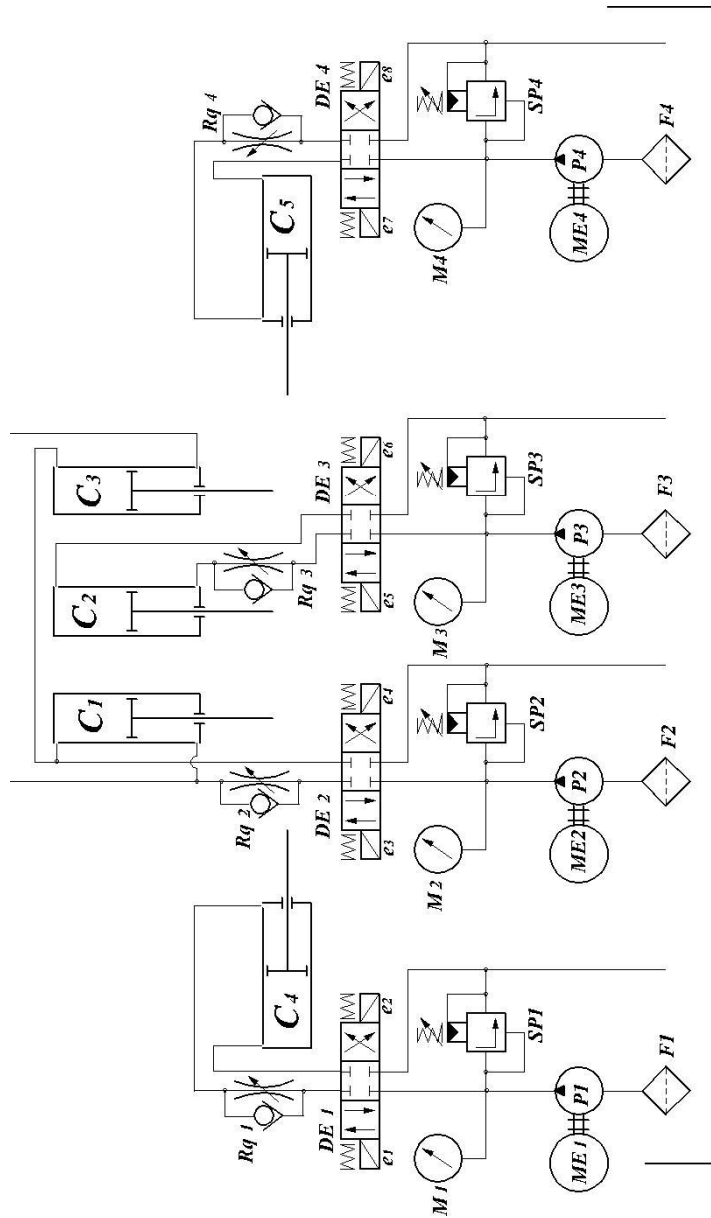
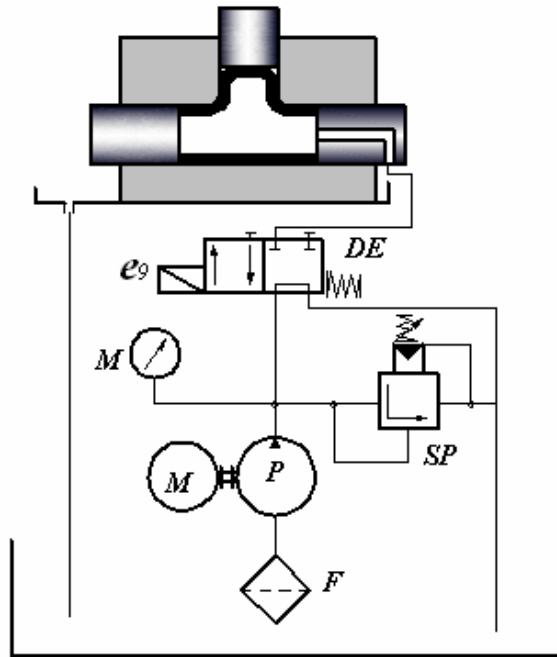


Fig. 1.11 a. Schema hidraulică

Presurizarea interiorului tubului semifabricat este realizată conform schemei din Fig.1.12 de către o sursă independentă de fluid de lucru sub presiune alcătuită dintr-o pompă de înaltă presiune  $P$ , un grup de reglare-măsurare a presiunii compus din supapa  $SP$  și manometrul  $M$  și un distribuitor cu comandă electrică  $DE$  care comandă presurizarea interiorului tubului în fazele de lucru sau deversarea la rezervor a fluidului furnizat de către pompă în fazele intermediare.



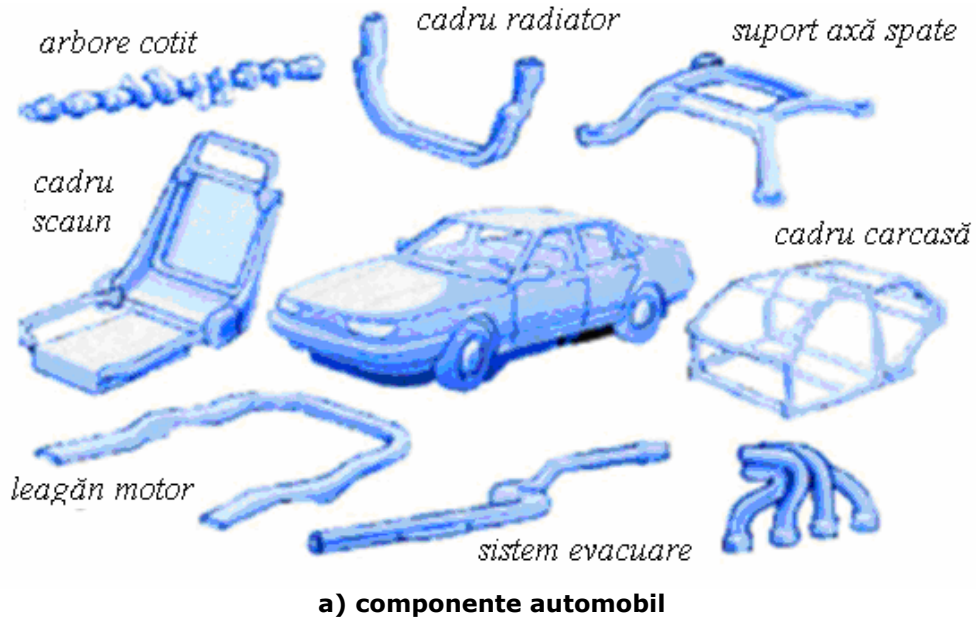
**Fig.1.12. Schema de alimentare cu fluid de lucru**

#### **1.2.4. Domenii prioritare de aplicabilitate a procedeelor de deformare plastică hidraulică a pieselor tubulare**

Domeniul pe care s-a dezvoltat în primă fază tehnologia de execuție prin deformare plastică hidraulică a pieselor tubulare a fost acela al elementelor de racordare sub diverse forme ale conductelor metalice și nemetalice pentru transportul fluidelor (coturi, teuri, mufe etc.)

Odată cu perfecționarea tehnologiilor, domeniul cel mai important în care este utilizată această tehnologie este industria construcțiilor de autovehicule și aeronautică [16,17]. La ora actuală, se realizează prin deformare plastică hidraulică, o varietate foarte mare de piese, începând cu tubulatura de evacuare a gazelor arse, până la elemente ale structurilor de rezistență ale autovehiculelor.

În Fig. 1.13 sunt prezentate exemple de piese tubulare realizate prin deformare plastică hidraulică.



**b) racord de ramificație**



**c) teuri**



**d) tubulatura cadrului de bicicletă**



**e) burdufuri**

**Fig.1.13. Piese tubulare realizate prin deformare plastică hidraulică**

### **1.3. Deformarea plastică hidraulică a tablelor**

Deformarea plastică hidraulică a tablelor (semifabricatul este sub formă de placă plană sau curbă) constă în aceea că deformarea se produce ca urmare a presiunii exercitate pe o parte a semifabricatului sub formă de tablă, suprafața acestuia luând forma plăcii active dispuse corespunzător pe cealaltă parte a semifabricatului.

#### **1.3.1. Deformarea plastică hidraulică a tablelor prin presiune înaltă**

Prin definiție, procedeele de deformare plastică hidraulică prin presiune înaltă a tablelor folosesc ca element activ un fluid de lucru care poate înlocui (în conformitate cu terminologia ambutisării) poansonul sau placa activă. În ultimul timp, pe lângă deformarea plastică hidraulică a plăcilor simple, în scopul măririi productivității, s-a dezvoltat tehnologia de deformare simultană a unei perechi de plăci presiunea hidraulică fiind introdusă între ele, matrițele fiind dispuse de o parte și de alta a perechii de plăci.

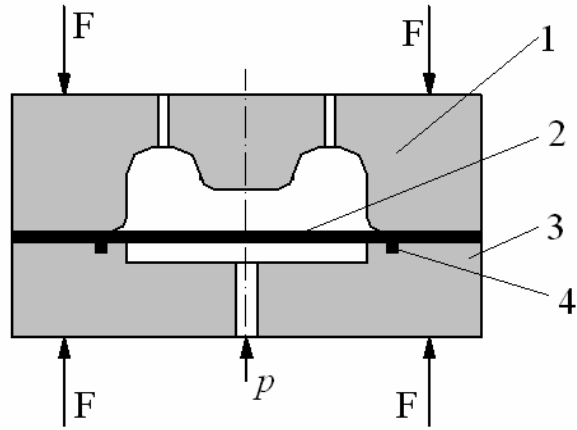
##### **1.3.1.1. Deformarea plastică hidraulică a plăcilor (tablelor) simple**

Deformarea plastică hidraulică a tablelor constă în aceea că semifabricatul sub formă de placă 2 se deformează sub acțiunea presiunii înalte  $p$  exercitate pe o suprafață a plăcii, pe partea cealaltă fiind dispusă semimatrița 1, semifabricatul fiind obligat să preia forma acesteia. (Fig.1.14)

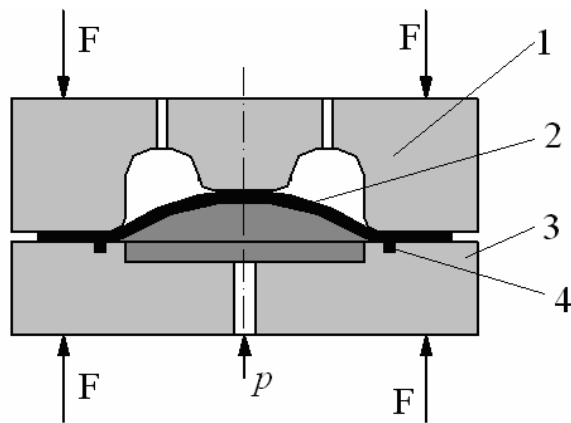
###### **1.3.1.1.1. Etape caracteristice din proces**

Principalele etape ale procedurii de deformare plastică hidraulică a tablelor la presiune înaltă sunt următoarele:

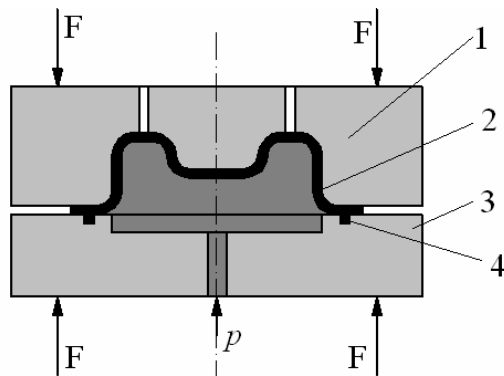
- amplasarea tablei semifabricat în dispozitiv ;
- presurizarea zonei de sub semifabricatul 2 simultan cu asigurarea forței de strângere  $F$ , precum și cu asigurarea etanșeității prin intermediul elementului 4 dispus între semifabricatul 2 și placa inferioară 3 până în momentul inițierii deformării dirijate;
- presurizarea până la deformarea completă a semifabricatului;
- îndepărtarea plăcii de strângere;
- extragerea piesei finite.



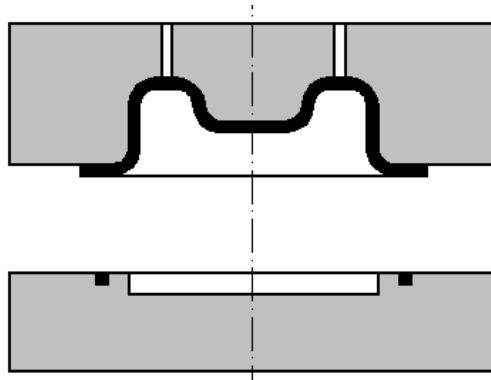
a) amplasarea tablei semifabricat în dispozitiv



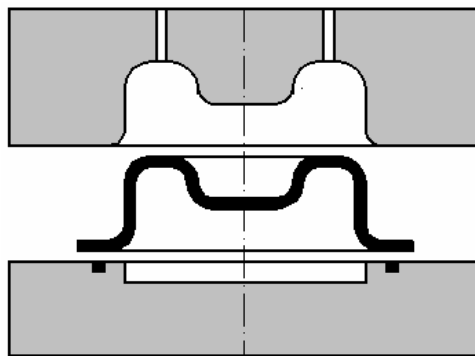
b) deformare liberă (intermediară)



c) deformare dirijată



d) îndepărtarea plăcii de strângere



e) extragerea piesei finite

**Fig.1.14. Fazele deformării plastice hidraulice a tablelor: a) amplasarea tablei semifabricat în dispozitiv; b) deformare liberă (intermediară); c) deformare dirijată; d) îndepărtarea plăcii de strângere; e) extragerea piesei finite**

În cadrul deformării plastice hidraulice a tablelor prin presiune înaltă se deosebesc două etape distincte de mare importanță:

1) **Etapa deformării libere a semifabricatului** (Fig.1.14.b), caracterizată prin apariția unei forme specifice deformării plastice a unei plăci asupra căreia acționează o presiune uniform distribuită a lichidului de lucru. Această etapă durează până în momentul în care forma obținută prin deformare liberă are după toate direcțiile dimensiuni inferioare dimensiunilor cavității profilate a plăcii active.

2) **Etapa deformării dirijate a semifabricatului** (Fig.1.14.c) caracterizată prin trecerea formei de deformare liberă înspre forma profilată a plăcii active. Această etapă începe în momentul în care se stabilește primul contact dintre

semifabricatul în curs de deformare și pereții cavității plăcii active și durează până la profilarea finală a piesei.

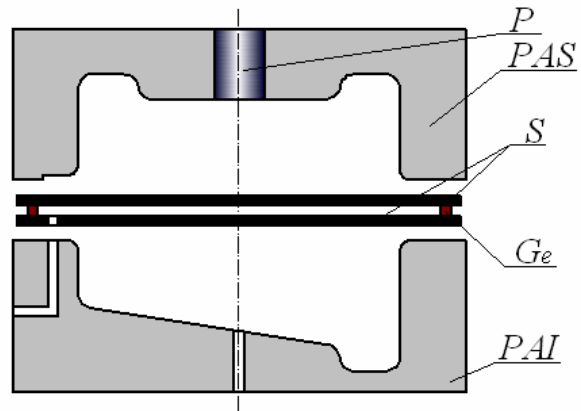
Ca o concluzie generală se poate spune că în secvențele procesului tehnologic din Fig.1.14. se observă că deformarea semifabricatului s-a produs cu un aport suplimentar de material în zona deformării, astfel încât este posibilă realizarea unor piese de grosimi corespunzătoare. Dacă se realizează o strângere mai pronunțată a semifabricatului nu se mai produce retragerea acestuia, ceea ce are ca efect realizarea unei piese de grosime mai mică.

Procesul de deformare plastică hidraulică prin presiune înaltă a tablelor este influențat în principal de următorii factori:

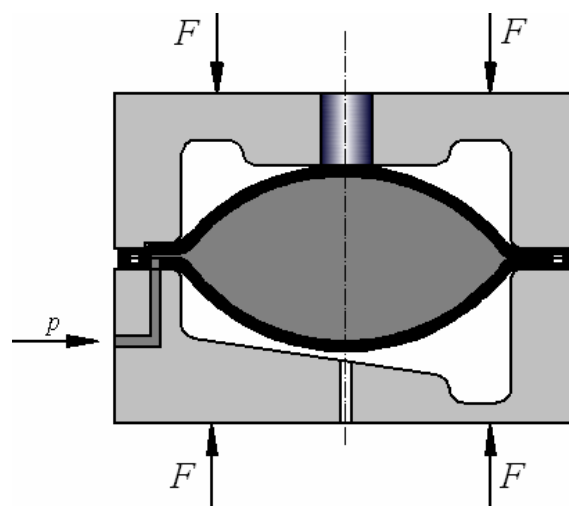
- caracteristicile geometrice, mecanice și tehnologice ale semifabricatului (grosime, formă, dimensiuni, calitatea materialului);
- parametri procesului (presiune, forța de strângere și metodologia de etanșare) ;
- limitele tehnologice ale procesului (încrețirea, fisurarea semifabricatului);
- caracteristicile sculei (forma, rugozitatea suprafeței, duritatea suprafeței, caracteristicile frecării între sculă și semifabricat).

#### **1.3.1.2. Deformarea plastică hidraulică a perechilor de plăci**

Deformarea plastică hidraulică a perechilor de plăci [33,50] este o aplicație mai recentă a tehnologiilor de deformare hidraulică și constă în principal în aceea că în spațiul dintre două plăci, etanșate corespunzător pe contur și dispuse între două matrițe se introduce un lichid sub presiune, plăcile luând forma matrițelor. De obicei acest procedeu de deformare plastică hidraulică este parte componentă a unor tehnologii mai complexe de execuție a unor piese de autovehicule, aeronave, cu spații interioare libere, spații care conduc la scăderea greutatei acestora fără a diminua caracteristicile de rezistență ale acestora. Astfel, pot fi executate componente de mare complexitate supuse la solicitări mari prin proiectarea unor secțiuni transversale care pot fi variabile astfel încât să se realizeze structuri de egală rezistență. Realizarea unor piese de acest tip face obiectul unui program de cercetare „Structuri de rezistență ultra-ușoare din oțel” (ULSAB – Ultra Light Steel Auto Body) inițiat de marile companii producătoare de autovehicule și aeronave. Ca exemple de părți componente ale autovehiculelor realizate prin această tehnologie se pot enumera: cadre, bare, stâlpi, șasiuri, elemente din structura de rezistență ale suspensiei, etc. O aplicație foarte uzuală a acestei tehnologii este și realizarea rezervoarelor de combustibil. În Fig.1.15 este prezentată succesiunea operațiilor pentru realizarea unui triunghi de suspensie, succesiune care constă din:

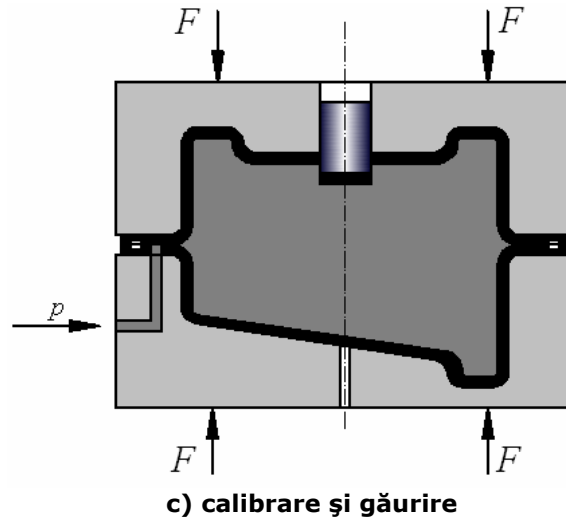


a) închiderea matriței



b) deformare liberă





**Fig.1.15. Succesiunea operațiilor de deformare hidraulică a perechilor de table pentru triunghiul de suspensie: a) închiderea matriței; b) deformare liberă; c) calibrare și găurire; d) extragerea piesei finite**

În general, următoarea operație care se execută în procesul tehnologic este aceea de sudare a celor două plăci.

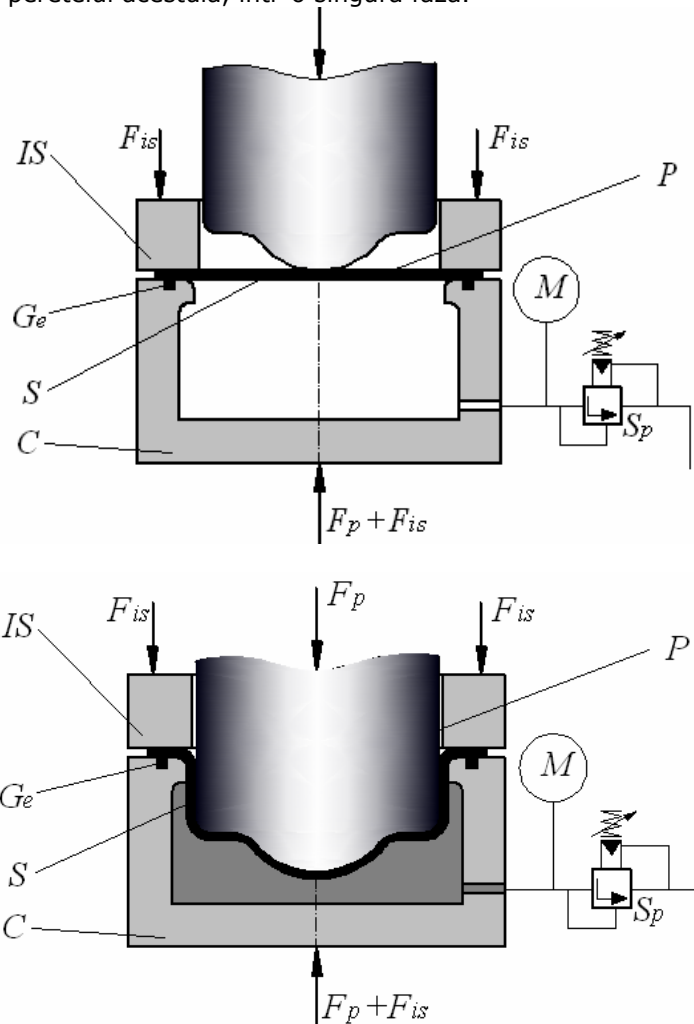
Ca o concluzie generală se poate spune că prin integrarea mai multor procedee tehnologice într-o singură linie de fabricație se pot obține rezultate foarte bune în realizarea unor structuri de rezistență ultraușoare din componența subansamblelor de automobile.

### 1.3.2. Ambutisarea adâncă hidromecanică

Ambutisarea adâncă hidromecanică [45] constă dintr-o combinație dintre ambutisarea clasică și deformarea plastică hidraulică.

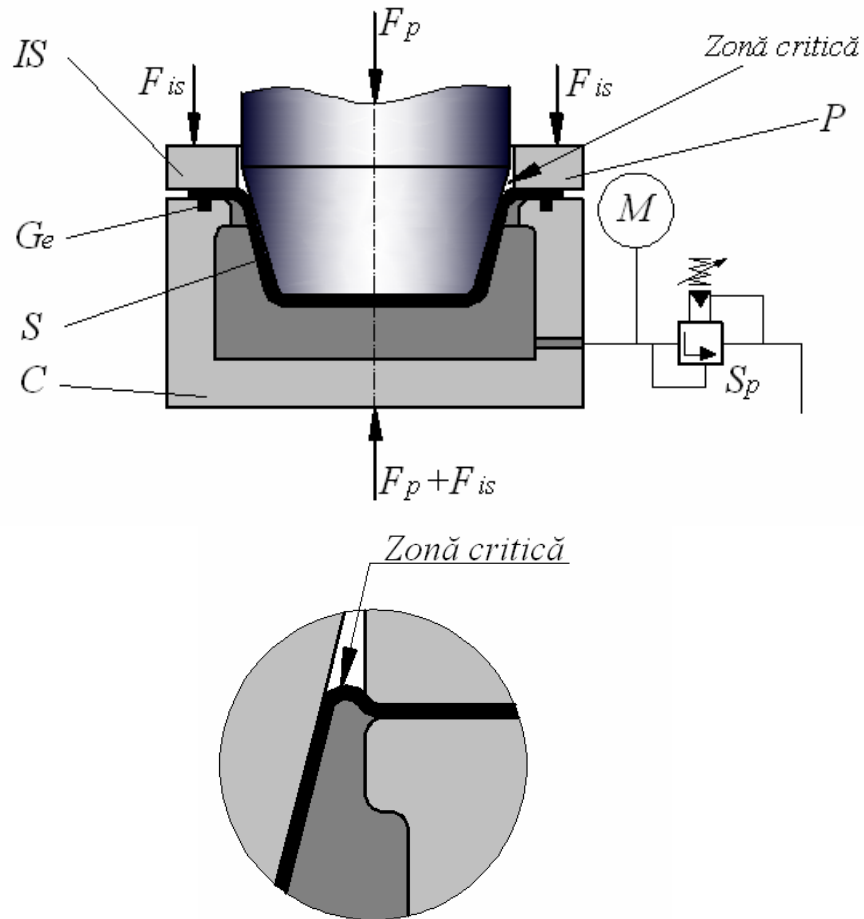
Dacă în timpul ambutisării adânci pe partea tablei opuse poansonului este aplicată o presiune hidraulică, semifabricatul va fi presat spre poanson fiind obligat să ia forma acestuia. Presiunea hidraulică ce acționează asupra semifabricatului nu este realizată de o sursă exterioară de presiune, ci este dată de reglajul unei supape  $S_p$  dispusă pe orificiul de ieșire din cavitatea containerului, iar creșterea presiunii se datorează intrării poansonului în cavitatea containerului și comprimarea lichidului conținut de acesta. Valoarea presiunii este pusă în evidență de un manometru  $M$  (Fig.1.16).

Având în vedere faptul că în timpul acestui procedeu tehnologic nu există contact rigid între semifabricat și matriță, iar frecarea dintre semifabricat și poanson depinde de valoarea presiunii din cavitatea matriței, prin optimizarea valorii acestei presiuni se pot realiza ambutisări adânci fără încrețirea semifabricatului, cu subțierea voită a peretelui acestuia, într-o singură fază.



**Fig.1.16. Principiul ambutisării adânci hidromecanice**

Evitarea încrețirii semifabricatului este și mai evidentă la ambutisarea adâncă hidromecanică a pieselor de formă tronconică (Fig.1.17).



**Fig.1.17. Ambutisarea adâncă hidromecanică a pieselor de formă tronconică**

În acest caz, limitarea contrapresiunii este dată și de formarea unei umflături a semifabricatului în zona de intrare a poansonului (Fig.1.17 detaliu A), aici existând pericolul spargerii (ruperii) semifabricatului în fazele intermediare ale procesului datorită diferenței mari între diametrul poansonului și al matriței.

$$P_c \leq P_r$$

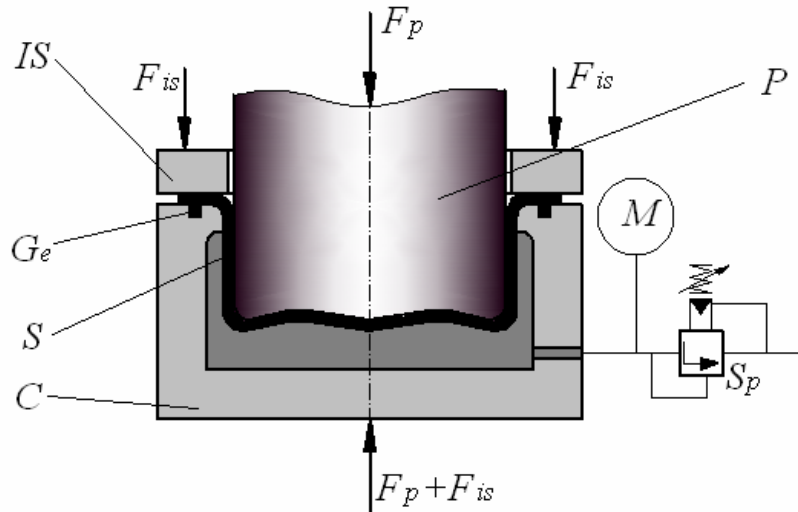
unde:

$P_c$  - contrapresiunea reglată de supapa S

$P_r$  - presiunea care ar produce ruperea

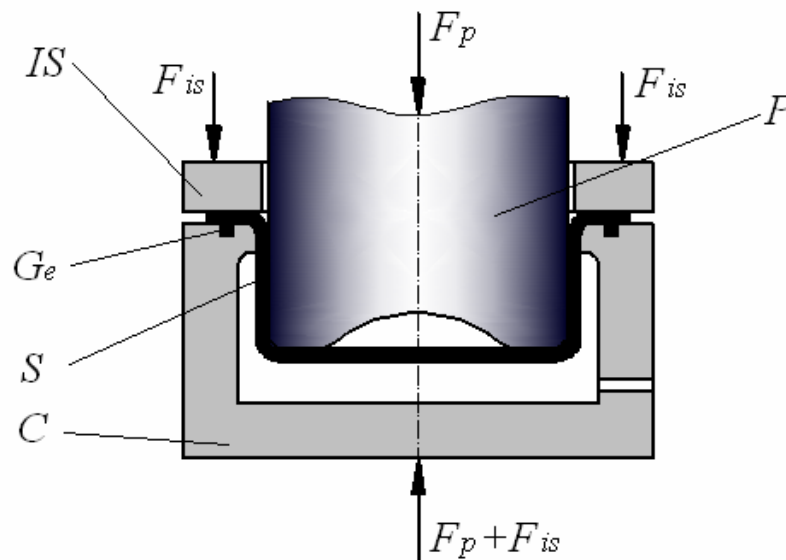
O caracteristică a acestui procedeu este aceea de a oferi posibilitatea realizării de configurații complexe ale pieselor (concav-convexe, sau cu conicități

inverse) cu profilarea doar a uneia dintre componentele sculei (poansonului sau a matriței), (Fig.1.18 și Fig.1.20).

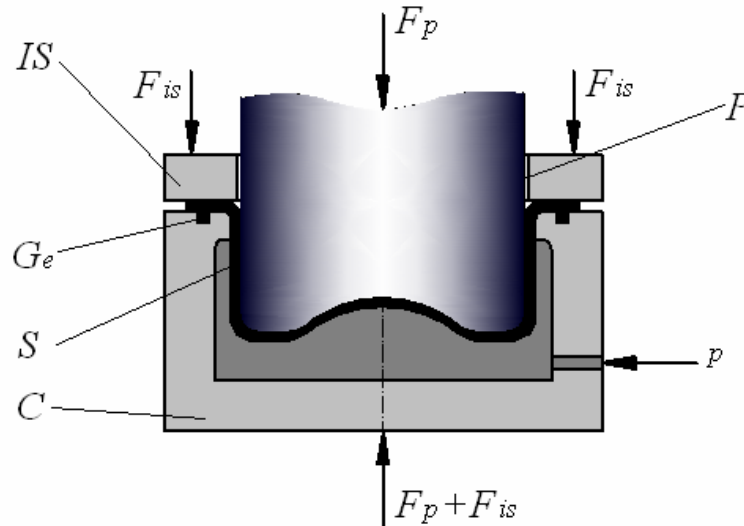


**Fig.1.18. Ambutisarea adâncă hidromecanică a pieselor cu forme concav-convexe**

Crearea presiunii care deformează semifabricatul poate fi făcută și de la o sursă exterioară de presiune prin pomparea de lichid sub presiune în zona necesară a fi deformată.



**a) faza inițială**

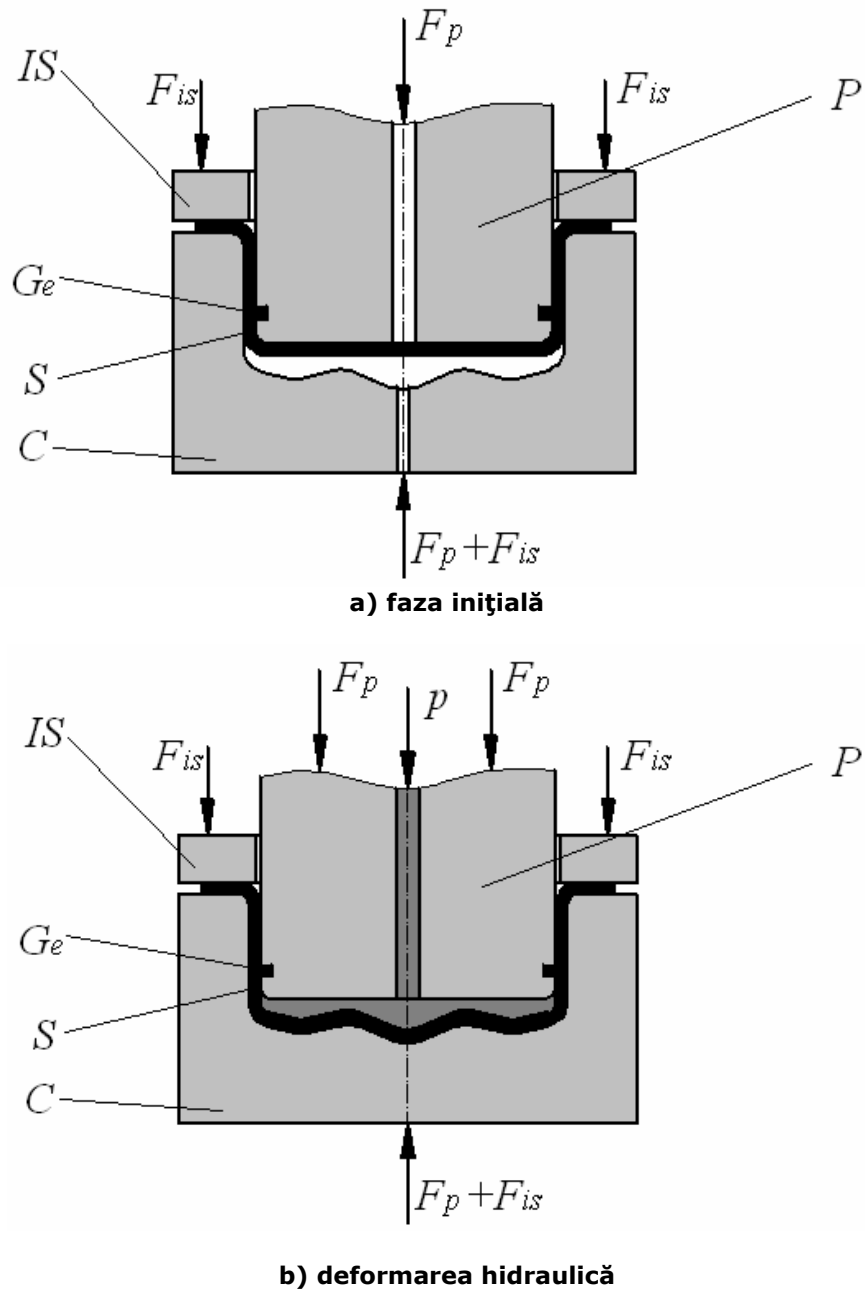


**b) deformarea hidraulică**

**Fig.1.19. Ambutisarea adâncă hidromecanică cu crearea presiunii de la o sursă exterioară cu presurizarea prin containerul C**

Principial, se pot distinge două situații caracteristice:

- a) realizarea unei ambutisări clasice care totuși nu finalizează forma piesei (Fig.1.19.a), urmată de o secvență de formare hidraulică prin pomparea unui lichid sub presiune în spațiul dintre matrită și poansonul profilat, pentru calibrarea piesei. (Fig.1.19.b).
- b) realizarea unei ambutisări clasice care totuși nu finalizează forma piesei (Fig.1.20.a), urmată de o fază de formare hidraulică prin pomparea unui lichid sub presiune prin interiorul poansonului, semifabricatul luând forma interioară a plăcii active. (Fig.1.20.b).



**Fig.1.20. Ambutisarea adâncă hidromecanică cu crearea presiunii de la o sursă exterioră cu presurizarea prin poanson**

### 1.3.3. Domenii prioritare de aplicabilitate a procedeele de deformare plastică hidraulică a tablelor

Dezvoltarea tehnologiei de deformare plastică hidraulică a tablelor s-a făcut în mod special în industria construcțiilor de autovehicule și aeronave datorită faptului că o mare parte din subsansamblele acestora sunt confecționate din tablă deformată.

Extinderea acestei tehnologii s-a datorat unor avantaje substanțiale comparativ cu realizarea aceluiași piese prin tehnologii convenționale.

Marile firme constructoare de autovehicule au în programele lor de dezvoltare realizarea prin această tehnologie a structurilor de rezistență ultraușoară din oțeluri aliate (ULSAB – Ultra Light Steel Auto Body) sau alte materiale.

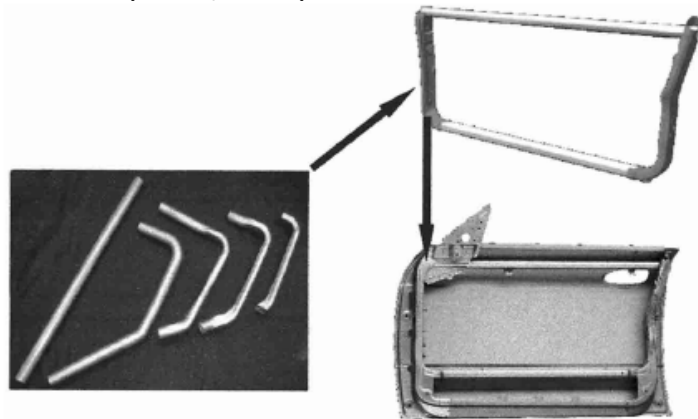
Avantajele utilizării acestei tehnologii față de tehnologiile clasice constau în:

- a) – greutate redusă a pieselor (prin proiectarea eficientă a grosimii și formei secțiunilor pieselor)
- b) – îmbunătățirea rigidității pieselor (prin realizarea unor module de rezistență optime ale secțiunilor transversale ale piesei)
- c) – reducerea numărului de operații secundare (suduri, nituiri, etc.)
- d) – reducerea adaosurilor de material care urmează a fi îndepărtat din piesă

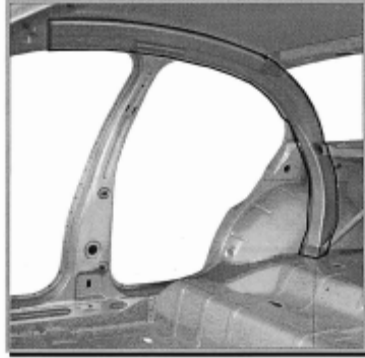
Avantajele enumerate anterior se datorează faptului că această tehnologie asigură o mult mai mare libertate în proiectarea formei pieselor.

Un alt avantaj esențial este acela al lipsei uneia dintre componentele rigide ale scule clasice de deformare plastică (poanson și placă activă) sau prin înlocuirea uneia dintre ele cu fluidul de lucru. Acest fapt duce la o reducere considerabilă a costului (cu aproximativ 40%) și a greutateii sculei.

În Fig.1.21 sunt prezentate câteva exemple de piese din tablă realizate prin deformare hidraulică a perechilor de plăci (**a**, **b**,) și a plăcilor simple (**c**,) urmate de alte procedee de îmbinare (suduri, nituiri).



a) cadru de ușă



b) suport de acoperiș



c) panou de ușă

**Fig.1.21. Componente de automobile obținute prin deformarea hidraulică a tablelor**

**1.4. Procede speciale de deformare plastică hidraulică a tablelor.**  
**Deformarea plastică hidraulică a tablelor la temperaturi ridicate**

Cu toate că procedeele de deformare plastică hidraulică a tuburilor și tablelor sunt considerate ca fiind deformări plastice la rece, există totuși posibilitatea ca deformarea să se facă în urma unei încălziri [24] a semifabricatului la  $200^{\circ} \div 300^{\circ}\text{C}$ . Aliajele de aluminiu și magneziu oferă mari posibilități de reducere a greutateii structurilor de rezistență datorită densității lor scăzute precum și rezistenței ridicate raportate la greutate. Totuși, utilizarea acestor materiale este restricționată de formabilitatea scăzută la temperatura mediului ambiant comparativ cu tablele din oțeluri uzuale utilizate la deformarea plastică la rece. Datorită acestui fapt, se recurge la o preîncălzire a semifabricatelor la  $200^{\circ} \div 300^{\circ}\text{C}$ , temperatură la care formabilitatea lor permite o prelucrare bună prin deformare plastică hidraulică.



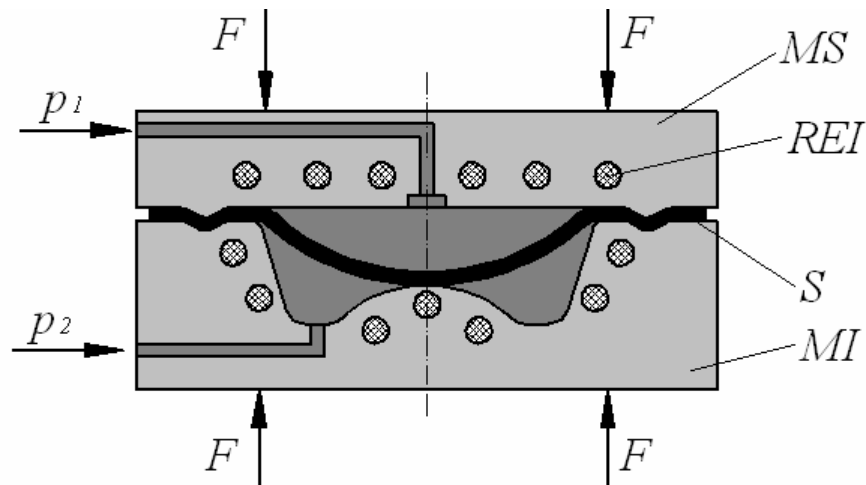
Dezvoltarea tehnologiilor de deformare plastică hidraulică la cald a tuburilor și plăcilor este într-un stadiu relativ incipient și face obiectul studiilor unor institute de profil din întreaga lume cum ar fi:

- ERC/NSM (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) – The Ohio State University, U.S.A – Warm hydroforming of Mg alloy and Al alloy tube and warm forming of Mg alloy and Al alloy sheet.
- LFT(Lehrstuhl für Fertigungstechnologie), University of Erlagen – Nuremberg in cooperation with Shuler Hydroforming and Audi, Germany – Warm hydroforming of Mg and Al alloy tube and sheet [Geiger et al 2003]
- University of Darmstadt, Germany – Warm hydromecanical deep drawing and Warm tube hydroforming of Al alloy sheet and tubes [Groshe et al 2002].
- IFU ( Institute für Umformung), University of Stuttgart – Warm high pressure sheet hydroforming of Mg and Al alloy sheet [Jager 2003].
- Fraunhofer Institute, Chemnitz – Warm hydroforming of sheet and tube

La deformarea plastică hidraulică la cald a plăcilor la presiune înaltă, atât placa semifabricat cât și matrița și fluidul de lucru sunt încălzite la o temperatură dorită. Aceasta presupune alegerea unui fluid de lucru care să-și mențină stabilitatea la temperatura respectivă.

#### 1.4.1. Deformarea plastică hidraulică la cald cu presiune înaltă a plăcilor

În Fig.1.22. este prezentat schematic un dispozitiv de deformare plastică hidraulică la cald cu presiune înaltă a plăcilor utilizată de către LFT (Lehrstuhl für Fertigungstechnologie) în anul 2003. Dispozitivul este format din două matrițe, matrița inferioară *MI* și matrița superioară *MS* între care este dispus semifabricatul *S*. În cele două matrițe sunt dispuse mai multe rezistențe electrice de încălzire *REI* reglabile în așa fel încât să se mențină la temperatura optimă necesară deformării. În faza inițială a deformării semifabricatul este încălzit prin contactul cu matrița superioară. După atingerea temperaturii de lucru începe pomparea lichidului de deformare în partea superioară a semifabricatului la presiunea  $p_1$ . În partea inferioară a semifabricatului este menținut un alt lichid la presiunea  $p_2 < p_1$  încălzit de asemenea la temperatura de lucru de către matrița inferioară pentru menținerea temperaturii semifabricatului pe toată durata procesului de deformare. În figură este reprezentat un stadiu intermediar al procesului deformării.



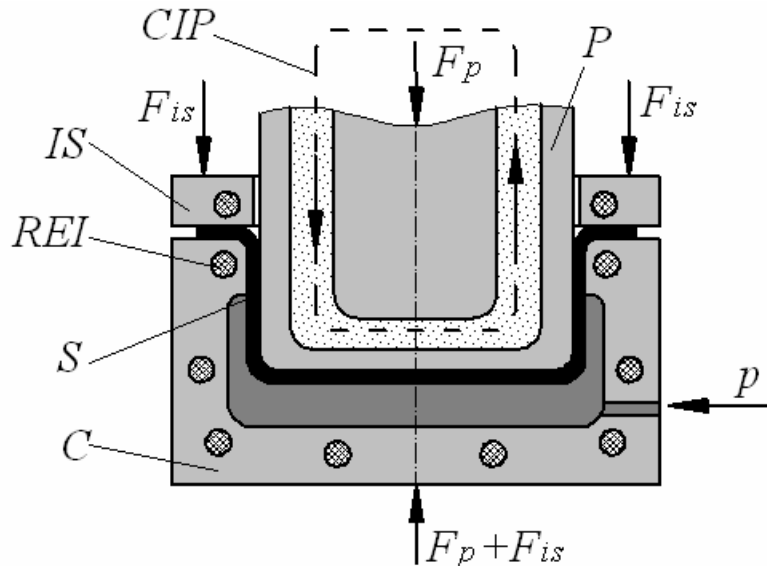
**Fig.1.22. Dispozitiv de deformare hidraulică la cald a plăcilor**

#### 1.4.2. Ambutisarea adâncă hidromecanică la cald a plăcilor

Principial, ambutisarea adâncă hidromecanică la cald a plăcilor nu diferă de ambutisarea adâncă hidromecanică la rece a acestora. Deosebirea esențială este aceea că datorită proprietăților tehnologice ale materialului semifabricatului la temperatura mediului ambiant, pentru a-i conferi o mai bună formabilitate, materialul semifabricat trebuie încălzit. Încălzirea semifabricatului este realizată atât prin contactul cu poansonul  $P$  încălzit la temperatura necesară cât și cu fluidul de lucru încălzit la o temperatură apropiată.

Încălzirea fluidului de lucru impune alegerea unui fluid care trebuie să fie stabil din punct de vedere termic și chimic la temperatura de lucru.

În Fig.1.23. este prezentat schematic un dispozitiv de ambutisare adâncă hidromecanică la cald a plăcilor. Procesul de deformare se desfășoară astfel: semifabricatul  $S$  fixat între containerul  $C$  și inelul de strângere  $IS$  este deformat prin pătrunderea poansonului  $P$  prin aplicarea forței  $F_p$ . Încălzirea semifabricatului este realizată prin contactul acestuia cu poansonul care este prevăzut cu un circuit de încălzire  $CIP$ . De asemenea și containerul și inelul de strângere sunt prevăzute cu rezistențe electrice de încălzire  $REI$ . Păstrarea unui contact ferm între poanson și semifabricat este realizată de presiunea  $p$  menținută în interiorul dispozitivului. Fixarea semifabricatului este realizată de forța  $F_{IS}$  aplicată pe inelul de strângere.



**Fig.1.23 . Ambutisare adâncă hidromecanică la cald**

### **1.5. Perspective de dezvoltare a tehnologiilor de deformare plastică hidraulică (DPH)**

Extinderea tehnologiei de DPH s-a datorat unor avantaje substanțiale comparativ cu realizarea aceluiași piese prin tehnologii convenționale.

Marile firme constructoare de autovehicule au în programele lor de dezvoltare realizarea prin această tehnologie a structurilor de rezistență ultrausoară din oțeluri aliate (ULSAB – Ultra Light Steel Auto Body) sau alte materiale.

Avantajele utilizării acestei tehnologii față de tehnologiile clasice constau în:

a)– greutate redusă a pieselor (prin proiectarea eficientă a grosimii și formei secțiunilor pieselor)

b)– îmbunătățirea rigidității pieselor (prin realizarea unor module de rezistență optime ale secțiunilor transversale ale piesei)

c)– reducerea numărului de operații secundare (suduri, nituri etc.)

d)– reducerea adaosurilor de material care urmează a fi îndepărtat din piesă

Avantajele enumerate anterior se datorează faptului că această tehnologie asigură o mult mai mare libertate în proiectarea formei pieselor.

e)– un alt avantaj esențial este acela al lipsei uneia dintre componentele rigide ale sculei clasice de deformare plastică (poanson și placă activă) prin înlocuirea uneia dintre ele cu fluidul de lucru. Acest fapt duce la o reducere considerabilă a costului (cu aproximativ 40%) și a greutății sculei de deformare plastică și deci a costurilor de fabricație a sculelor.

f) – plasticitatea materialului deformat plastic crește (ca la forjarea în matriță) și deci gradul de deformabilitate plastică se mărește.

g) – procedeul este mai productiv și mai economic față de procedeele clasice prin deformare plastică la rece a materialelor [9].

#### 44 Definirea și clasificarea procedeelor de prelucrare prin deformare plastică - 1

---

h) – prin alegerea potrivită a fluidelor de lucru tehnologia în sine poate deveni mai puțin nocivă mediului ambiant.

Datorită acestor avantaje dezvoltarea tehnologiilor de deformare plastică hidraulică a tuburilor și plăcilor oferă **largi perspective de dezvoltare** făcând obiectul studiilor unor institute de profil din întreaga lume cum ar fi:

- ERC/NSM (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) – The Ohio State University, U.S.A ;
- LFT(Lehrstuhl für Fertigungstechnologie), University of Erlagen – Nuremberg in cooperation with Shuler Hydroforming and Audi, University of Darmstadt, Germany
- IFU ( Institute für Umformung), University of Stuttgart, Germany
- Fraunhofer Institute, Chemnitz ,Germany

Principalele preocupări de dezvoltare în perspectivă a tehnologiilor de deformare plastică hidraulică a tuburilor și plăcilor sunt orientate spre următoarele **obiective țintă**:

- îmbunătățirea produselor și tehnologiilor existente;
- dezvoltarea și adaptarea de noi procedee de DPH a tuburilor și plăcilor.

În scopul realizării acestor obiective principalele direcții de cercetare se referă la:

- evaluarea caracteristicilor materialelor atât la temperatura mediului ambiant cât și la temperaturi ridicate;
- evaluarea calității lubrifianților precum și obținerea unor aditivi cât mai eficienți pentru îmbunătățirea calității lubrifierii;
- dezvoltarea unor metode eficiente pentru modelarea prin simulare a proceselor de DPH;
- dezvoltarea unor metode cât mai eficiente pentru proiectarea formei pieselor care pot fi realizate prin DPH.

### **1.6. Concluzii**

Deformarea plastică la rece a tablelor subțiri se execută printr-o varietate de procedee, unul dintre acestea fiind și procedeul de deformare plastică hidraulică (DPH).

Prin definiție, deformarea plastică hidraulică se consideră a fi un procedeu de prelucrare prin deformare plastică în general la rece a pieselor cu pereți subțiri prin care acestea își modifică forma și dimensiunile, la volum constant, datorită acțiunii unui fluid de lucru sub presiune ce acționează asupra lor, obligându-le să ia forma cavității matriței în care sunt așezate.

Odată cu diversificarea procedeelor de prelucrare prin DPH a pieselor cu pereți subțiri s-a impus și o nouă abordare din punct de vedere a clasificării acestor procedee. Urmând succesiunea descrisă în clasificarea din Fig.1.1 am definit tipurile de procedee de DPH utilizate până în prezent.

**Deformarea plastică hidraulică a tuburilor** (semifabricatul este de formă tubulară) destinată fabricării pieselor tubulare constă în aceea că deformarea se produce ca urmare a presiunii exercitate în interiorul sau exteriorul tubului semifabricat, suprafața cilindrică a acestuia luând forma plăcii active dispuse corespunzător în exteriorul respectiv interiorul semifabricatului.

Am detaliat procedeele de DPH a tuburilor **cu presiune interioară** ca fiind tehnologiile de execuție a pieselor tubulare la care presiunea ce produce deformarea se exercită în interiorul tubului, plăcile active fiind dispuse în exterior. Din punct de vedere tehnologic, deformarea plastică hidraulică a tuburilor cu presiune interioară

se poate realiza fără aport suplimentar controlat de material în zona de deformare sau cu aport suplimentar de material în zona de deformare prin scurtarea controlată a semifabricatului.

Pentru punerea în evidență a secvențelor unui proces de deformare plastică hidraulică a tuburilor supuse la presiune interioară, în Fig.1.4 am exemplificat tehnologia de execuție a unei piese tubulare în formă de "T".

Deformarea plastică hidraulică a tuburilor poate fi efectuată și supunând tubul semifabricat la o **presiune exterioară**, placa activă fiind dispusă în interiorul tubului semifabricat și realizată constructiv din elemente modulare astfel încât după deformarea semifabricatului aceasta să poată fi extrasă din interiorul tubului.

Pentru realizarea cu succes a unor deformări plastice hidraulice a pieselor tubulare este necesară asigurarea unor condiții tehnologice atât din punct de vedere al deformabilității semifabricatului cât și din punct de vedere al utilajelor și tehnologiei propriu-zise.

Întrucât la deformarea plastică hidraulică a tuburilor condițiile de solicitare a materialului semifabricatului sunt relativ complexe pentru determinarea proprietăților materialului tubului se recomandă o testare prin introducerea unei presiuni interne în semifabricat (test de umflare) testare care simulează suficient de fidel procesele industriale de DPH. În funcție de obiectivul urmărit testarea se efectuează cu aport suplimentar de material în zona de deformare sau fără.

În timpul procesului tehnologic de deformare plastică hidraulică a pieselor tubulare sunt situații în care există mișcări relative între semifabricat și matriță. Aceste mișcări pot avea drept consecințe deteriorări ale suprafețelor semifabricatului mergând chiar până la gripări, precum și majorări substanțiale ale forțelor necesare procesului de deformare. Acest fapt duce la necesitatea asigurării unei ungeri corespunzătoare specifice condițiilor impuse de contactul semifabricat-matriță.

Construcția utilajelor folosite pentru realizarea pieselor tubulare prin deformare plastică hidraulică este determinată de forma, dimensiunile și caracteristicile materialului pieselor care urmează a fi realizate. Pentru exemplificare, **am prezentat și realizat o schemă constructivă de concepție proprie a unui utilaj cu ajutorul căruia se pot realiza piese în formă de „T”**. Aceste utilaje sunt de obicei prese hidraulice cu funcții multiple echipate cu dispozitivele specifice DPH a tuburilor.

Domeniul pe care s-a dezvoltat în primă fază tehnologia de execuție prin deformare plastică hidraulică a pieselor tubulare a fost acela al elementelor de racordare sub diverse forme ale conductelor metalice și nemetalice pentru transportul fluidelor (coturi, teuri, mufe etc.). Odată cu perfecționarea tehnologiilor, domeniul cel mai important în care este utilizată această tehnologie este industria construcțiilor de autovehicule și aeronautică. La ora actuală, se realizează prin deformare plastică hidraulică, o varietate foarte mare de piese, începând cu tubulatura de evacuare a gazelor arse, până la elemente ale structurilor de rezistență ale autovehiculelor.

**Deformarea plastică hidraulică a plăcilor (tablelor) simple** (semifabricatul este sub formă de placă plană sau curbă) constă în aceea că deformarea se produce ca urmare a presiunii exercitate pe o parte a semifabricatului sub formă de tablă, suprafața acestuia luând forma plăcii active dispuse corespunzător pe cealaltă parte a semifabricatului.

Tehnologia de DPH a plăcilor (tablelor) simple este caracterizată în general prin următoarele faze distincte: amplasarea tablei semifabricat în dispozitiv; deformare liberă (intermediară); deformare dirijată; îndepărtarea plăcii de strângere; extragerea piesei finite.

Ca o concluzie generală se poate afirma că deformarea semifabricatului se produce cu un aport suplimentar de material în zona deformării, astfel încât este posibilă realizarea unor piese de grosimi corespunzătoare cu grade de deformare mari, într-o singură fază. Dacă se realizează o strângere mai pronunțată a semifabricatului nu se mai produce retragerea acestuia, ceea ce are ca efect realizarea unei piese de grosime mai mică.

Procesul de deformare plastică hidraulică prin presiune înaltă a tablelor este influențat în principal de următorii factori: caracteristicile geometrice, mecanice și tehnologice ale semifabricatului (grosime, formă, dimensiuni, calitatea materialului, metodologia de etanșare), parametri procesului (presiune, forța de strângere), limitele tehnologice ale procesului (încrețirea, fisurarea semifabricatului), caracteristicile sculei (forma, rugozitatea suprafeței, duritatea suprafeței, caracteristicile frecării între sculă și semifabricat).

**Deformarea plastică hidraulică a perechilor de plăci** este o aplicație mai recentă a tehnologiilor de DPH și constă în principal în aceea că în spațiul dintre două plăci, etanșate corespunzător pe contur și dispuse între două matrițe se introduce un lichid sub presiune, plăcile luând forma matrițelor. De obicei acest procedeu de deformare plastică hidraulică este parte componentă a unor tehnologii mai complexe de execuție a unor piese de autovehicule, aeronave, cu spații interioare libere, spații care conduc la scăderea greutateii acestor piese fără a diminua caracteristicile de rezistență ale acestora. Astfel, pot fi executate componente de mare complexitate supuse la solicitări mari prin proiectarea unor secțiuni transversale care pot fi variabile de-a lungul axei pieselor astfel încât să se realizeze structuri de egală rezistență.

O aplicație mai recentă de deformare plastică a tablelor este **ambutisarea adâncă hidromecanică**, tehnologie care constă dintr-o combinație dintre ambutisarea clasică și deformarea plastică hidraulică. Având în vedere faptul că în timpul acestui procedeu tehnologic nu există contact rigid între semifabricat și matriță, iar frecarea dintre semifabricat și poanson depinde de valoarea presiunii din cavitatea matriței, prin optimizarea valorii acestei presiuni se pot realiza ambutisări adânci fără încrețirea semifabricatului, cu subțierea voită a peretelui acestuia, într-o singură fază. O caracteristică a acestui procedeu este aceea de a oferi posibilitatea realizării configurații complexe ale pieselor (concav-convexe, sau cu conicități inverse) cu profilarea doar a uneia dintre componentele sculei (poansonului sau a matriței).

Cu toate că procedeele de deformare plastică hidraulică a tuburilor și tablelor sunt considerate ca fiind deformări plastice la rece, există totuși posibilitatea ca deformarea să se facă în urma unei preîncălziri a semifabricatului. Aliajele de aluminiu și magneziu oferă mari posibilități de reducere a greutateii structurilor de rezistență datorită densității lor scăzute precum și rezistenței ridicate raportate la greutate. Totuși, utilizarea acestor materiale este restricționată de formabilitatea scăzută la temperatura mediului ambiant comparativ cu tablele din oțeluri uzuale utilizate la deformarea plastică la rece. Datorită acestui fapt au fost dezvoltate **procedee speciale de DPH** la care deformarea se face în urma unei preîncălziri a semifabricatelor la o temperatură la care formabilitatea lor permite o prelucrare bună prin deformare plastică hidraulică.

Avantajele utilizării tehnologiei de DPH față de tehnologiile clasice constau în: greutate redusă a pieselor (prin proiectarea eficientă a grosimii și formei secțiunilor pieselor), îmbunătățirea rigidității pieselor (prin realizarea unor module de rezistență optime ale secțiunilor transversale ale piesei), reducerea numărului de operații secundare (suduri, nituiri etc.), reducerea adaosurilor de material care

urmează a fi îndepărtat din piesă, lipsa uneia dintre componentele rigide ale scule clasice de deformare plastică (poanson și placă activă) prin înlocuirea uneia dintre ele cu fluidul de lucru. Acest fapt duce la o reducere considerabilă a greutateii sculei de deformare plastică și deci a costurilor de fabricație a sculelor, (cu aproximativ 40%) plasticitatea materialului deformat plastic crește (ca la forjarea în matriță) și deci gradul de deformabilitate plastică se mărește. De asemenea, prin alegerea potrivită a fluidelor de lucru, tehnologia în sine poate deveni mai puțin nocivă mediului ambiant.

Tehnologiile de deformare plastică hidraulică a tuburilor și plăcilor oferă **largi perspective de dezvoltare** ceea ce face să fie în obiectul studiilor unor institute de profil din întreaga lume cum ar fi: ERC/NSM (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing), The Ohio State University, U.S.A, LFT (Lehrstuhl für Fertigungstechnologie), University of Erlangen – Nuremberg in cooperation with Shuler Hydroforming and Audi, Germany, University of Darmstadt, Germany, IFU (Institute für Umformung), University of Stuttgart.

## **CAPITOLUL 2**

### **NOȚIUNI GENERALE PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ A METALELOR**

#### **2.1. Generalități**

Studiul teoretic și experimental al fenomenelor care apar la deformarea plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri implică o cunoaștere a elementelor de bază privind teoriile deformării plastice a materialelor

Teoriile deformării plastice a metalelor se aplică în scopul de a analiza și stabili bazele generale pentru elaborarea rațională a proceselor tehnologice de prelucrare mecanică prin presare la rece. Aceste teorii fac posibilă obținerea pieselor dorite, prin studierea următorilor factori principali:

1). condițiile în care se asigură deformăția maximă a semifabricatului în scopul obținerii celor mai productive procese tehnologice;

2). caracterul modificării formei semifabricatului la diferite operații, în scopul stabilirii rapoartelor corespunzătoare între dimensiunile și forma semifabricatelor și dimensiunile și forma pieselor obținute;

3). influența prelucrării prin deformare plastică la rece asupra proprietăților mecanice ale materialului pieselor obținute, în scopul obținerii celor mai bune caracteristici de exploatare a acestora;

4). rezistența materialului semifabricatului în timpul deformării plastice la operațiile de prelucrare prin presare la rece, în scopul determinării energiei necesare deformării pe baza căreia se alege tehnologia de prelucrare și se efectuează calculul de rezistență al dispozitivului de deformare respectiv.

#### **2.2. Starea de tensiune a materialelor**

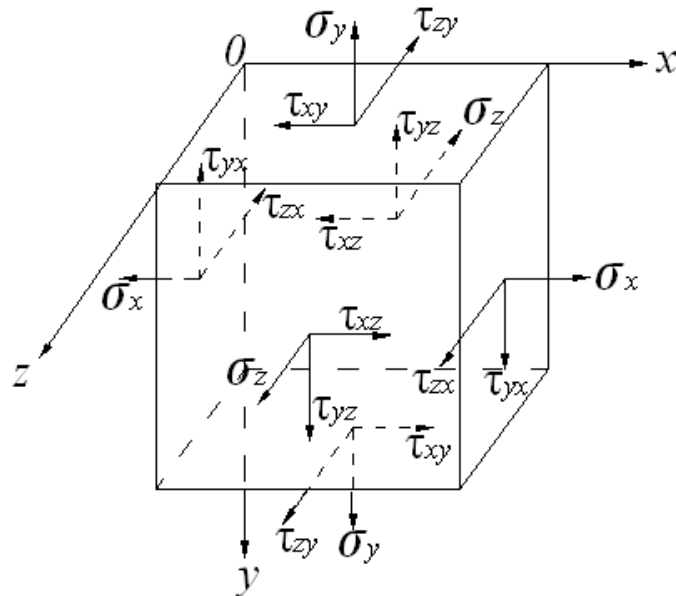
În scopul determinării forțelor necesare deformării plastice a materialelor este necesară cunoașterea stării lor de tensiune [5].

Prin starea de tensiune a materialului se înțelege totalitatea tensiunilor care acționează în fiecare punct al corpului supus deformării. În cazul general starea de tensiuni într-un punct  $O$  poate fi definită [1] prin cele nouă componente ale tensorului tensiunilor (Fig.2.1), dintre care numai șase sunt distincte:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$

Simbolic, tensorul efortului unitar se scrie:

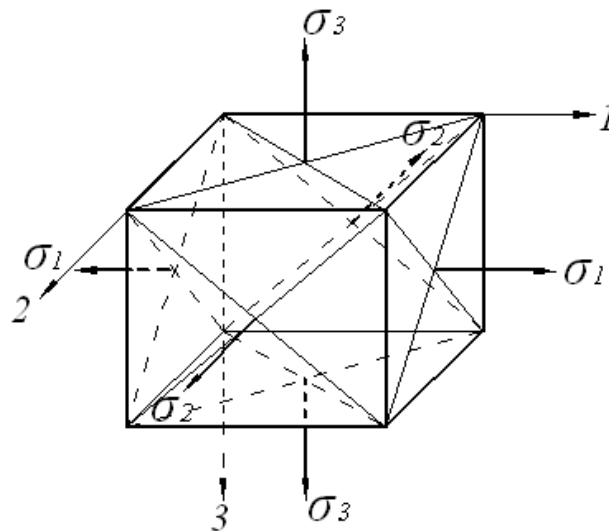
$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$





**Fig.2.1. Componentele tensorului efortului unitar**

Dacă alegerea sistemului de coordonate se face în așa fel încât tensiunile să fie normale sau paralele cu planele de coordonate și eforturile unitare tangențiale să dispară (Fig.2.2), direcțiile alese pentru axele de coordonate poartă numele de direcții principale, iar tensiunile în planele normale pe axele principale se notează, respectiv, prin  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  și se numesc tensiuni principale.



**Fig.2.2. Starea spațială tensiune**

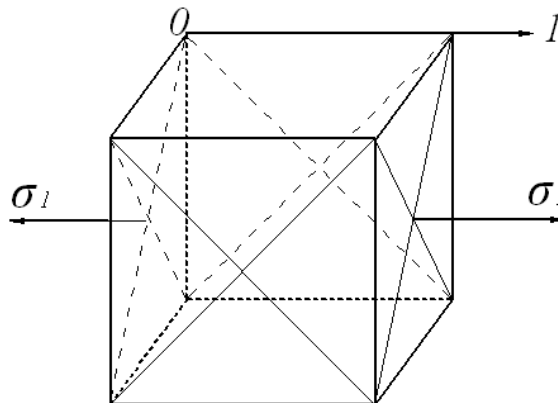
Tensorul eforturilor unitare dintr-un punct este complet definit dacă se cunosc cele trei direcții principale și mărimile celor trei eforturi unitare principale  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  care se poate exprima prin relația:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Starea de tensiune a materialului poate fi liniară, plană sau spațială.  
Starea liniară de tensiune (Fig.2.3) se definește prin:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\neq 0 \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

și este caracteristică unei solicitări liniare a unei piese la care una dintre dimensiuni este mult mai mare în raport cu celelalte două.

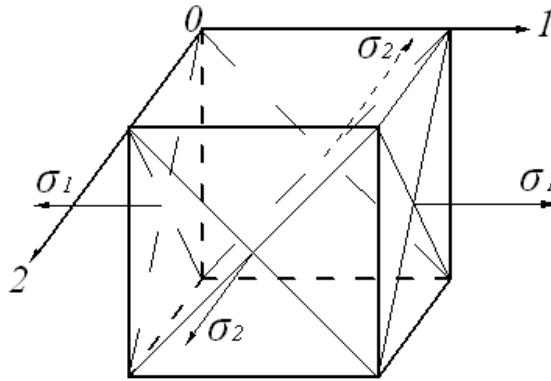


**Fig.2.3. Starea liniară de tensiune**

Starea plană de tensiune (Fig. 2.4) se definește prin:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\neq 0 \\ \sigma_2 &\neq 0 \\ \sigma_3 &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

și este caracteristică unei solicitări de întindere după două direcții perpendiculare a unei piese la care două dintre dimensiuni sunt mult mai mari în raport cu a treia (table subțiri).



**Fig.2.4. Starea plană de tensiune**

Starea spațială de tensiune (Fig.2.2) se definește prin:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\neq 0 \\ \sigma_2 &\neq 0 \\ \sigma_3 &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Când  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$  tensorul se numește tensor deviator, efectul său fiind o variație a formei, fără variația de volum, situație care este întâlnită în cazul deformărilor plastice ale materialelor.

Repartiția tensiunilor în corpul considerat este definită de ecuațiile de echilibru care se referă la starea de tensiune a unui volum elementar de material ales arbitrar.

Într-un sistem de coordonate cartezian  $Oxyz$ , ecuațiile diferențiale de echilibru pentru starea spațială de solicitare sunt definite:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Pentru starea plană ecuațiile diferențiale (2.6) devin:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0$$

(2.7)

unde, conform principiului dualității tensiunilor tangențiale

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$$

În sistemul de coordonate cilindrice ecuațiile (2.6) devin:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0$$

(2.8)

Pentru starea plană de tensiune ecuațiile (2.8) devin:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0$$

(2.9)

Când deformarea plană este axial-simetrică ecuațiile (2.9) se simplifică obținându-se o formă mai simplă:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

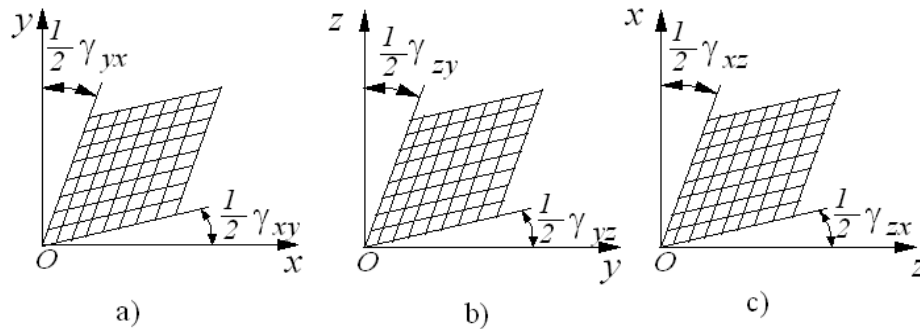
(2.10)

### **2.3. Starea de deformare a materialelor**

Starea de eforturi unitare în jurul unui punct  $O$  [12] din interiorul unui element de volum al unui corp generează o stare de deformații unitare, care, în cazul cel mai general este reprezentată prin tensorul deformațiilor  $T_{\mathcal{E}}$  definit prin:

$$T_{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

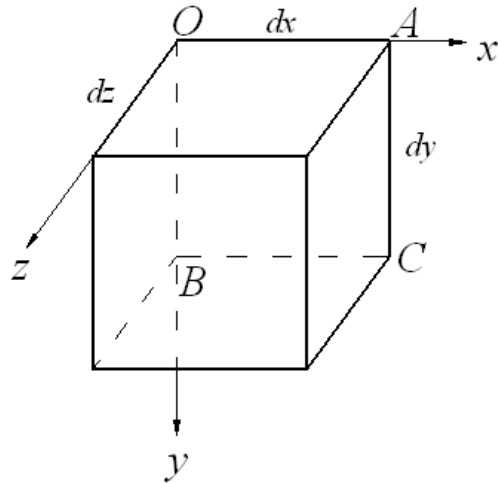
în care componentele  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  reprezintă alungirile specifice iar componentele  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$  reprezintă lunecările specifice ale elementului de volum considerat (Fig.2.5).



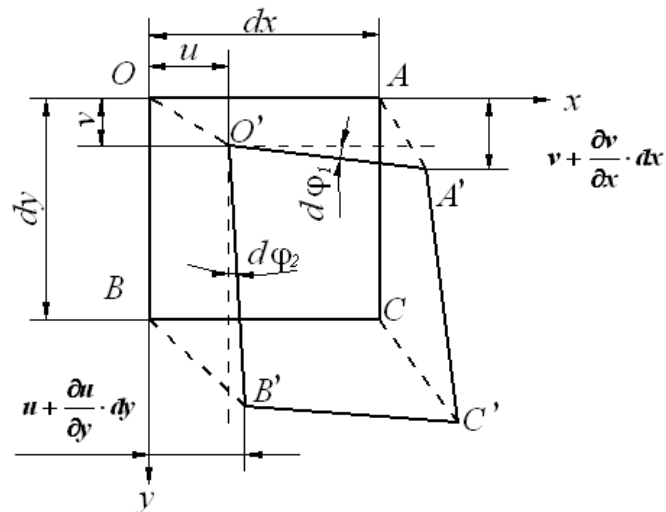
**Fig.2.5. Starea de deformare a unui corp**

Pentru a stabili relațiile care există între deformațiile specifice  $\varepsilon$  și  $\gamma$  în funcție de componentele deplasării  $u, v, w$  ale punctului  $O$  în vederea ușurării calculelor se va considera starea plană de deformare (la care au loc deformații numai într-un plan, de exemplu planul  $xOy$ ), demonstrația extinzându-se apoi la starea spațială de deformare.

Considerăm elementul de volum paralelipipedic din Fig.2.6.a, de laturi  $dx, dy, dz$ , care se deformează numai în planul  $xOy$  și planele paralele  $xOy$ . În urma deformației, punctul  $O$  suferă, în cazul cel mai general, o deplasare spațială, de componente  $u, v, w$ , respectiv în cazul stării plane de tensiune o deplasare de componente  $u, v$ , cum se arată în Fig.2.6.b.



a) element de volum înainte de deformare



b) element de volum după deformare

**Fig.2.6. Starea plană de deformații**

Alungirile pe cele direcții, se determină pentru starea spațială de deformații ca fiind:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.12)$$

Pentru a determina expresiile deformațiilor unghiulare  $\gamma$  în funcție de aceleași deplasări  $u, v, w$ , se consideră că punctul A are în afară de deplasarea în

lungul axei  $x$  și o deplasare în lungul axei  $y$ . Astfel, deformațiile unghiulare (lunecări specifice) în planele  $Oxy, Oyz, Ozx$  se definesc ca fiind:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.13)$$

Ca și în cazul teoriei tensiunilor normale, se poate stabili ecuația suprafeței deformațiilor și se pot determina axele principale, suprafețele principale și deformațiile liniare principale  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  și  $\varepsilon_3$ .

Luând aceste direcții ca axe, tensorul deformațiilor devine:

$$T_\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

Pe planele principale, unde acționează deformațiile liniare principale, deformațiile unghiulare sunt nule astfel încât atunci când planele de referință coincid cu planele principale starea de deformare a unui corp este complet determinată dacă se cunosc componentele deformațiilor liniare principale, iar între acestea există relația:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2.15)$$

#### **2.4. Legile de bază ale deformării plastice**

Cercetările teoretice și experimentale efectuate de oamenii de știință până în prezent au permis stabilirea anumitor legi referitoare la deformarea plastică a metalelor și aliajelor[5]. Mai importante dintre aceste legi sunt următoarele:

- a). Legea constanței volumului materialului piesei la deformare
- b). Legea prezenței deformațiilor elastice în procesul deformării plastice
- c). Legea minimei rezistențe la deformare a materialului piesei
- d). Legea echilibrării tensiunilor suplimentare remanente
- e). Legea similitudinii

##### **a). Legea constanței volumului materialului piesei la deformare**

Deoarece semifabricatele folosite pentru obținerea pieselor prin deformare plastică la rece sunt obținute prin laminare, iar fisurarea materialului în procesul de deformare nu are loc, în mod normal, volumul materialului pieselor în procesul de deformare plastică la rece rămâne constant.

Notând dimensiunile inițiale ale piesei cu  $x_0, y_0$  și  $z_0$ , iar dimensiunile piesei obținute prin deformare cu  $x, y$  și  $z$ , în baza legii constanței volumului, volumul materialului se poate scrie:

$$V = x_0 y_0 z_0 = xyz = \text{const.} \quad (2.16)$$

sau:

$$\frac{x}{x_0} \cdot \frac{y}{y_0} \cdot \frac{z}{z_0} = 1 \quad (2.17)$$

Notând:

$$\ln \frac{x}{x_0} = \varepsilon_x; \quad \ln \frac{y}{y_0} = \varepsilon_y; \quad \ln \frac{z}{z_0} = \varepsilon_z, \quad (2.18)$$

rezultă că:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (2.19)$$

adică suma algebrică a deformațiilor logaritmice este egală cu zero.

Procesul de deformare se poate studia și cu ajutorul deformațiilor relative care sunt date de relațiile:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x' &= \frac{x - x_0}{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{x}{x_0} - 1 \\ \varepsilon_y' &= \frac{y - y_0}{y_0} = \frac{\Delta y}{y_0} = \frac{y}{y_0} - 1 \\ \varepsilon_z' &= \frac{z - z_0}{z_0} = \frac{\Delta z}{z_0} = \frac{z}{z_0} - 1 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Conform relațiilor (2.18) și (2.20), rezultă că între deformațiile logaritmice și deformațiile relative există relații de forma:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon') \quad (2.21)$$

Deoarece aceste deformații au valori foarte mici, subunitare, relația (2.21) se poate dezvolta în serie Mac-Laurin astfel:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon') = \varepsilon' - \frac{\varepsilon'^2}{2!} + 2 \cdot \frac{\varepsilon'^3}{3!} - 3 \cdot \frac{\varepsilon'^4}{4!} + \dots \quad (2.22)$$



Conform relației (2.3.9), rezultă că, în cazul unor grade normale de deformare, diferența dintre deformațiile logaritmice și deformațiile relative se situează sub 5%. În consecință, în rezolvarea problemelor practice se poate considera că:

$$\varepsilon = \varepsilon' \quad (2.23)$$

Deci, suma algebrică a deformațiilor relative este egală cu zero.

$$\varepsilon'_x + \varepsilon'_y + \varepsilon'_z = 0 \quad (2.24)$$

Utilizarea acestei relații în rezolvarea problemelor practice duce la erori relativ mari. De aceea, când sunt necesare calcule mai precise se va utiliza relația (2.19), adică se va aplica relația deformațiilor logaritmice.

**b). Legea prezenței deformațiilor elastice în procesul deformării plastice**

Deformarea plastică a metalelor este însoțită întotdeauna de deformații elastice. Deformațiile plastice apar în metal numai după depășirea valorii limită a deformațiilor elastice. Faptul că deformațiile plastice (remanente) sunt însoțite de deformații elastice (reversibile) rezultă și din diagrama lui Hooke. Solicitând la tracțiune o anumită epruvetă metalică aceasta se va deforma. Deformația totală

$\varepsilon_t = \overline{OC}$  (Fig.2.7) se compune din deformația elastică  $\varepsilon_e = \overline{bc}$  și deformația plastică  $\varepsilon_p = \overline{ob}$  care persistă și după încetarea acțiunii forței exterioare. Deci,

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2.25)$$

Studierea deformării corpurilor în domeniul elastic este simplă, datorită proporționalității între tensiuni și deformații. Astfel, pe segmentele de dreaptă  $OA$  sau  $Bb$  modulul de elasticitate are o valoare constantă, la o anumită temperatură, pentru majoritatea metalelor sau aliajelor.

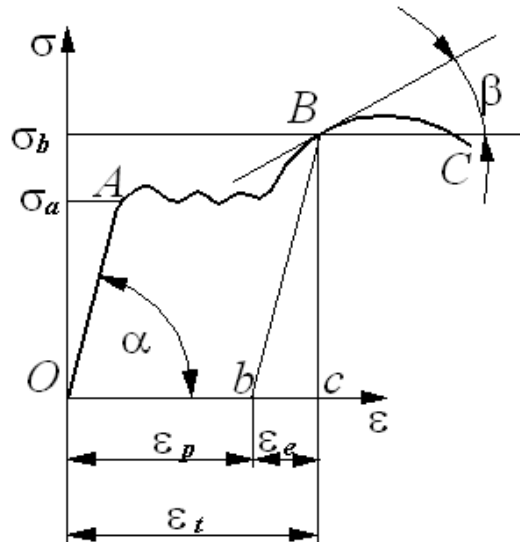


Fig.2.7. Diagrama lui Hooke

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E = \text{const.} \quad (2.26)$$

Studierea comportării metalelor la deformare în domeniul plastic este dificilă, deoarece între tensiuni și deformații nu există proporționalitate. Modulul de plasticitate  $E_p$  este o mărime care variază cu gradul de deformare, adică tangenta în punctul  $B$  va avea o valoare care depinde de poziția acestui punct de pe curba  $AC$ . Deci,

$$\operatorname{tg} \beta = E_p \neq \text{const.} \quad (2.27)$$

Din această cauză, studiarea procesului de deformare plastică se face formal cu relații deduse pentru domeniul elastic cărora li se asociază unii coeficienți de corecție. Rezultatele astfel obținute sunt aproximative și pot avea anumite erori generate de condițiile concrete de deformare. Aplicate corespunzător condițiilor concrete de deformare plastică a unui corp, relațiile din domeniul elastic permit obținerea unor rezultate satisfăcătoare pentru scopuri practice.

Drept consecință a acestei legi, la prelucrarea prin deformare plastică a materialelor, după încetarea acțiunii forțelor care produc deformarea, are loc o mică revenire elastică de o mărime care depinde de gradul de deformare, forma piesei, natura materialului și care este dificil de estimat teoretic.

### c). Legea minimei rezistențe la deformare a materialului piesei

Legea minimei rezistențe la deformarea materialului a fost stabilită pe baza analizei formei succesive pe care o iau piesele paralelipipedice supuse

deformării volumice prin lățire. Cercetările experimentale efectuate asupra unor asemenea piese au dus la următoarele concluzii:

1. orice piesă poligonală, în secțiune transversală, supusă operației de presare volumică la rece prin lățire, în prezența frecării pe suprafețele de contact cu sculele matriței, tinde spre o formă având perimetrul minim, adică, la limită, către un cerc;
2. deplasarea punctelor materiale în plan perpendicular pe direcția forței de presare are loc după normala dusă la contur;
3. într-un corp supus deformării volumice, fiecare punct material se va deplasa în direcția minimei rezistențe;
4. intensitate curgerii metalului este direct proporțională cu lungimea normalei.

Concluziile 1) și 2) au la bază consecințele deplasării punctelor materiale în direcția rezistenței minime. Deformația maximă a corpului supus deformării va avea loc în direcția în care se vor deplasa mai multe puncte materiale, adică în direcția în care se va deplasa o cantitate mai mare de material.

#### **d). Legea echilibrării tensiunilor suplimentare remanente**

Starea de tensiune și starea de deformații diferă de la punct la punct material al corpului supus deformării. Deci, deformarea unei piese va fi cu atât mai neuniformă cu cât forma sa va fi mai complexă și cu cât forțele de frecare dintre materialul acesteia și suprafețele active ale sculelor vor fi mai mari.

În timpul procesului de deformare plastică vor exista zone din semifabricat în care deformațiile nu ajung în zona deformațiilor plastice astfel încât ele rămân în domeniul elastic, fapt care duce la menținerea în masa materialului a unor tensiuni elastice remanente. Aceste tensiuni se pot înlătura prin aplicarea unor tratamente termice corespunzătoare.

#### **e). Legea similitudinii**

Legea similitudinii se referă la deformarea plastică a două piese asemenea ca formă dar diferite ca dimensiuni. Similitudinea dintre deformarea pieselor este respectată în condițiile în care: presiunile de deformare  $p_1$  și  $p_2$  au aceeași valoare, raportul forțelor de presare  $F_1$  și  $F_2$  este egal cu pătratul dimensiunilor liniare  $l_1$  și  $l_2$  ale piesei iar raportul lucrurilor mecanice  $L_1$  și  $L_2$  este egal cu raportul cuburilor dimensiunilor liniare.

$$p_1 = p_2; \quad \frac{F_1}{F_2} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2; \quad \frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \quad (2.28)$$

Pentru ca legea similitudinii să poată fi aplicată în condițiile deformării plastice a două piese asemenea este necesar ca, pe lângă relațiile (2.3.15), să fie îndeplinite și următoarele condiții:

1. ambele piese să aibă aceeași compoziție chimică, aceeași structură și aceleași caracteristici de deformare (rezistență și deformabilitate);
2. temperatura pieselor în timpul deformării să fie identică;
3. coeficienții de frecare dintre piesele supuse deformării și suprafețele active ale sculei matriței să fie aceiași.

Aceste condiții nu pot fi satisfăcute pe deplin în practică. Cu cât dimensiunile piesei vor fi mai mari cu atât materialul acesteia este mai neomogen din punct de vedere chimic și structural.

S-a constatat experimental că presiunea necesară, forța de presare și lucrul mecanic necesar deformării sunt mai mici în realitate, la piesele de dimensiuni mari, decât rezultă din legea similitudinii în comparație cu piesele mici. Aceasta se datorește, în special, structurii grosolane a materialului pieselor mari, care face ca rezistența la deformare a materialului acestora să fie mai mică.

Aplicându-se un coeficient  $\varphi$  de corecție a relațiilor (2.3.15), aplicarea legii similitudinii la prelucrarea pieselor prin deformare plastică la rece duce la rezultate mai concludente. Valoarea acestui coeficient se determină cu relația:

$$\varphi = \left[ \sqrt[3]{a} + \mu(1 - \sqrt[3]{a}) \right]^k \quad (2.29)$$

$$\text{în care: } a = \frac{l_1}{l_2} < 1 \text{ adică } l_1 < l_2;$$

$\mu$  - coeficientul de frecare dintre piesă și sculele matriței

$k$  - exponent care depinde de natura materialului ( $k=0,85 \div 0,9$  pentru metale pure și  $k=0,75 \div 0,85$  pentru aliaje).

Deci, pentru scopuri practice, legea similitudinii se va exprima prin relațiile:

$$P_1 = \varphi \cdot P_2$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \varphi \cdot \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2 \quad (2.30)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \varphi \cdot \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2$$

În scopul stabilirii unei tehnologii optime de deformare a pieselor de dimensiuni mari, se recomandă efectuarea unor cercetări experimentale privind deformabilitatea acestora și a se compara cu cea a piesei model.

## 2.5. Criterii de plasticitate

O importanță practică deosebită în studiul solicitării unui material în domeniul plastic îl constituie condițiile în care începe deformarea plastică a materialului și distrugerea acestuia. Începutul plasticității și începutul distrugerii materialului reprezintă două stări limită ale acestuia.

În studiul procesului de deformare plastică la rece a materialului, un interes special îl reprezintă cunoașterea condițiilor în care decurge deformarea plastică a materialului [9] și rezistența pe care acesta o opune deformațiilor, corespunzător diferitelor scheme ale stării de tensiune.

Starea de tensiune spațială a materialului, în cazul general, este determinată de șase mărimi în raport cu un sistem de axe oarecare [1] ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{zx}$ ) sau de trei mărimi în raport cu axele principale ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ). Numărul de combinații posibile între tensiunile normale principale la care apare starea plastică a materialului nu este mic, ca în cazul stării de tensiune liniare, ci este infinit. Infinitatea de combinații posibile între  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  reprezintă o suprafață numită suprafață limită a deformațiilor plastice

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \quad (2.31)$$

Suprafața limită a deformațiilor plastice delimitează domeniul deformațiilor elastice de cel al curgerii plastice. Cunoașterea suprafeței limită a deformațiilor plastice este necesară întrucât ea permite stabilirea combinației tensiunilor normale principale la care are loc trecerea corpului în stare plastică. Determinarea acestei suprafețe pe cale experimentală nu este încă posibilă. Teoretic, forma acestei suprafețe este definită printr-un criteriu de plasticitate, pe baza unor ipoteze.

În stare inițială, înainte de ecrusare, suprafața limită se poate exprima:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \sigma_{ech}(\sigma) - \sigma_e = 0 \quad (2.32)$$

Unde:

$\sigma_{ech}$  este tensiunea echivalentă în sensul criteriului de plasticitate

$\sigma_e$  este limita elastică a materialului în tracțiune uni-axială

Există o mare varietate de criterii de plasticitate care vizează modelarea cât mai fidel posibilă a comportamentului tablelor în domeniul plastic. Ele pot fi clasificate în două categorii mari:

- criterii izotrope
- criterii anizotrope

### 2.5.1. Criterii de plasticitate izotrope

În prezent, cele mai elocvente criterii izotrope, din punct de vedere teoretic și experimental sunt următoarele două:

1. Criteriul de plasticitate Tresca-Saint Venant (Ipoteza constanței tensiunilor tangențiale maxime)
2. Criteriul de plasticitate Huber-Hencky-Mises (Ipoteza energetică a plasticității)

#### Criteriul de plasticitate Saint-Venant

Prima formulare a condiției de plasticitate elaborată de Saint-Venant, pe baza experiențelor lui Tresca asupra curgerii materialelor moi prin orificii, sub presiune, admite că în cazul stării plastice a materialului, efortul unitar tangențial maxim este constant.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = k \quad (2.33)$$

Potrivit acestui criteriu, domeniul stării plastice a metalului începe în momentul în care tensiunile tangențiale ajung la o anumită valoare maximă, specifică materialului respectiv și rămân constante în decursul întregului proces al deformării plastice.

Tensiunile tangențiale maxime sunt date de următoarele relații:

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \quad (2.34)$$

În cazul stării de tensiune liniară la întindere,

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0; \sigma_1 \neq 0; \sigma_1 = \sigma_c$$

De unde rezultă că:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma_c}{2} \quad (2.35)$$

În acest fel, conform ipotezei constanței tensiunii tangențiale maxime, pentru trecerea materialului în domeniul plastic este necesar ca diferența a două tensiuni normale principale extreme să fie egală cu limita de curgere  $\sigma_c$  corespunzătoare întinderii simple, independent de valoarea celei de-a treia tensiuni normale principale. Pentru orice stare de tensiune, această condiție de plasticitate se va scrie sub forma următoare:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c$$

Această ipoteză de plasticitate corespunde suficient de exact cu rezultatele experimentale, în special pentru metale și aliaje cu o plasticitate bună.

Condiția ca efortul tangențial maxim să fie constant corespunde experiențelor făcute cu materiale supuse la presiuni hidrostactice mari, cu care ocazie se observă apariția suprafețelor de lunecare în interiorul corpului.

#### Criteriul de plasticitate Huber-Henkey-Mises

Conform acestui criteriu, pentru o stare oarecare de solicitare, deformațiile plastice se produc atunci când în unitatea de volum a materialului deformat se acumulează o cantitate de energie potențială de modificare a formei determinată și care nu depinde de starea de tensiune. Această energie potențială se exprimă cu relația [1,5]:

$$W_f = \frac{1+\nu}{6E} \cdot \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = k \quad (2.36)$$

În care:

$\nu$  - coeficientul lui Poisson

$E$  - modulul de elasticitate longitudinal

Valoarea constantei  $k$  se obține aplicând relația pentru solicitarea de compresiune simplă, cu  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ,  $\sigma_3 = -\sigma_c$

$$\frac{1+\nu}{3E} \cdot \sigma_c^2 = k \quad (2.37)$$

În acest fel, criteriul de plasticitate Huber-Henkey-Mises se scrie:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \cdot \sigma_c^2 \quad (2.38)$$

Respectiv

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.39)$$

Mărimea

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.40)$$

se numește intensitate a eforturilor unitare.

În consecință, în timpul deformației plastice, intensitatea eforturilor unitare rămâne constantă.

$$\sigma_i = \sigma_c$$

Efectuarea calculelor în scopuri practice cu relația (2.39) este oarecum anevoioasă. Din această cauză, s-a stabilit o relație echivalentă cu (2.41) din punct de vedere cantitativ, cu care se operează mai rapid:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta' \cdot \sigma_c \quad (2.41)$$

Unde:

$$\beta' = \frac{2}{\sqrt{3}} \cong 1,15$$

și reprezintă un coeficient care ține seama de influența tensiunilor normale principale medii ( $\sigma_2$ ) în procesul de deformare.

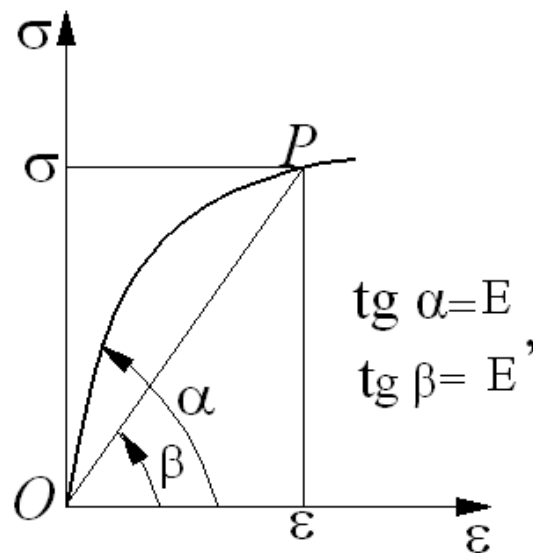
Verificată experimental pentru oțel, nichel și cupru, relația (2.41) permite efectuarea calculelor cu o eroare de maximum 3%.

Pentru un punct oarecare  $P$  (Fig.2.8) situat pe partea de curbă caracteristică a unui oțel din domeniul plastic, pentru o stare biaxială sau triaxială de solicitare plastică se poate scrie relația:

$$\sigma_i = E' \cdot \varepsilon_i \quad (2.42)$$

Unde:

$E' = \operatorname{tg} \beta$  este panta liniei  $OP$



**Fig.2.8. Curba caracteristică a unui oțel**

O constatare experimentală importantă este că deformația volumică specifică:

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (2.43)$$

Sau:

$$e = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.44)$$



este numai elastică, chiar și în timpul deformațiilor plastice. Rezultă că deformația plastică se face la volum constant.

Dacă se consideră deformația volumică specifică a unei bare solícitate la întindere:

$$e = \varepsilon - \nu \cdot \varepsilon = \varepsilon \cdot (1 - 2\nu) \quad (2.45)$$

și se pune condiția ca ea să fie nulă, rezultă că în timpul deformației plastice,  $\nu = 0,5$

Întrucât relația (2.42) nu depinde de starea de solícitate, ea este aplicabilă și întinderii simple ( unde  $\sigma_i = \sigma$  ,  $\varepsilon_i = \varepsilon$  ) și se va scrie:

$$\sigma = E' \cdot \varepsilon \quad (2.46)$$

Unde mărimea  $E'$  , pentru diferite valori ale lui  $\sigma$  se poate lua chiar de pe curba caracteristică la întindere.

### 2.5.2. Criterii de plasticitate anizotrope

Comportamentul multor materiale poate varia în funcție de direcția de solícitate [25,40,27]. În aceste condiții, materialul este denumit anizotrop. Ortotropia este o anizotropie particulară care se caracterizează prin trei plane de simetrie ale căror intersecții determină trei axe rectangulare de ortotropie (x,y,z).

Comportamentul tablelor laminate se înscrie adesea în cadrul unei anizotropii ortotrope pentru care reperul (x,y,z) se identifică prin:

X: - direcția de laminare

Y: - direcția perpendiculară pe direcția de laminare.

Z: - direcția normală la planul tablei (plăcii )

Pentru definirea unui criteriu anizotrop se introduce coeficientul lui Lankford [40]  $r$  ca o stare de măsură a raportului dintre deformația plastică laterală  $\varepsilon_{22}^P$  și deformația plastică în grosime  $\varepsilon_{33}^P$  a unei epruvete supusă la tracțiune uniaxială.

$$r = \frac{\varepsilon_{22}^P}{\varepsilon_{33}^P} \quad (2.47)$$

În practică se obișnuiește să se identifice coeficienții lui Lankford ( $r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$ ) pentru trei orientări particulare definite la  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  și  $90^\circ$  față de direcția de laminare și de un coeficient de anizotropie mediu.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.48)$$

Și un interval  $\Delta r$  :

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.49)$$

Când  $\bar{r} \neq 1$  și  $\Delta r \neq 0$  anizotropia este transversă

Când  $\bar{r} \neq 1$  și  $\Delta r = 0$  anizotropia este normală care se exprimă printr-o izotropie în planul tablei (plăcii) și o anizotropie pe direcția grosimii ei ( $\bar{r} \neq 1$ ).

Când  $r_0 = r_{45} = r_{90} = 1$  sau altfel spus  $\bar{r} = 1$  și  $\Delta r = 0$  criteriul de plasticitate este izotrop.

a) Criteriul patratic al lui Hill 48

Hill este primul cercetător care a propus un criteriu ce ține cont de anizotropia inițială a materialului și în particular, a materialelor metalice. Criteriul propus de Hill (în 1948) este un criteriu pătratic ce se exprimă în reperul ortotrop  $x, y, z$  prin:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^2 = & F \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + G \cdot (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H \cdot (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \\ & + 2 \cdot L \cdot \sigma_{yz}^2 + 2 \cdot M \cdot \sigma_{zx}^2 + 2 \cdot N \cdot \sigma_{xy}^2 \end{aligned} \quad (2.50)$$

În care:

$\bar{\sigma}$  este tensiunea echivalentă în sensul criteriului lui Hill 48 și ( $F, G, H, L, M$  și  $N$ ) sunt parametri lui Hill care determină forma suprafeței limită a deformațiilor plastice și gradul său de anizotropie.

Cu ajutorul ipotezei tensiunilor plane, care ies din planul tablei (plăcii) metalice ( $\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$ ), criteriul lui Hill se reduce la expresia următoare:

$$\bar{\sigma}^2 = (G + H) \cdot \sigma_{xx}^2 - 2 \cdot H \cdot \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} + (F + H) \cdot \sigma_{yy}^2 + 2 \cdot N \cdot \sigma_{xy}^2 \quad (2.51)$$

Numărul de parametri cu care se exprimă criteriul se reduce la patru ( $F, G, H$  și  $N$ ) care după efectuarea unor calcule pot fi definiți prin expresiile:

$$F = \frac{r_0}{(1 + r_0)2r_{90}} \quad (2.52)$$

$$G = \frac{1}{1 + r_0} \quad (2.53)$$

$$H = \frac{r_0}{1 + r_0} \quad (2.54)$$

$$N = \frac{(1 + 2r_{45})(r_0 + r_{90})}{2r_{90}(1 + r_0)} \quad (2.55)$$

b) Criteriul non patratric al lui Hill (1979)

Acest criteriu este valabil doar în cazul în care direcțiile principale ale tensorului tensiunilor coincid cu direcțiile de ortotropie a materialului. În acest caz, criteriul se scrie sub următoarea formă:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}^m = & f|\sigma_2 - \sigma_3|^m + g|\sigma_3 - \sigma_1|^m + h|\sigma_1 - \sigma_2|^m + \\ & + a|2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3|^m + b|2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1|^m + c|2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2|^m \end{aligned} \quad (2.56)$$

În care:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  sunt tensiunile principale

$a, b, c, f, g, h$  sunt corespondenți ai parametrilor criteriului care se determină plecând de la limitele elastice ale coeficientului lui Lankford

Pentru o stare de anizotropie normală (definită printr-un coeficient  $\bar{r}$ , condiția de convexitate a criteriului este asigurată pentru  $m > 1$ . În aceste condiții, criteriul se exprimă astfel:

$$|\sigma_1 + \sigma_2|^m + (1 + 2\bar{r})|\sigma_1 - \sigma_2|^m = 2(1 + \bar{r})\bar{\sigma}^m \quad (2.57)$$

Coeficientul  $m$  se deduce din relația:

$$m = \frac{\ln[2(1 + \bar{r})]}{\ln(2/\alpha_b)} \quad (2.58)$$

Unde:

$\alpha_b$  reprezintă raportul experimental al tensiunilor

$$\alpha_b = \frac{\sigma_0}{\sigma_b} \quad (2.59)$$

c) Criteriul non patratic al lui Hosford (1979)

Criteriul non patratic al lui Hosford ține cont de structura cristalografică a metalului. Conform acestui criteriu, suprafața de încărcare se exprimă printr-o aproximație polinomială de forma:

$$(1 + r_0)\bar{\sigma}^a = r_0|\sigma_2|^a + r_{90}|\sigma_1|^a + r_0r_{90}|\sigma_1 - \sigma_2|^a \quad (2.60)$$

Unde exponentul  $a$  are următoarele valori:

$a = 6$  pentru structuri cristalografice cubice centrate

$a = 8$  pentru structuri cristalografice cubice cu fețe centrate

Pentru o anizotropie normală, criteriul se scrie:

$$(1 + \bar{r})\bar{\sigma}^a = |\sigma_1|^a + |\sigma_1|^a + \bar{r}|\sigma_1 - \sigma_2|^a \quad (2.61)$$

## **2.6. Concluzii**

În acest capitol am prezentat principalele noțiuni care stau la baza studiului teoretic al fenomenelor care se produc în materiale la deformarea plastică a acestora.

În acest sens am făcut o scurtă prezentare a **stării generale de eforturi unitare și deformații** din materialele supuse prelucrărilor prin deformare plastică din care se pot desprinde următoarele concluzii:

- în scopul determinării forței necesare deformării plastice la rece a metalelor este necesară cunoașterea stării de tensiune a metalelor exprimată prin tensorul tensiunilor într-un punct (relația 2.1 în cazul general) sau prin relația (2.2) în funcție de mărimile eforturilor unitare principale;

- în procesele tehnologice de deformare plastică la rece a materialelor apar atât stări de tensiune plană cât și stări de tensiune spațială;

- deformarea plastică hidraulică a tablelor subțiri se caracterizează printr-o stare plană de tensiune care, în vederea simplificării calculelor, poate fi asimilată cu o solicitare de solicitare de întindere produsă după două direcții perpendiculare;

- repartiția tensiunilor într-un corp supus deformării plastice hidraulice este definită de ecuațiile de echilibru (relațiile 2.6, 2.7, 2.8) ale unui volum elementar de material ales arbitrar din corpul respectiv;

- starea de eforturi unitare în jurul unui punct din interiorul unui element de volum al unui corp generează o stare de deformații unitare, care este reprezentată prin tensorul deformațiilor (relația 2.11 în cazul cel mai general, sau relația 2.14 în cazul deformațiilor liniare principale).

Am prezentat **legile de bază ale deformării plastice** care stau la baza deformării plastice la rece a materialelor:

a). Legea constanței volumului materialului piesei la deformare conform căreia volumul materialului pieselor în procesul de deformare plastică la rece rămâne constant. Această lege se exprimă matematic prin relația (2.19);

b). Legea prezentei deformațiilor elastice în procesul deformării plastice care afirmă că procesul de deformare plastică a materialelor metalice este însoțit de deformații plastice, motiv pentru care studierea procesului de deformare plastică se

face cu relații deduse pentru domeniul elastic cărora li se afectează unii coeficienți de corecție. Drept consecință a acestei legi, la prelucrarea prin deformare plastică a materialelor, după încetarea acțiunii forțelor care produc deformarea, are loc o mică revenire elastică de o mărime care depinde de gradul de deformare, forma piesei, natura materialului și care este dificil de estimat teoretic;

c). Legea minimei rezistențe la deformare a materialului piesei conform căreia deformația maximă a corpului supus deformării va avea loc în direcția rezistenței minime, direcție în care se vor deplasa mai multe puncte materiale din corp;

d). Legea echilibrării tensiunilor suplimentare remanente

În timpul procesului de deformare plastică vor exista zone din semifabricat în care deformațiile nu ajung în zona deformațiilor plastice astfel încât ele rămân în domeniul elastic, fapt care duce la menținerea în masa materialului a unor tensiuni elastice remanente;

e). Legea similitudinii care se referă la deformarea plastică a două piese asemenea ca formă dar diferite ca dimensiuni. Similitudinea dintre deformarea pieselor este respectată în condițiile în care: presiunile de deformare  $p_1$  și  $p_2$  au aceeași valoare, raportul forțelor de presare  $F_1$  și  $F_2$  este egal cu pătratul dimensiunilor liniare  $l_1$  și  $l_2$  ale piesei iar raportul lucrurilor mecanice  $L_1$  și  $L_2$  este egal cu raportul cuburilor dimensiunilor liniare.

Am prezentat **criteriile de plasticitate** pentru diferite materiale punându-se în evidență comportamentul izotrop sau anizotrop al acestora.

La studiul deformării plastice la rece a materialelor cele mai uzuale criterii de plasticitate sunt **criteriile de plasticitate izotrope** și anume:

1. Criteriul de plasticitate Tresca-Saint Venant (Ipoteza constanței tensiunilor tangențiale maxime) se referă la curgerea prin presiune a materialelor moi prin orificii. Conform acestui criteriu în cazul stării plastice a materialului, efortul unitar tangențial maxim este constant;

2. Criteriul de plasticitate Huber-Hencky-Mises (Ipoteza energetică a plasticității). Conform acestui criteriu, pentru o stare oarecare de solicitare, deformațiile plastice se produc atunci când în unitatea de volum a materialului deformat se acumulează o cantitate de energie potențială de modificare a formei determinată și care nu depinde de starea de tensiune.

Comportamentul multor materiale poate varia în funcție de direcția de solicitare. În aceste condiții, materialul este denumit anizotrop impunându-se utilizarea **criteriilor de plasticitate anizotrope** din care am prezentat:

1. Criteriul patratic al lui Hill 48 cu ajutorul căruia se poate determina tensiunea echivalentă precum și forma suprafeței limită a deformațiilor plastice și gradul său de anizotropie;

2. Criteriul non patratic al lui Hill (1979) care este valabil doar în cazul în care direcțiile principale ale tensorului tensiunilor coincid cu direcțiile de ortotropie a materialului;

3. Criteriul non patratic al lui Hosford (1979) care ține cont de structura cristalografică a metalului. Conform acestui criteriu, suprafața de încărcare se exprimă printr-o aproximație polinomială.

Noțiunile teoretice prezentate în cadrul acestui capitol au un caracter general, aplicarea lor făcându-se în conformitate cu situația concretă a unui anumit tip de deformare.

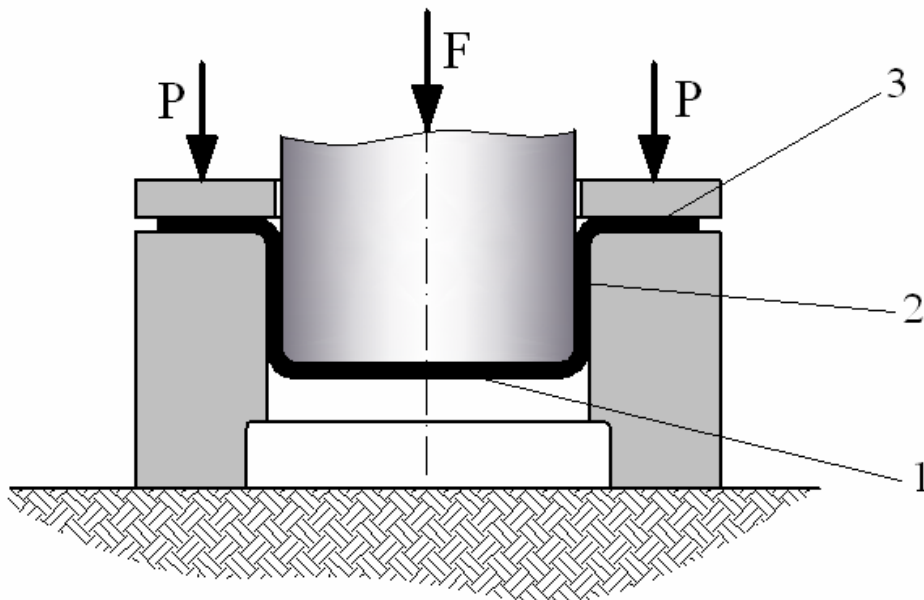
### CAPITOLUL 3

## CERCETĂRI TEORETICE CU PRIVIRE LA DEFORMAREA PLASTICĂ CU DEFORMAȚII MARI A UNEI MEMBRANE (PLĂCI SUBȚIRI) SUB ACȚIUNEA PRESIUNII HIDRAULICE

### 3.1. Elemente comparative referitoare la ambutisarea clasică și deformarea plastică hidraulică a plăcilor subțiri

Starea de tensionare a materialului în cazul deformării plastice hidraulice [42,7] este esențial modificată față de cea cunoscută de la ambutisarea cu poanson rigid.

În cazul ambutisării cu poanson rigid, deformările care se produc în materialul semifabricat sunt prezentate în Fig.3.1.

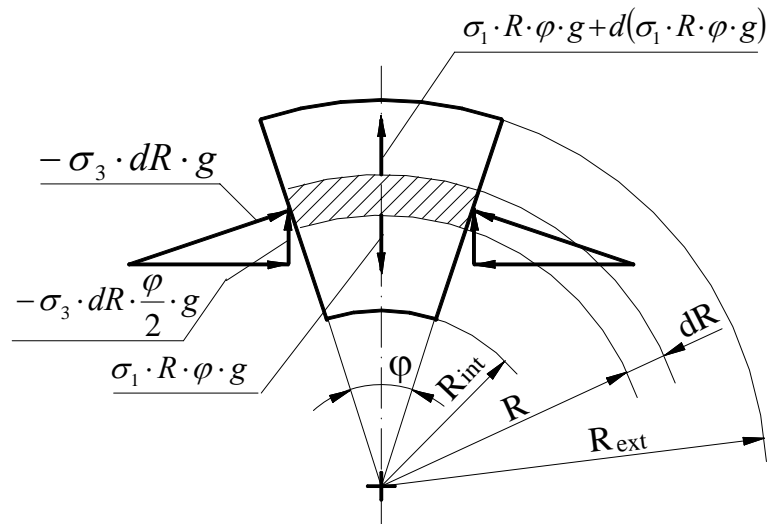


**Fig.3.1. Deformările semifabricatului la ambutisarea cu poanson rigid**

În zona 1 există o întindere plană a materialului iar solicitările sunt foarte reduse, practic neglijabile, datorită frecărilor coulombiene care apar între poanson și semifabricat. De aceea, pe această zonă, grosimea peretelui produsului ambutisat este practic egală cu grosimea semifabricatului.

În zona 2, materialul este supus unei întinderi liniare după direcția radială a semifabricatului care are drept consecință modificarea grosimii semifabricatului, în sensul micșorării acesteia dinspre zona de flanșă spre zona frontală a poansonului, deformații legate de modificarea formei acestuia (formă plană transformată în formă cilindrică).

În zona 3 apar solicitări specifice ambutisării, și anume cele de întindere radială, compresiune tangențială și compresiune axială. Valoarea solicitărilor din această zonă este considerată în literatura de specialitate [5] ca fiind determinată de condițiile de echilibru ale unei porțiuni elementare de semifabricat. (Fig.3.2).



**Fig.3.2. Solicitățile semifabricatului în zona flanșei la ambutisarea cu poanson rigid**

$$\sigma_{amb} = 1,1\sigma_{d_{med}} \ln \frac{R_{ext}}{R_{int}} + \frac{\mu P}{\pi R_{ext} \cdot g} \quad (3.1)$$

unde:

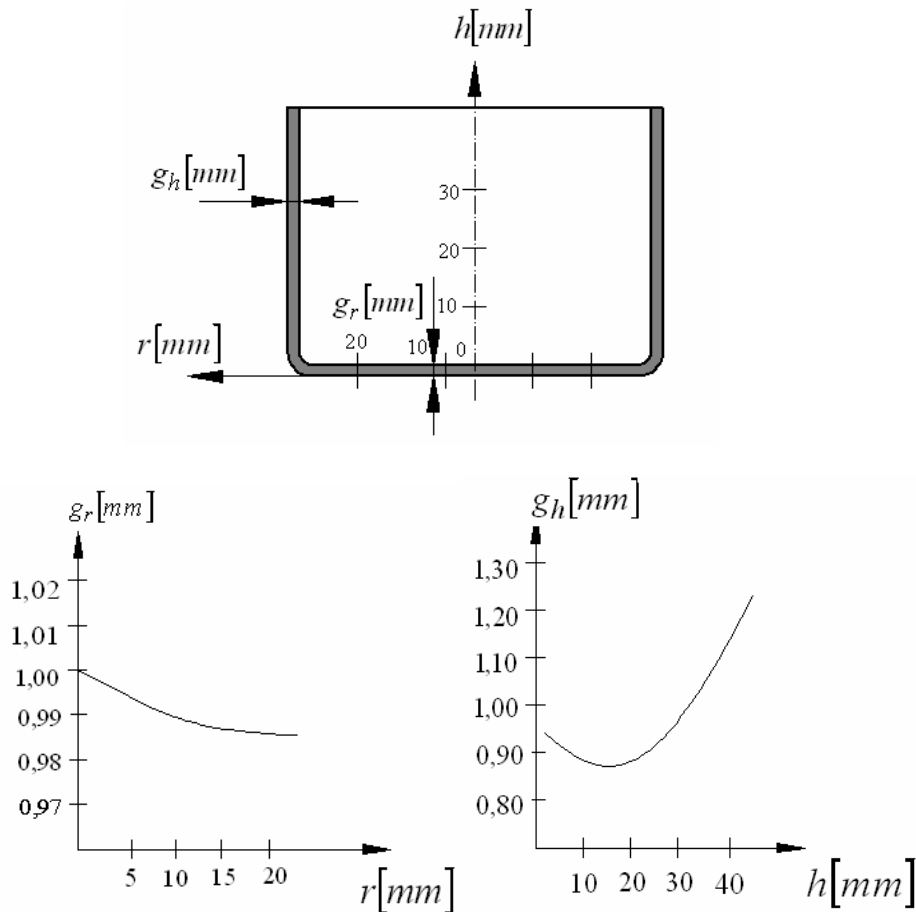
$$\sigma_{d_{med}} = \frac{\sigma_{ext} + \sigma_{int}}{2} \quad (3.2)$$

$P$  - forța cu care este fixat semifabricatul

$\mu$  - coeficientul de frecare dintre semifabricat și poanson

$\sigma_{ext}$  și  $\sigma_{int}$  - tensiunile de întindere corespunzătoare razelor  $R_{ext}$  și  $R_{int}$

În ceea ce privește **porțiunile de trecere dintre zonele 1 și 2 respectiv 2 și 3** apar solicitări suplimentare datorate încovoierii semifabricatului pe muchiile poansonului respectiv ale plăcii de ambutisare și ale frecărilor pe aceste muchii. Corespunzător stării de tensiuni indicate apare și variația grosimii peretelui piesei ambutisate prezentată în Fig.3.3.



**Fig.3.3. Variația grosimii peretelui piesei ambutisate**

În cazul deformării plastice hidraulice se menține într-o oarecare măsură similitudinea condițiilor de deformare doar pentru zona 3 a semifabricatului astfel încât relația (3.1) își păstrează valabilitatea.

Zona centrală a semifabricatului suferă însă deformații cu totul deosebite.

Pentru a aprecia situația tensionării și a deformațiilor din această zonă se formulează următoarele ipoteze de calcul:

- Se asimilează dispozitivul de lucru al deformării plastice hidraulice cu încărcarea unei plăci subțiri circulare de grosime  $h$  supusă la o presiune hidraulică  $p$  a lichidului de lucru;
- Datorită frecării semifabricatului pe porțiunea sa externă de flanșă, în scopul reținerii cutelor, fixare care însă permite o alunecare a acestei porțiuni înspre centru, calculele se vor efectua pentru situația unei plăci semiîncastrate după un contur circular de rază  $R$ .

În timpul procesului de deformare a plăcii se disting trei stări de tensiune care succed pe măsură creșterii sarcinii uniform distribuite care încarcă placa și anume:

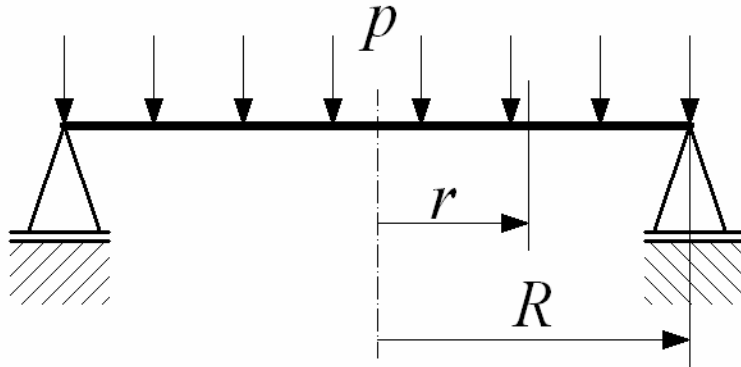
- starea de tensiune pur elastică;



- starea de tensiune elasto-plastică;
- starea de tensiune pur plastică.

Pentru starea de tensiune pur elastică valoarea solicitării radiale  $\sigma_r$  pentru un punct oarecare de pe un cerc de rază  $r$  a plăcii va fi:

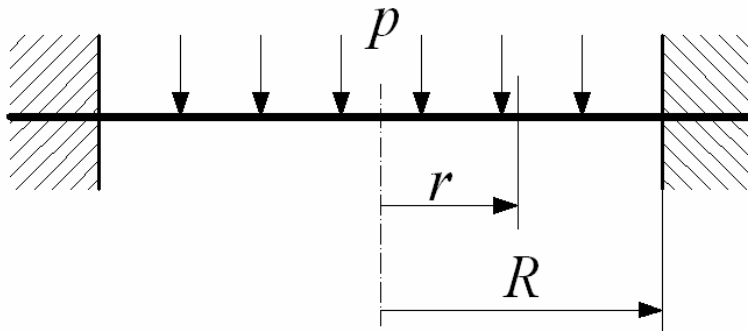
a) Pentru placă circulară simplu rezemată pe contur :



**Fig. 3.4. Placă circulară simplu rezemată pe contur**

$$\sigma_{r_1} = \frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left[ \left( 1 + \frac{3}{\mu} \right) \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \right] \quad (3.3)$$

b) Pentru placa circulară încastrată pe contur:



**Fig. 3.5. Placă circulară încastrată pe contur**

$$\sigma_{r_2} = -\frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left[ \left( \frac{3}{\mu} + 1 \right) \frac{r^2}{R^2} - \left( \frac{1}{\mu} + 1 \right) \right] \quad (3.4)$$

unde:

$$F = p\pi R^2$$

$\mu$  - coeficientul lui Poisson

c) Pentru placă circulară semiîncăstrată pe contur:

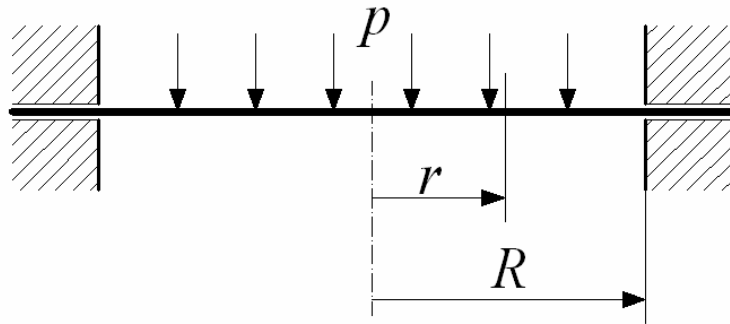


Fig. 3.6. Placă circulară semiîncăstrată pe contur

socotind:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{r_1} + \sigma_{r_2}}{2} \text{ rezultă:}$$

$$\sigma_r = -\frac{3F\mu}{16\pi h^2} \left[ \left( 1 + \frac{3}{\mu} \right) \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \left( \frac{3}{\mu} + 1 \right) \frac{r^2}{R^2} + \left( \frac{1}{\mu} + 1 \right) \right] \quad (3.5)$$

respectiv:

$$\sigma_r = -\frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left[ \left( \frac{2}{\mu} + 1 \right) - \left( 1 + \frac{3}{\mu} \right) \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (3.6)$$

Solicitarea radială maximă  $\sigma_{r_{\max}}$  se va găsi pentru valoarea

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \text{ sau,}$$

$$\frac{3F\mu}{4\pi h^2} \left(1 + \frac{3}{\mu}\right) \frac{r}{R^2} = 0 \quad (3.7)$$

identitate care apare pentru  $r = 0$

Prin urmare, pentru cazul analizat, solicitarea radială maximă intervine în centrul plăcii având mărimea:

$$\sigma_{r_{\max}} = -\frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left(\frac{2}{\mu} + 1\right) \quad (3.8)$$

Valoarea solicitărilor radiale se micșorează odată cu îndepărtarea de centrul plăcii în conformitate cu relația anterioară.

În ceea ce privește valoarea solicitărilor tangențiale  $\sigma_t$  din placă pentru un punct oarecare de pe un cerc de rază  $r$  a plăcii vom avea:

a) Pentru placa circulară simplu rezemată pe contur:

$$\sigma_{t_1} = -\frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left[ \left(1 + \frac{3}{\mu}\right) - \left(3 + \frac{1}{\mu}\right) \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (3.9)$$

b) Pentru placa circulară încastrată pe contur:

c)

$$\sigma_{t_2} = \frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left[ \left(\frac{1}{\mu} + 3\right) \frac{r^2}{R^2} - \left(\frac{1}{\mu} + 1\right) \right] \quad (3.10)$$

d) Pentru placa circulară semiîncastrată pe contur, socotind:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{t_1} + \sigma_{t_2}}{2} \quad (3.11)$$

rezultă:

$$\sigma_t = -\frac{3F\mu}{16\pi h^2} \left[ \left(1 + \frac{3}{\mu}\right) - \left(3 + \frac{1}{\mu}\right) \frac{r^2}{R^2} - \left(\frac{1}{\mu} + 3\right) \frac{r^2}{R^2} + \left(\frac{1}{\mu} + 1\right) \right] \quad (3.12)$$

respectiv:

$$\sigma_t = -\frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left[ \left( \frac{2}{\mu} + 1 \right) - \left( 1 + \frac{3}{\mu} \right) \frac{r^2}{R^2} \right] \quad (3.13)$$

Solicitarea tangențială explicitată în relația (3.13) după cum se vede are aceeași valoare ca și solicitarea radială care a fost exprimată în relația (3.5)

Deci și pentru acest caz, solicitarea maximă va fi în centrul piesei unde tensiunea tangențială ia valoarea:

$$\sigma_{t_{\max}} = -\frac{3F\mu}{8\pi h^2} \left( \frac{2}{\mu} + 1 \right) \quad (3.14)$$

În domeniul elastic apare proporționalitatea dintre solicitări și deformații, corelarea dintre ele fiind dată prin expresia matematică:

$$\varepsilon_{x,y,z} - \varepsilon = \frac{1}{2G} (\sigma_{x,y,z} - \sigma) \quad (3.15)$$

în care:

$\varepsilon_{x,y,z}$  reprezintă alungirile după axele  $O_x, O_y, O_z$  iar  $\varepsilon$  reprezintă alungirea medie

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z}{3} \quad (3.16)$$

și  $\sigma_{x,y,z}$  sunt tensiunile după axele  $O_x, O_y, O_z$ , iar:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (3.17)$$

reprezintă tensiunea normală medie

$G$  - modulul de elasticitate transversal al materialului, care are o grosime constantă

Corespunzător situației solicitării radiale și solicitării tangențiale maxime în centru, în această zonă apar și alungirile maxime, ceea ce determină ca porțiunea centrală a semifabricatului să ia forma unei calote.

Situația analizată prezintă, prin urmare o variație a tensiunilor radiale și tangențiale de o alură asemănătoare plăcii simplu rezemate pe contur, mărimile acestor tensiuni fiind însă diferite. Această situație face să apreciem că și modul de

aparitie și de propagare a deformațiilor plasto-elastice va fi asemănător aceluia de la plăcile circulare simplu rezemate pe contur. Pentru aceste plăci starea de tensiune plasto-elastică apare în punctul de centru al suprafețelor limită ale plăcii și apoi se propagă atât în profunzimea plăcii după grosime cât și pe zone circulare centrale din ce în ce mai largi ( Fig.3.7).

Cu creșterea încărcării, starea de tensiuni pur plastice se extinde asupra întregii plăci de rază  $R$  și grosime  $h$ .

În domeniul plastic al stării de tensionare la care se ajunge în final corelația dintre sollicitare și deformații este dată de expresia:

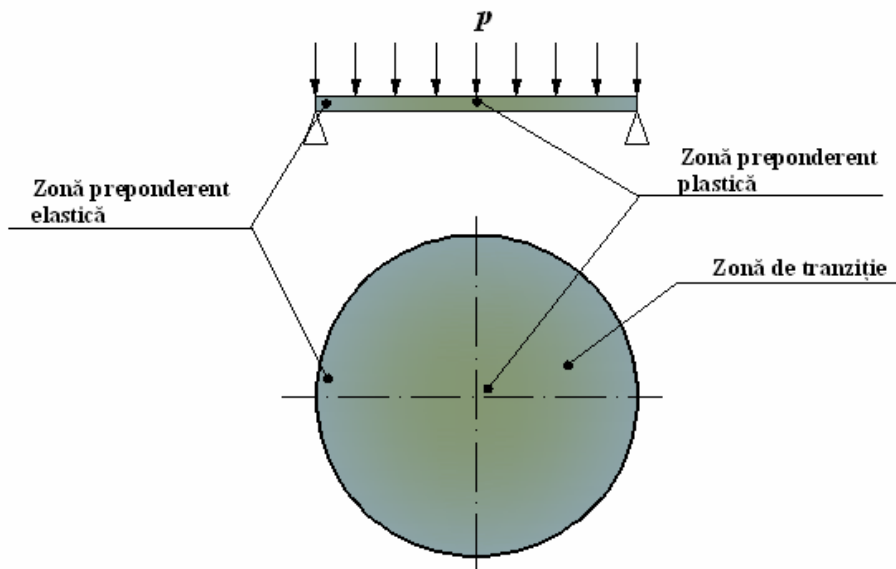
$$\varepsilon_{x,y,z} - \varepsilon = \frac{\varphi}{2G} (\sigma_{x,y,z} - \sigma) \quad (3.18)$$

sau, întrucât pentru deformații plastice mari  $\varepsilon$  care caracterizează variația de volum se apropie de zero, rezultă:

$$\varepsilon_{x,y,z} = \frac{\varphi}{2G} (\sigma_{x,y,z} - \sigma) \quad (3.19)$$

unde:

$\frac{\varphi}{2G}$  - coeficient de mărime variabilă, funcția  $\varphi$  depinzând de caracteristicile semifabricatului în ceea ce privește materialul acestuia.



**Fig.3.7. Starea de tensiune elasto-plastică la inițierea deformării**

Întrucât solicitările maxime se mențin în centrul piesei, deformațiile cele mai pronunțate se vor menține și chiar accentua în zona centrală a semifabricatului, accentuarea deformațiilor centrale explicându-se ca o consecință a următoarelor două fapte:

- 1) În stadiul stării de tensionare elasto-plastice, în zona circulară centrală (Fig.3.7), pentru aceleași variații ale solicitării ( $\Delta\sigma_r$  și  $\Delta\sigma_t$ ) vor apărea variații de alungiri  $\Delta\varepsilon_r$ , respectiv  $\Delta\varepsilon_t$  mai mari decât în zona inelară dinspre periferia piesei unde solicitările sunt preponderent elastice.
- 2) În stadiul stării de tensionare pur plastice, acțiunea presiunii lichidului de lucru se exercită asupra semifabricatului ai cărui pereți au suferit în stadiile anterioare variații sensibile de grosime

Întrucât în studiile anterioare deformațiile erau mai mari în zona centrală a piesei, tot aici au apărut și subțieri mai pronunțate ale pereților acesteia și ca atare, efectele presiunii lichidului de lucru se resimt puternic în această zonă. Dat fiind că ambutisările adânci se realizează în condițiile unor deformații plastice puternice ale materialului, iar acestea au loc la volum constant, derivă că pe măsura alungirilor tot mai pronunțate ale materialului înspre centrul semifabricatului, grosimea pereților vasului se va subția din ce în ce mai mult în porțiunea centrală a calotei, care devine în acest fel zona periculoasă de rupere.

Teoria dezvoltată anterior se referă la placa plană în diferite situații de încărcare până la momentul inițierii deformărilor plastice mari.

### **3.2. Descrierea analitică a tensiunilor și deformațiilor plăcilor circulare subțiri încastrate pe contur supuse unor presiuni hidraulice la solicitarea în domeniul plastic cu deformații mari**

#### **3.2.1. Considerații generale**

În teoria deformației plastice[36] pentru materiale plastice ideale în planele principale, unde acționează deformațiile liniare principale, deformațiile unghiulare sunt nule astfel încât atunci când planele de referință coincid cu planele principale, starea de deformare a unui corp este complet determinată dacă se cunosc componentele deformațiilor liniare principale, iar între acestea există relația:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (3.20)$$

Relațiile de mai sus conduc la rezultate mai exacte numai în cazul deformațiilor mici, când deformarea este uniformă. În cazul deformațiilor mari, relațiile stabilite dau erori, iar aceste erori vor fi cu atât mai mari cu cât volumul de material considerat va fi mai mare.

În problemele de deformare plastică axial simetrică direcțiile axelor tensiunilor principale  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  rămân fixe în timpul încărcării, iar rapoartele dintre deformațiile principale și tensiuni principale rămân constante pe direcțiile axelor tensiunilor principale, adică:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (3.21)$$

$$\tau = \tau(\gamma) \quad (3.22)$$

unde:

$$\tau = \frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (3.23)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad (3.24)$$

Înlocuind (3.20) și (3.21) în (3.23) și (3.24), obținem:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{\tau} \left[ \sigma_1 - \frac{1}{2} (\sigma_2 + \sigma_3) \right] \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{r\tau} \left[ \sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_3 + \sigma_1) \right] \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{\tau} \left[ \sigma_3 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) \right] \quad (3.27)$$

În problemele de tensiuni plane:

$$\sigma_3 = 0$$

Dacă se iau în considerare coordonatele cilindrice, direcțiile principale 1, 2 și 3 din ecuațiile anterioare devin direcții radiale, circumferențiale respectiv axiale. Astfel, ecuațiile de mai sus devin:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0 \quad (3.28)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_r^2 - \sigma_z \sigma_\theta + \sigma_\theta^2)^{1/2} \quad (3.29)$$

$$\gamma = 2\sqrt{\frac{2}{3}}(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_r\varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2)^{1/2} \quad (3.30)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{\tau} (\sigma_r - \frac{1}{2} \sigma_\theta) \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{\tau} (\sigma_\theta - \frac{1}{2} \sigma_r) \quad (3.32)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{\tau} [-\frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta)] = -(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \quad (3.33)$$

Dacă  $\sigma_r$  și  $\sigma_\theta$  se exprimă în termeni de  $\varepsilon_r$  și  $\varepsilon_\theta$ , se obține:

$$\sigma_r = 2 \frac{\tau}{\gamma} (2\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \quad (3.34)$$

$$\sigma_\theta = 2 \frac{\tau}{\gamma} (2\varepsilon_\theta + \varepsilon_r) \quad (3.35)$$

Relațiile de mai sus conduc la rezultate mai exacte numai în cazul deformațiilor mici, când deformarea este uniformă. În cazul deformațiilor mari, relațiile stabilite dau erori, iar aceste erori vor fi cu atât mai mari cu cât volumul de material considerat va fi mai mare.

### 3.2.2. Aplicarea teoriei deformațiilor plastice mari pentru o placă circulară subțire încadrată pe contur supusă unei presiuni hidraulice la deformare liberă

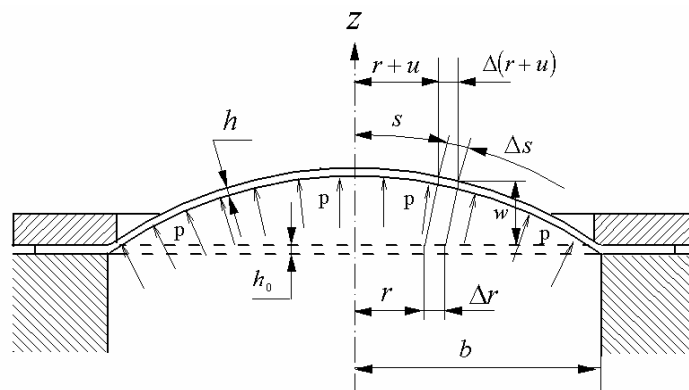


Fig.3.8. Placă circulară subțire sub presiune încadrată pe contur



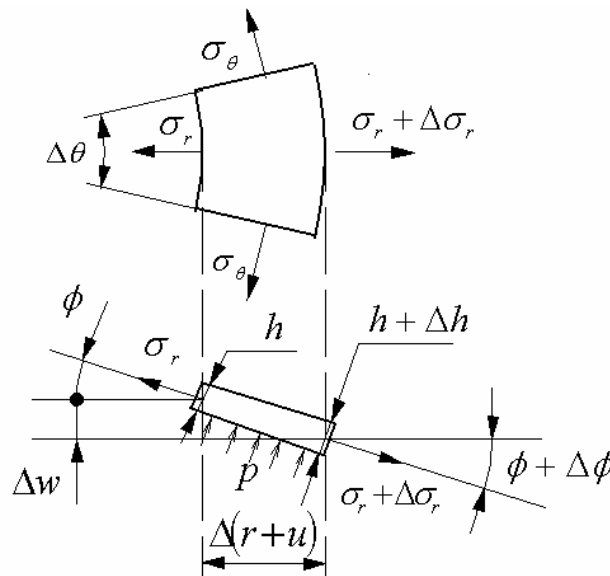
O metodă complexă de descriere a deformării plastice [36] a unei plăci supuse unei presiuni hidraulice ar permite determinarea tensiunilor și deformațiilor plăcii ținând cont de modificarea grosimii plăcii în timpul deformării fără să se țină seama de eventuale modificări ale caracteristicilor mecanice ale probei datorită ecruisării materialului acesteia.

Ecuțiile de echilibru și ecuațiile de deformații sunt exprimate în teoria de membrană considerând următoarea schemă de încărcare (Fig.3.8):

Placa circulară subțire încastrată pe contur din Fig.3.8 este supusă unei presiuni hidraulice până la apariția unor tensiuni care depășesc limita de elasticitate și limita de curgere astfel încât placa suportă deformații plastice foarte mari. În urma acestor deformații, datorită distribuției tensiunilor produse în placă apare o variație pronunțată a grosimii plăcii care poate fi estimată dificil din punct de vedere teoretic. După depășirea acestei limite relația dintre presiunea aplicată asupra plăcii și deformația acesteia devine aleatoare.

#### Ecuții de echilibru

Ecuțiile de echilibru ale plăcii se scriu pentru un element de placă  $\Delta S$  așezat la distanța  $r+u$  față de centrul plăcii (Fig.3.8), ale cărui formă și dimensiuni sunt prezentate în Fig. 3.9.



**Fig.3.9. Element de placă în stare deformată**

Datorită complexității solicitării, dimensiunile inițiale ale unui segment de placă se modifică atât din punct de vedere al formei suprafeței cât și al grosimii. Această variație a formei unui element din placa deformată este prezentat în figura de mai sus.

Pentru ca elementul de suprafață să rămână în echilibru, trebuie ca suma tuturor forțelor care acționează asupra acestuia să fie zero. Dacă se face proiecția forțelor pe direcția lui  $\sigma_r$  se obține:

$$\begin{aligned} & \sigma_r(r+u)h\Delta\theta - (\sigma_r + \Delta\sigma_r)[r+u + \Delta(r+u)]\Delta\theta(h + \Delta h)\cos\Delta\phi + \\ & + 2\sigma_\theta\Delta s\left(h + \frac{1}{2}\Delta h\right)\sin\frac{\Delta\theta}{2}\cos\phi - p\Delta s(r+u)\Delta\theta\sin\frac{\Delta\phi}{2} = 0 \end{aligned} \quad (3.36)$$

Când  $\Delta(r+u)$  tinde către zero la echilibru, ecuația de echilibru poate fi scrisă:

$$(r+u)\frac{d(\sigma_r h)}{d(r+u)} = h(\sigma_\theta - \sigma_r) \quad (3.37)$$

În vârful plăcii deformate, pentru un element de placă mărginit de razele  $r+u$ , ecuațiile de echilibru devin:

$$p\pi(r+u)^2 = \sigma_r \frac{dw}{ds} 2\pi h(r+u) \quad (3.38)$$

Respectiv:

$$\left[\frac{dw}{d(r+u)}\right]^2 = \frac{1}{\left[\frac{2h\sigma_r}{p(r+u)}\right]^2 - 1} \quad (3.39)$$

#### Ecuatii de deformații

Un element de placă situat la raza  $r$  de centrul plăcii, definit inițial prin  $\Delta r$  și  $\Delta\theta$ , după aplicarea unei presiuni  $p$  va fi situat la distanța  $r+u$  față de centrul plăcii (membranei) și va fi definit prin  $\Delta\theta$  și  $\Delta s$ , deoarece odată cu schimbarea poziției elementului de placă se modifică și dimensiunea elementului de suprafață luată în calcul după direcția razei. Astfel,  $\Delta r$  devine  $\Delta s$ .

În teoria de membrană cu deformații mari, deformațiile  $\varepsilon_j$  sunt definite prin următoarele relații:

$$\varepsilon_j = \ln \frac{l_j}{(l_j)_0} \quad (3.40)$$

unde  $l_j$  reprezintă dimensiunea după deformare a elementului după direcția principală  $j$ , element care inițial a avut lungimea  $(l_j)_0$ .

Ținând cont de cele afirmate mai sus, ecuațiile de deformații după cele trei direcții  $r$ ,  $\theta$  și  $z$  devin:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{ds}{dr} \quad (3.41)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{r+u}{r} \quad (3.42)$$

$$\varepsilon_z = \ln \frac{h}{h_0} \quad (3.43)$$

Respectiv:

$$e^{\varepsilon_r} = \frac{d(r+u)}{dr} \left\{ 1 + \left[ \frac{dw}{d(r+u)} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (3.44)$$

$$e^{\varepsilon_\theta} = \frac{r+u}{r} \quad (3.45)$$

$$e^{\varepsilon_z} = \frac{h}{h_0} \quad (3.46)$$

Problema tensiunilor și deformațiilor plăcii circulare sub presiune este rezolvată de un set de zece ecuații independente (3.22), (3.28), (3.30), (3.31), (3.32), (3.37), (3.39), (3.44), (3.45) și (3.46) cu zece necunoscute  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\gamma$ ,  $\tau$ ,  $h$ ,  $u$ ,  $w$ . Dacă ecuația (3.45) este diferențiată în raport cu  $r$  și combinată cu ecuația (3.44) se obține:

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)}}{\left\{ 1 + \left[ \frac{dw}{d(r+u)} \right]^2 \right\}^{1/2}} - 1 \quad (3.47)$$

Substituind ecuația (3.43) în ecuația (3.47) rezultă:

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \left\{ 1 - \left[ \frac{p(r+u)}{2h\sigma_r} \right]^2 \right\}^{1/2} - 1 \quad (3.48)$$

Ecuațiile (3.37) și (3.48) se pot simplifica utilizând relațiile (3.41), (3.42) și (3.43) pentru a elimina pe  $u$  și  $h$ , rezultând astfel:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r r \frac{d\varepsilon_z}{dr} = (\sigma_\theta - \sigma_r) e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \left\{ 1 - \left[ \frac{rpe^{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)}}{2h_0\sigma_r} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (3.49)$$

și

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \left\{ 1 - \left[ \frac{rpe^{\varepsilon_\theta - \varepsilon_z}}{2h_0\sigma_r} \right]^2 \right\}^{1/2} - 1 \quad (3.50)$$

Astfel, cele zece ecuații independente care definesc problema se reduc la șapte ecuații independente (3.22), (3.28), (3.30), (3.31), (3.32) și (3.49).

Pentru a simplifica rezolvarea problemei se introduce o constantă arbitrară  $k$  în ecuațiile (3.49) și (3.50),  $k$  fiind o constantă necunoscută luată arbitrar cu dimensiune de lungime și astfel relațiile (3.49) și (3.50) devin:

$$\left. \begin{aligned} \frac{r}{k} \frac{d\sigma_r}{d\left(\frac{r}{k}\right)} + \sigma_r \frac{r}{k} \frac{d\varepsilon_z}{d\left(\frac{r}{k}\right)} &= (\sigma_\theta - \sigma_r) e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \left\{ 1 - \left[ \frac{\frac{pk}{h_0} \frac{r}{k} e^{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)}}{2\sigma_r} \right]^2 \right\}^{1/2} \\ \frac{r}{k} \frac{d\varepsilon_\theta}{d\left(\frac{r}{k}\right)} &= e^{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)} \left\{ 1 - \left[ \frac{\frac{pk}{h_0} \frac{r}{k} e^{(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)}}{2\sigma_r} \right]^2 \right\}^{1/2} - 1 \end{aligned} \right\} (3.51)$$

A rezultat astfel un sistem de două ecuații cu parametri  $r/k$  și  $pk/h_0$  pentru a cărui rezolvare este necesară efectuarea unor calcule iterative și utilizarea unor caracteristici ale materialului plăcii.

Această metodă rezolvă problema tensiunilor și deformațiilor plastice într-o manieră satisfăcătoare și prezintă distribuția deformațiilor tangențiale precum și raportul tensiunilor principale în timpul solicitării plăcii. Metoda poate fi aplicată la estimarea presiunii necesare realizării unor deformații mari ale plăcii circulare încastrate pe contur supuse acțiunii unei presiuni hidraulice. Metoda oferă posibilitatea de a estima condițiile tehnologice pentru realizarea prin deformare plastică hidraulică a unor table de diverse dimensiuni dar este foarte laborioasă și dificil de aplicat.

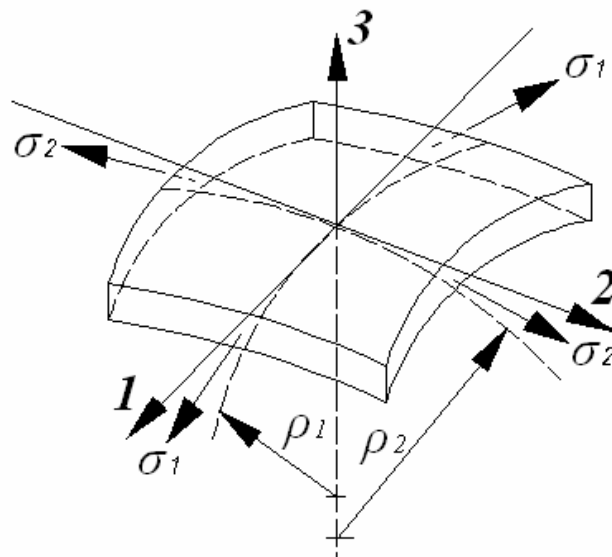
### 3.2.3. Rezolvarea analitică a problemei tensiunilor și deformațiilor în ipoteza unei forme de calotă sferică a plăcii deformate

Această ipoteză poate fi asimilată cu deformarea plastică hidraulică liberă a unei plăci subțiri încastrate pe contur supuse unei presiuni hidraulice care produce deformații plastice mari ale plăcii, a cărei rezolvare teoretică pentru determinarea parametrilor geometrici după deformare este mult mai practică și nu necesită calcule iterative[15].

Pentru determinarea parametrilor de formă a plăcii deformate considerăm un element de volum al acesteia (Fig.3.10) situat în vârf, definit prin două raze de curbura  $\rho_1$  și  $\rho_2$  în două plane perpendiculare 1 și 2 și de dimensiuni elementare liniare ale acestui element de volum.

Starea de tensiune pentru acest element de volum de grosime mică este o stare plană de tensiune definită prin tensorul tensiunilor  $T_\sigma$  :

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$



**Fig.3.10. Element de volum a plăcii deformate**

Și prin tensorul deformațiilor  $T_{\varepsilon}$  :

$$T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Astfel, ecuația de echilibru sau ecuația lui Pascal pentru acest element de volum este:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p}{h} \quad (3.54)$$

Introducând raportul tensiunilor principale  $\Omega$  și ținând cont de faptul că placa deformată are forma de calotă sferică ecuația de echilibru (3.54) se reduce la:

$$\sigma_1 = \frac{p\rho}{(1 + \Omega)h} \quad (3.55)$$

Unde:

$$\Omega = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (3.56)$$

Iar:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

Raza de curbură  $\rho$  care este raza sferei din care provine calota sferică, pentru o înălțime  $w$  a calotei și o rază  $b$  a plăcii nedeformate are expresia:

$$\rho = \frac{b^2 + w^2}{2w} \quad (3.57)$$

Se poate demonstra de asemenea că deformația principală este definită prin:

$$\varepsilon_1 = \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right) \quad (3.58)$$

Până la acest stadiu se cunoaște se cunosc tensiunea principală  $\sigma_1$  și deformația principală  $\varepsilon_1$  în funcție de variabilele  $w$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $p$ . Rămâne deci să se determine raportul tensiunilor  $\Omega$  pentru a putea stabili o relație directă între eforturi și deformații. Pentru aceasta se presupune că starea de anizotropie a materialului plăcii este normală, comportamentul materialului este izotrop deci  $\Omega = 1$ . Parametri de anizotropie se reduc la un singur parametru mediu  $\bar{r}$ . În acest caz, tensiunea și deformația echivalentă vor fi definite prin:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{2/(1+r)} \cdot \sigma_1 \quad (3.59)$$

$$d\bar{\varepsilon} = \sqrt{2(1+r)} \cdot d\varepsilon_1 \quad (3.60)$$

Unde :

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p \cdot \rho}{2h} \quad (3.61)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right) \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{h}{h_0} \quad (3.63)$$

Ținând cont de relațiile (3.20), (3.62) și (3.63) rezultă expresia grosimii  $h$  a plăcii deformate la vârful calotei:

$$h = \frac{h_0}{e^{2 \cdot \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}} \quad (3.64)$$

Pentru grosimile inițiale de  $h_0=0.5, 0.8, 1.3$  și  $2\text{mm}$  respectiv înălțimi la pol  $w=20, 30, 40$  și  $50\text{mm}$  s-au obținut următoarele valori ale grosimii piesei deformate la polul calotei. Valorile numerice obținute sunt exprimate în mm.



$h_0=0.5$	$h_0=0.8$	$h_0=1.3$	$h_0=2$
$\frac{0.5}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{2\sigma}{100} \right)}} = 0.462$	$\frac{0.8}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{2\sigma}{100} \right)}} = 0.74$	$\frac{1.3}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{2\sigma}{100} \right)}} = 1.202$	$\frac{2}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{2\sigma}{100} \right)}} = 1.84$
$\frac{0.5}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{3\sigma}{100} \right)}} = 0.421$	$\frac{0.8}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{3\sigma}{100} \right)}} = 0.673$	$\frac{1.3}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{3\sigma}{100} \right)}} = 1.094$	$\frac{2}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{3\sigma}{100} \right)}} = 1.68$
$\frac{0.5}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{4\sigma}{100} \right)}} = 1$	$\frac{0.8}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{4\sigma}{100} \right)}} = 1$	$\frac{1.3}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{4\sigma}{100} \right)}} = 1$	$\frac{2}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{4\sigma}{100} \right)}} = 1$
$\frac{0.5}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{5\sigma}{100} \right)}} = 1$	$\frac{0.8}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{5\sigma}{100} \right)}} = 1$	$\frac{1.3}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{5\sigma}{100} \right)}} = 1$	$\frac{2}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{5\sigma}{100} \right)}} = 1$

Utilizând legea de ecrusare a lui Hollomon conform căreia

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^n$$

combinată cu relația (3.60) atunci expresia tensiunii echivalente  $\bar{\sigma}$  devine:

$$\bar{\sigma} = K \left( \sqrt{2(1+r)} \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right) \right)^n \quad (3.65)$$

Unde:

$K$  este o constantă de material care poate fi asimilată cu tensiunea de ecruisare, și,

$n$  este coeficientul de ecruisare.

Ținând cont de relațiile de mai sus [40] **am determinat o expresie originală care descrie dependența dintre presiune, grosimea semifabricatului și înălțimea la polul calotei pentru un material caracterizat prin constanta  $K$  și coeficientul de anizotropie mediu  $\bar{r}$ :**

$$p = 2\sqrt{2(1+\bar{r})}K \frac{h_0 w \left( \sqrt{2(1+\bar{r})} \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right) \right)^n}{b^2 \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right) \cdot e^{2 \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right)}} \quad (3.66)$$

Semnificația parametrului  $w$  din relațiile de mai sus este aceea de înălțime maximă a calotei (înălțime la polul calotei) respectiv conform Fig. 3.8,  $w=w_{max}$ .

Calculul au fost efectuate în ipoteza izotropiei materialului  $\bar{r} = 1$ ,  $n = 0.2$  și  $K = 500 \text{ MPa}$ . [40].

În Fig. 3.12 s-a reprezentat grafic funcția  $p(w)$  pentru un semifabricat plan de forma din Fig. 3.11 cu grosimi de  $h_0=0,5$ ;  $h_0=0,8$ ;  $h_0=1,3$ ;  $h_0=2,0$ .

Dependența dintre presiune și înălțimea polului calotei în conformitate cu relația (3.66) este dată în Tab.3.1 și este reprezentată grafic în Fig.3.12. Calculul și reprezentarea grafică au fost efectuate cu o secvență de program Mathcad prezentată în Anexa 1.

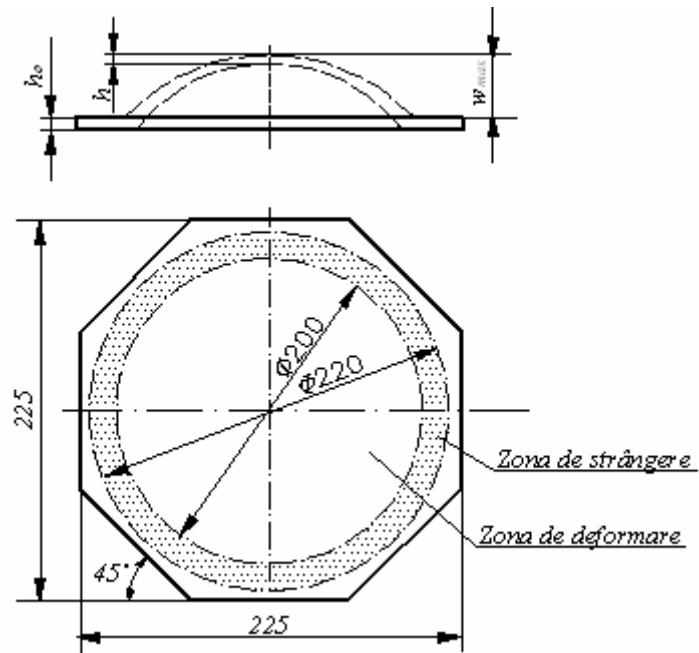
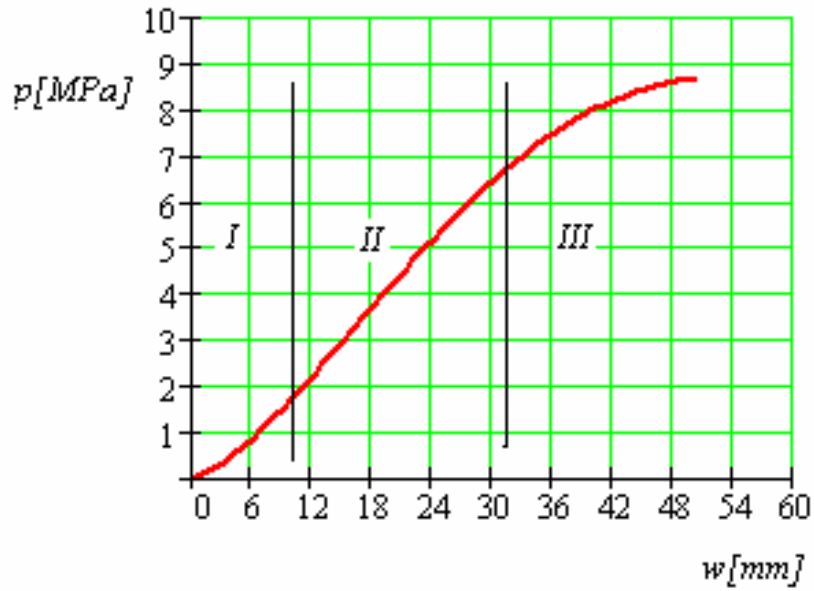


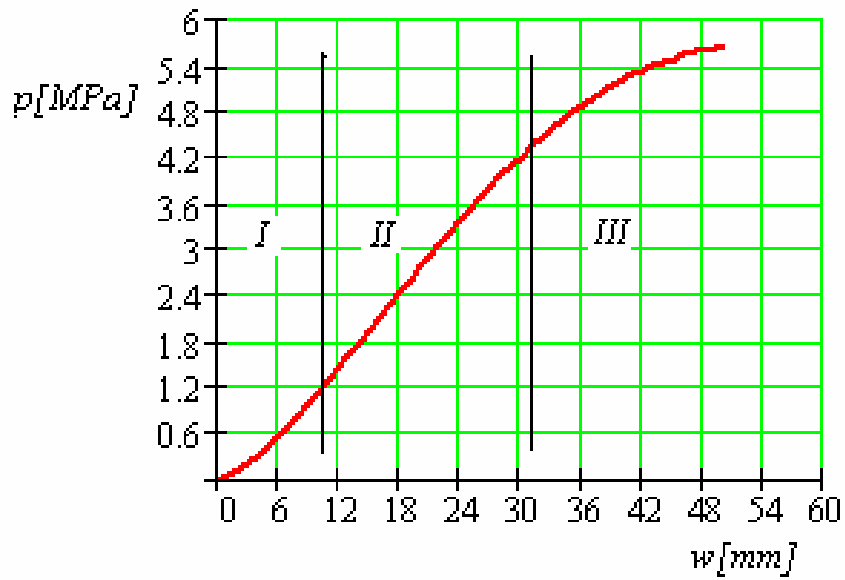
Fig. 3.11. Forma semifabricatului

**Tab.3.1.** Presiunea de deformare  $p$  (calculată cu relația 3.66) în funcție de înălțimea  $w$  la pol a calotei

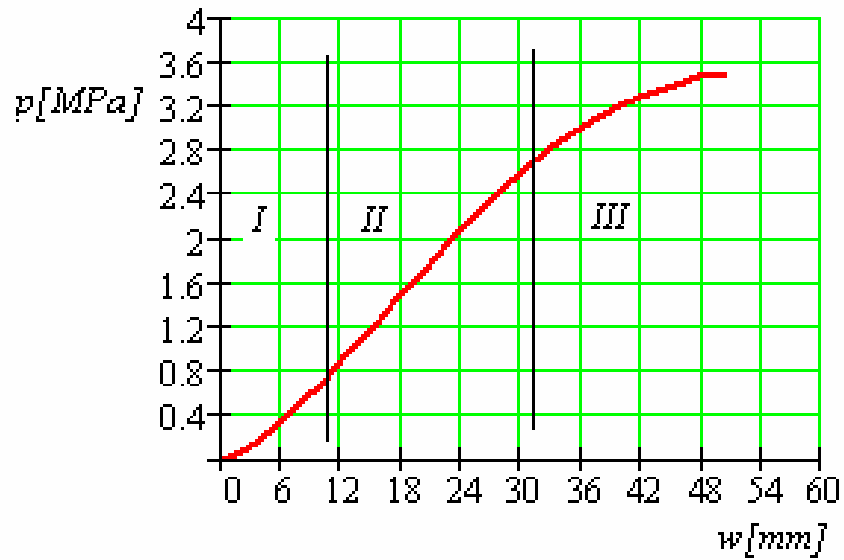
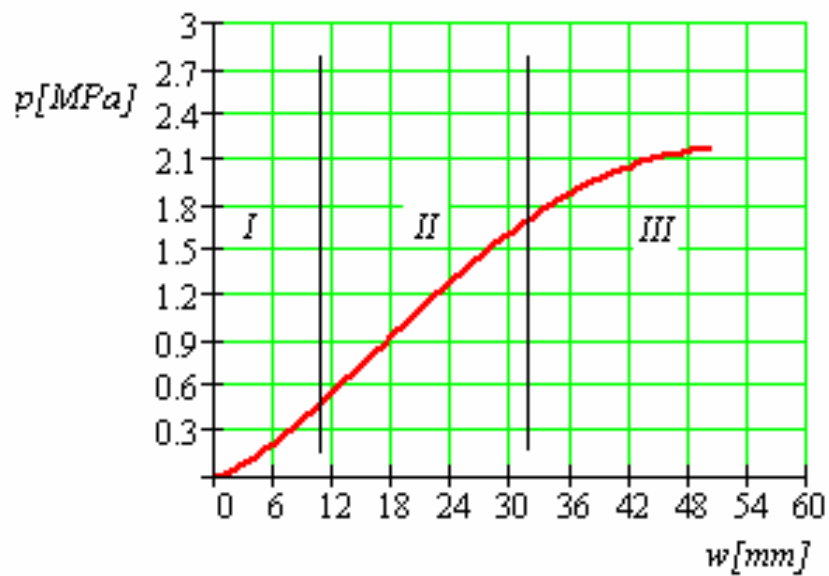
w [mm]	p(w) [MPa]			
	$h_0=2,0\text{mm}$	$h_0=1,3\text{mm}$	$h_0=0,8\text{mm}$	$h_0=0,5\text{mm}$
0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.688	0.447	0.275	0.172
10	1.774	1.153	0.709	0.443
15	3.012	1.958	1.205	0.753
20	4.275	2.779	1.710	1.069
25	5.467	3.554	2.187	1.367
30	6.519	4.237	2.608	1.630
35	7.385	4.800	2.954	1.846
40	8.040	5.226	3.216	2.010
45	8.480	5.512	3.392	2.120
50	8.714	5.664	3.486	2.179



a)  $h_0 = 2$  mm



b)  $h_0 = 1,3$  mm

c)  $h_0=0,8$  mmd)  $h_0=0,5$  mm**Fig.3.12. Variația presiunii în funcție de înălțimea  $w$  la pol a calotei deformate pentru diferite grosimi  $h_0$  ale semifabricatului**

Analizând forma curbei de variație se observă, pentru toate grosimile de semifabricat, trei zone distincte din punct de vedere al formei curbei de variație a presiunii:

- în prima zonă, în care, în masa de material al semifabricatului se manifestă atât deformații elastice cât și plastice, panta curbei este mai mică dar crescătoare;

- în zona a doua, în care, întreaga masă de material este în faza de deformare plastică și cu inițierea procesului de ecruisare, panta curbei crește față de prima zonă, dar rămâne relativ constantă;

- în zona a treia, se observă din nou o scădere a pantei curbei, care sugerează o scădere a efortului necesar deformării, scădere ce este consecința a două fenomene care apar în masa de material al semifabricatului: micșorarea pronunțată a grosimii semifabricatului în zona dinspre vârful calotei și apariția microfisurilor în material datorită gradului mare de deformare. Apariția microfisurilor precede fenomenul de rupere al materialului.

Forma acestor curbe teoretice este confirmată destul de fidel de rezultatele experimentale efectuate în aceleași condiții ca și calculele teoretice (Cap.4) datorită faptului că în componența relației 3.66 există elemente care țin seama de fenomenul de ecruisare.

### 3.3 Optimizarea calculului presiunii necesare deformării

În timpul deformării hidraulice a plăcilor circulare încastrate pe contur acestea își modifică forma și dimensiunile. Modificarea de formă și dimensiuni presupune un consum energetic. **Pe baza acestor observații am propus o abordare originală a calculului presiunii necesare deformării din considerente energetice. Această metodă se bazează pe faptul că energia minimă necesară deformării unui semifabricat de volum cunoscut se poate determina pe baza ipotezelor de plasticitate, iar energia hidraulică cedată semifabricatului de către fluidul de lucru se poate calcula cunoscând parametri hidraulici ai acestuia.**

În conformitate cu ipoteza energetică a plasticității (criteriul de plasticitate Huber-Mises-Hencky) deformațiile plastice apar în material atunci când pe unitatea de volum se acumulează o cantitate de energie bine determinată. Pentru cazul stării plane se poate scrie că pentru inițierea deformării plastice este necesar să se acumuleze o energie minimă de deformare (pe element de volum) [1] dată de relația:

$$U_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y) \quad (3.67)$$

deoarece:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{ecr}, \quad \varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{-\varepsilon_z}{2} \text{ și } \varepsilon_z = \ln \frac{h}{h_0}$$

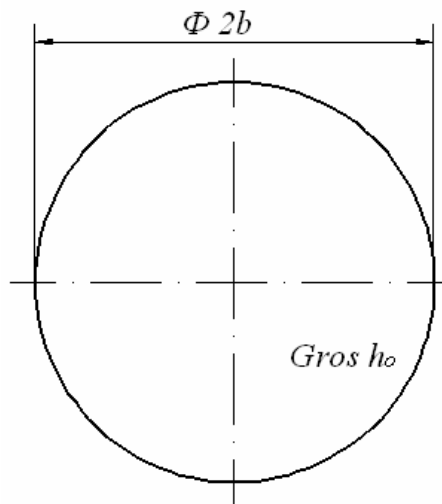
expresia energiei specifice minime de deformare devine:

$$U_1 = \frac{-\sigma_{ecr}}{2} \ln \frac{h}{h_0} \quad (3.68)$$

Energia totală minimă de deformare  $U_d$  va fi:

$$U_d = \frac{-\sigma_{ecr}}{2} \ln \frac{h}{h_0} \cdot V_m \quad (3.69)$$

unde  $V_m$  reprezintă volumul de material al plăcii (Fig.3.13).



**Fig.3.13. Disc semifabricat**

Am ales tensiunea de ecrusare  $\sigma_{ecr}$  drept mărime caracteristică în calculul energiei minime de deformare datorită faptului că deformațiile plastice sunt foarte mari și că fenomenul de ecrusare al materialului este determinant pentru calculul forțelor de deformare.

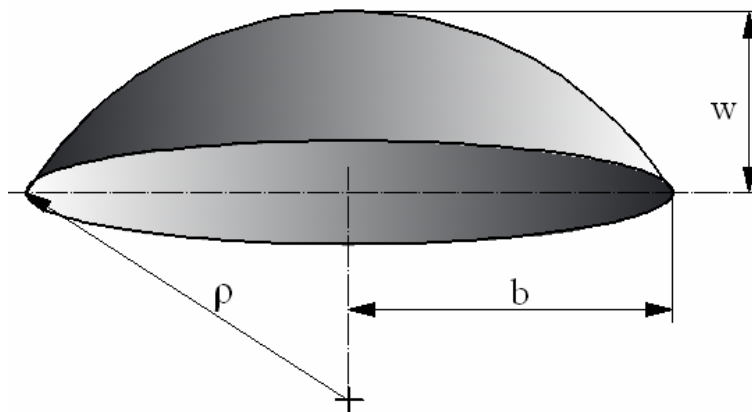
Ținând seama de faptul că placa are forma unui disc circular de rază  $b$  și grosime  $h_0$  și utilizând relația (3.64) **am obținut o expresie originală a energiei totale minime de deformare pentru întreaga masă a semifabricatului în formă de disc de rază  $b$  și grosime  $h_0$  care se transformă într-o calotă sferică de rază  $a$  bazei  $b$  și înălțime  $w$  la pol:**

$$U_d = \frac{-\pi \cdot b^2 h_0 \cdot \sigma_{ecr}}{2} \ln \frac{1}{e^{2 \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right)}} \quad (3.70)$$

În cazul deformării hidraulice energia necesară deformării este furnizată de energia hidraulică  $E_h$  purtată de fluidul de lucru. Având în vedere că relația de calcul a energiei unui fluid aflat la presiunea  $p$  într-un volum  $V$  se exprimă cu relația [4]:

$$E_h = p \cdot V \quad (3.71)$$

se poate calcula presiunea necesară deformării plăcii cunoscând volumul interior al suprafeței deformate.



**Fig.3.14. Definierea parametrilor geometrici ai calotei sferice**

În ipoteza formulată anterior conform căreia placa deformată are formă de calotă sferică de dimensiuni cunoscute (Fig.3.14).

Din considerente geometrice, se poate scrie expresia volumului  $V$  al calotei:

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot w(3b^2 + w^2) \quad (3.72)$$

**Pentru o mai bună înțelegere a modificării formei și dimensiunilor pieselor din tablă subțire prelucrate prin deformare plastică hidraulică am definit gradul de deformare  $\psi$  a suprafeței semifabricatului ca fiind:**

$$\psi\% = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100\% \quad (3.73)$$

unde  $S_0$  reprezintă suprafața semifabricatului înainte de deformare iar  $S$  reprezintă suprafața semifabricatului după deformare.

Acest grad de deformare este principal diferit față de coeficienții de ambutisare care, în diverse forme de explicitare exprimă rapoarte dintre diametrul inițial și cel final al pieselor dar care nu evidențiază gradul de modificare a suprafeței semifabricatului.



În cazul deformării plastice hidraulice a unei plăci circulare suprafața  $S_0$  este suprafața discului de rază  $b$  adică:

$$S_0 = \pi \cdot b^2 \quad (3.74)$$

iar  $S$  este suprafața calotei sferice de rază  $a$  bazei  $b$  și înălțime  $w$  (Fig.3.14)

$$S = \pi \cdot (b^2 + w^2) \quad (3.75)$$

Din relațiile (3.73), (3.74) și (3.75) rezultă expresia gradului de deformare în funcție de dimensiunile calotei:

$$\psi = \frac{w^2}{b^2} \quad (3.76)$$

În cazul deformării hidraulice libere a unei plăci plane circulare de grosime  $h_0$  și rază  $b$  încastrate pe contur aceasta se va transforma într-o suprafață de forma unei calote sferice cu raza bazei  $b$  și înălțimea  $w$  cunoscute. Egalând energia necesară deformării exprimată prin relația (3.70) cu energia hidraulică din relația (3.71) **am determinat o altă relație originală pentru calculul presiunii necesare deformării (3.79) ținând seama doar de energia hidraulică transmisă semifabricatului de către fluidul de lucru și de energia totală minimă de deformare corespunzătoare volumului de material al semifabricatului în cazul transformării unui semifabricat în formă de disc într-o piesă de formă de calotă sferică.**

$$p \cdot V = -U_d \quad (3.77)$$

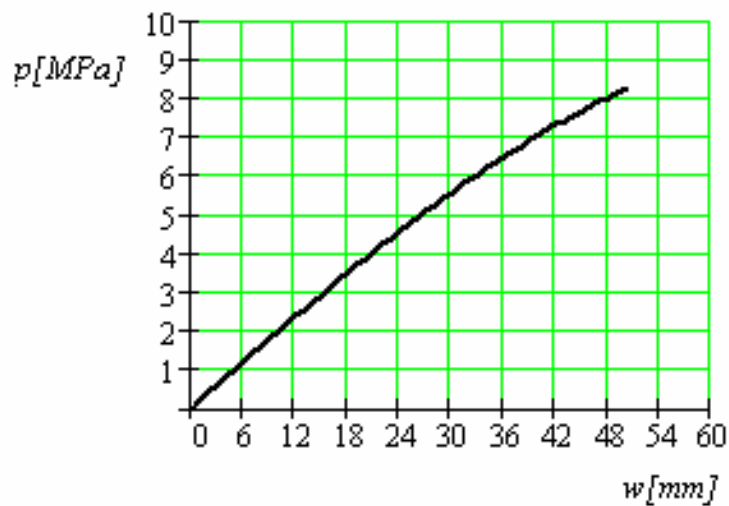
$$p = -\frac{U_d}{V} \quad (3.78)$$

$$p = \frac{6 \cdot h_0 \cdot \sigma_{ecr} \cdot \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}{w \cdot \left(3 + \frac{w^2}{b^2}\right)} \quad (3.79)$$

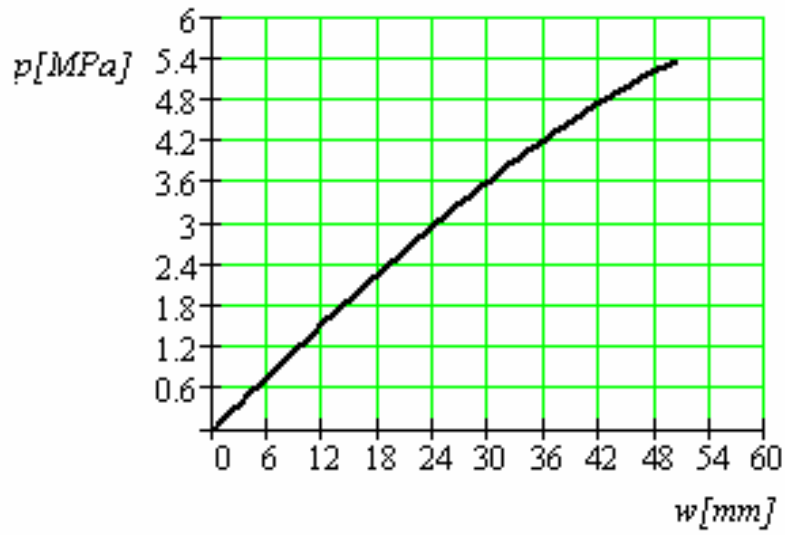
Dependența  $p(w)$  conform relației 3.79 este reprezentată în Fig.3.15 în conformitate cu valorile calculate în Tab.3.2. Calculele și reprezentarea grafică au fost efectuate cu o secvență de program Mathcad prezentată în Anexa 2.

**Tab.3.2.** Presiunea de deformare  $p$  (calculată cu relația 3.79) în funcție de înălțimea  $w$  la pol a calotei

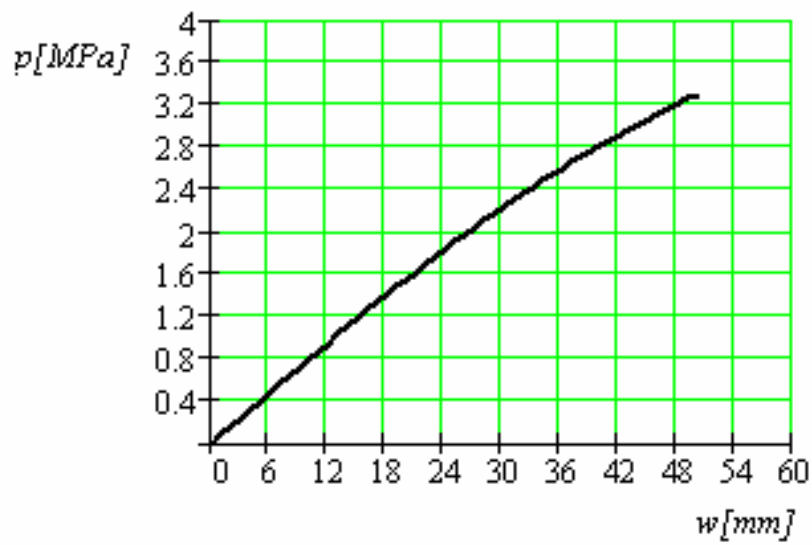
w [mm]	p(w) [M Pa]			
	$h_0=2,0\text{mm}$	$h_0=1,3\text{mm}$	$h_0=0,8\text{mm}$	$h_0=0,5\text{mm}$
0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.998	0.649	0.399	0.249
10	1.983	1.289	0.793	0.496
15	2.945	1.914	1.178	0.736
20	3.870	2.516	1.548	0.968
25	4.751	3.088	1.900	1.188
30	5.578	3.626	2.231	1.394
35	6.344	4.124	2.538	1.586
40	7.045	4.579	2.818	1.761
45	7.677	4.990	3.071	1.919
50	8.239	5.355	3.296	2.060



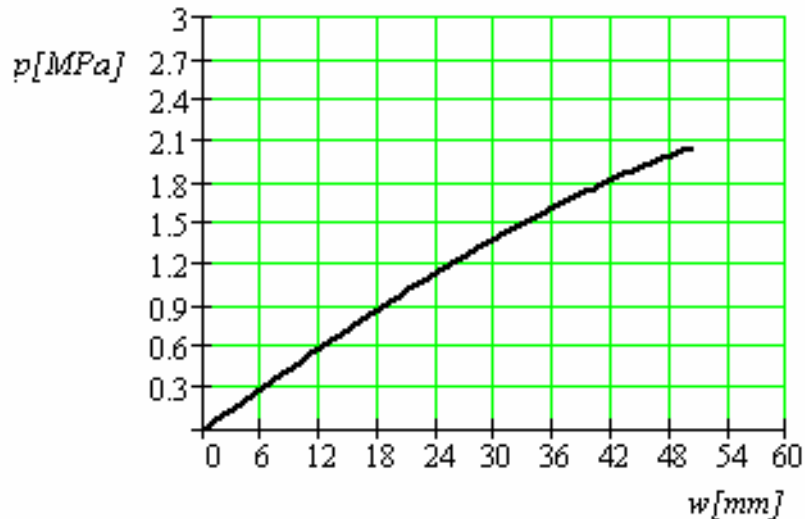
a)  $h_0=2\text{ mm}$



**b)**  $h_0 = 1,3$  mm



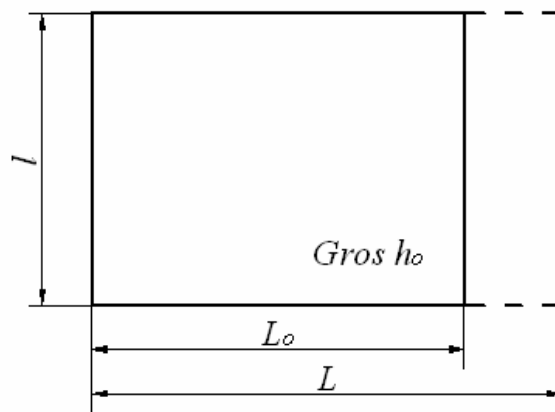
**c)**  $h_0 = 0,8$  mm



d)  $h_0=0,5$  mm

**Fig.3.15.** Variația presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza deformării unui disc

O altă posibilitate de calcul a energiei necesare deformării plăcii, pe care am propus-o, este aceea de a se asimila energia de deformare a semifabricatului în formă de disc (Fig.3.13) de diametru  $b$  și grosime  $h_0$  pentru obținerea forme de calotă sferică din Fig.3.14, cu energia necesară deformării unei plăci pătrate echivalente (Fig.3.16) de aceeași grosime și suprafață cu cea a discului, prin modificarea uneia dintre dimensiuni până când suprafața plăcii pătrate alungite devine egală cu suprafața calotei sferice obținute din disc.



**Fig.3.16.** Semifabricat pătrat echivalent

Pe baza ipotezelor formulate anterior suprafața plăcii pătrate deformate devine egală cu suprafața calotei, adică:

$$L_0 \cdot L = \pi \cdot (b^2 + w^2) \quad (3.80)$$

de unde rezultă lungimea  $L$  a plăcii pătrate deformate ca fiind:

$$L = \frac{\pi \cdot (b^2 + w^2)}{L_0} \quad (3.81)$$

De asemenea, suprafața plăcii pătrate înainte de deformare fiind egală cu suprafața discului de rază  $b$ , adică:

$$L_0^2 = \pi \cdot b^2 \quad (3.82)$$

rezultă că:

$$\begin{aligned} L_0 &= \sqrt{\pi \cdot b^2} \\ L_0 &= b \cdot \sqrt{\pi} \end{aligned} \quad (3.83)$$

Deformarea plăcii pătrate se exprimă prin modificarea suprafeței datorate modificării lungimii plăcii. Lungirea  $\Delta L$  a plăcii se definește:

$$\Delta L = L - L_0 \quad (3.84)$$

Ținând cont de relațiile (3.81) și (3.83) expresia lungirii  $\Delta L$  devine:

$$\Delta L = \frac{\sqrt{\pi} \cdot w^2}{b} \quad (3.85)$$

Pentru cazul alungirii semifabricatului energia de deformare se exprimă prin relația:

$$U_d = F \cdot \Delta L \quad (3.86)$$

unde  $F$  reprezintă forța necesară deformării ce are expresia:

$$F = \sigma_{ecr} \cdot A \quad (3.87)$$

în care:

- $\sigma_{ecr}$  reprezintă tensiunea a materialului plăcii
- $A$  reprezintă aria secțiunea transversală a plăcii

$$A = L_0 \cdot h_0 \quad (3.88)$$

Astfel, relația (3.86) devine:

$$U_d = \pi \cdot \sigma_{ecr} \cdot h_0 \cdot w^2 \quad (3.89)$$

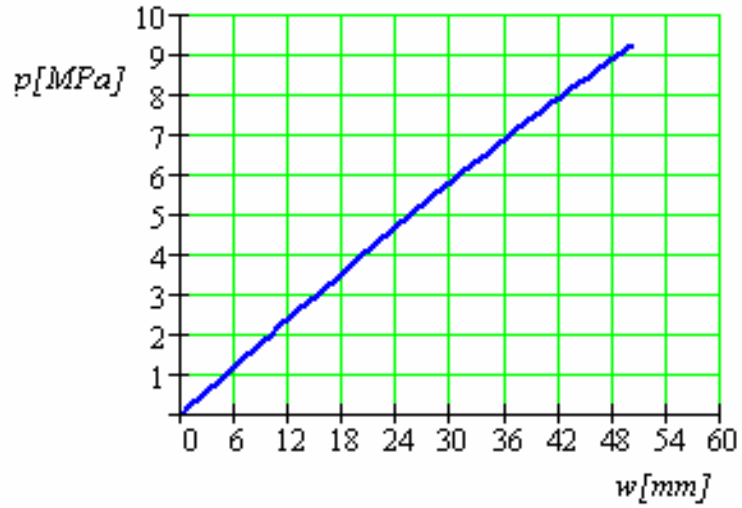
Presiunea necesară deformării exprimată prin relația (3.78) devine:

$$p = \frac{6 \cdot \sigma_{ecr} \cdot h_0 \cdot w}{3b^2 + w^2} \quad (3.90)$$

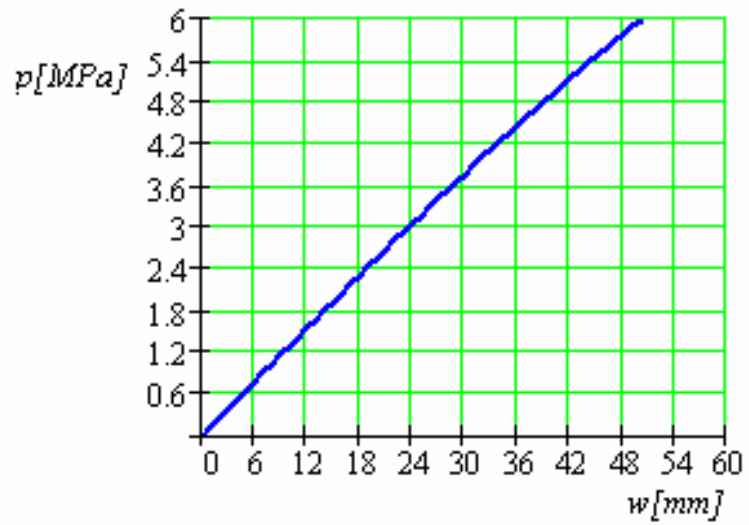
Dependența  $p(w)$  conform relației (3.90) este reprezentată în Fig.3.17 în conformitate cu valorile calculate în Tab.3.3. Calculele și reprezentarea grafică au fost efectuate cu o secvență de program Mathcad prezentată în Anexa 3.

**Tab.3.3.** Presiunea de deformare  $p$  (calculată cu relația 3.90) în funcție de înălțimea  $w$  la pol a calotei

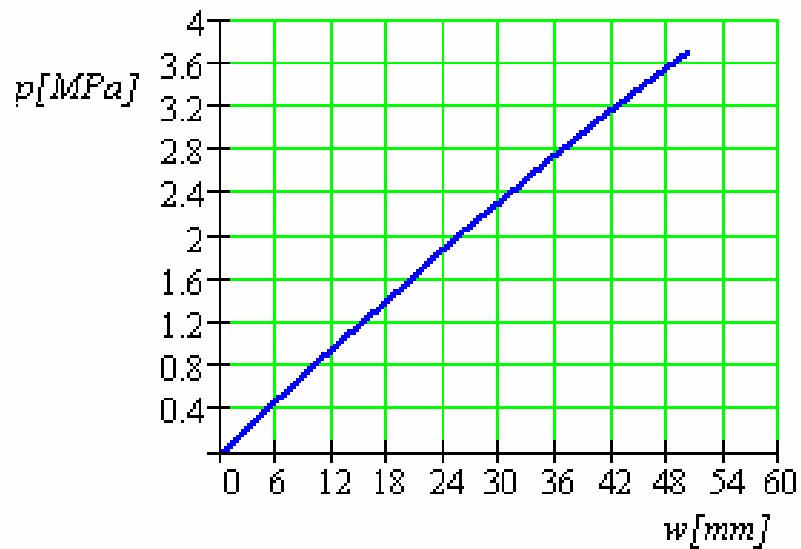
w [mm]	p(w) [MPa]			
	$h_0=2,0\text{mm}$	$h_0=1,3\text{mm}$	$h_0=0,8\text{mm}$	$h_0=0,5\text{mm}$
0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.999	0.649	0.400	0.250
10	1.993	1.296	0.797	0.498
15	2.978	1.935	1.191	0.744
20	3.947	2.566	1.579	0.987
25	4.898	3.184	1.959	1.224
30	5.825	3.786	2.330	1.456
35	6.725	4.371	2.690	1.681
40	7.595	4.937	3.038	1.899
45	8.431	5.480	3.372	2.108
50	9.231	6.000	3.692	2.308



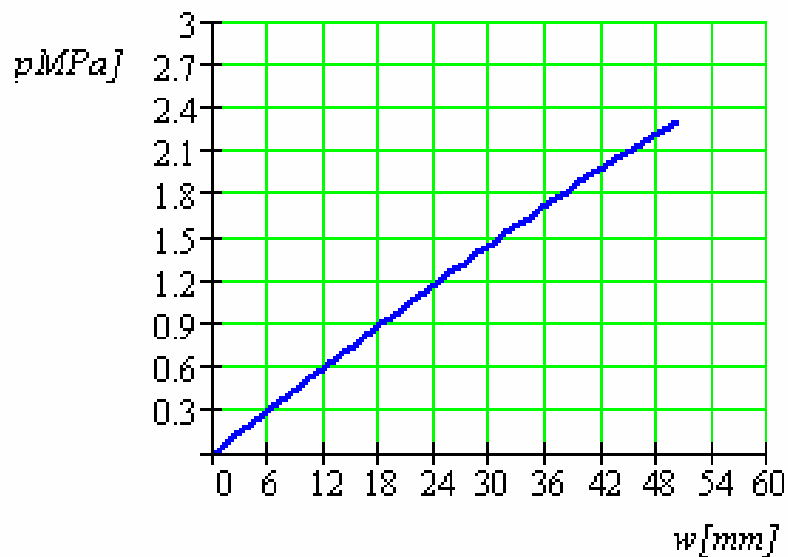
**a)**  $h_0 = 2$  mm



**b)**  $h_0 = 1.3$  mm



c)  $h_0=0,8$  mm

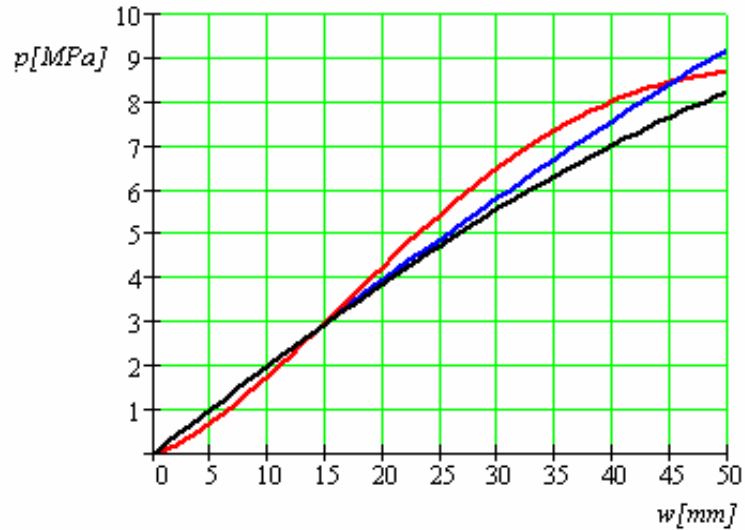


d)  $h_0=0,5$  mm

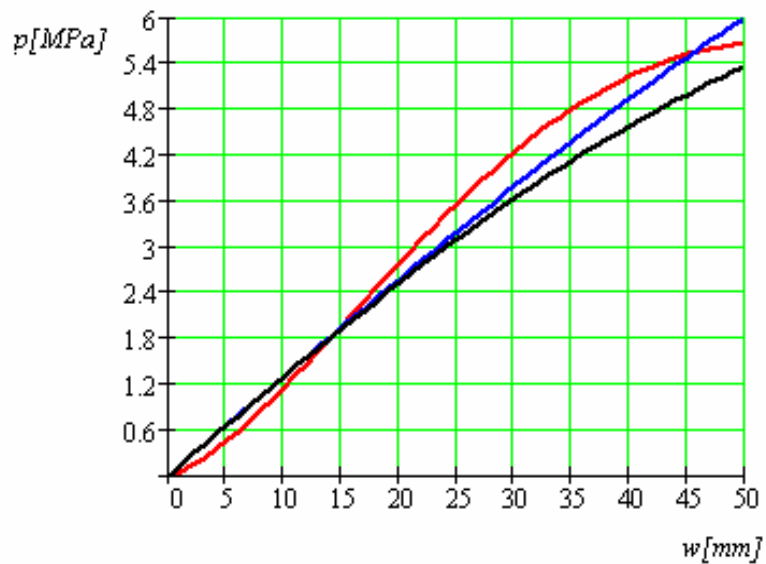
**Fig.3.17. Variația presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza asimilării discului semifabricat cu o suprafață pătrată echivalentă**



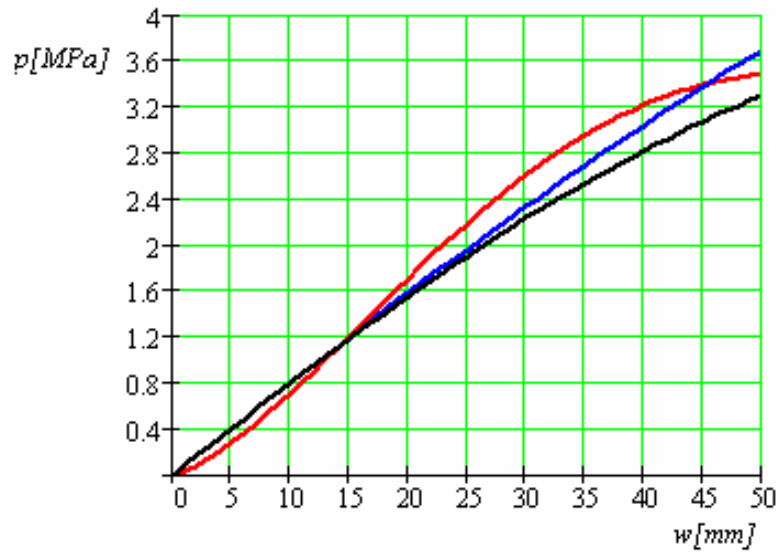
Pentru evaluarea comparativă a rezultatelor obținute prin cele trei metode de calcul a presiunii au fost suprapuse graficele de variație a presiunii în funcție de înălțimea calotei corespunzătoare celor patru grosimi ale semifabricatului (Fig.3.18).



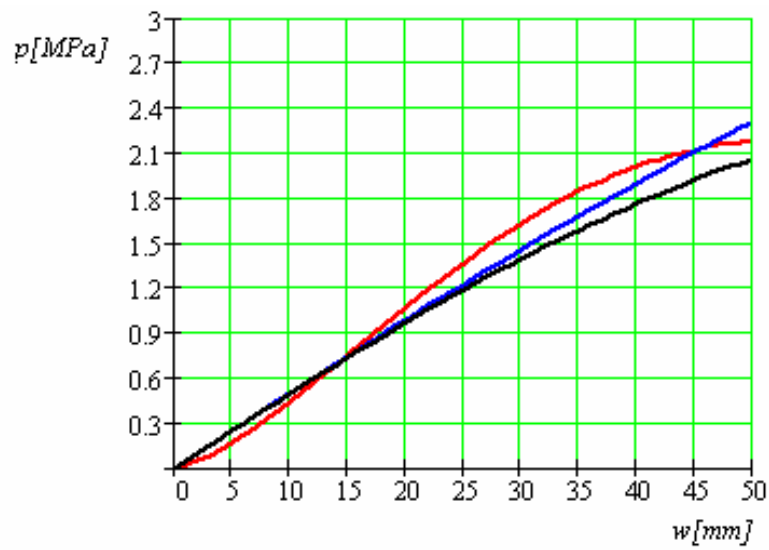
**a)**  $h_0 = 2$  mm



**b)**  $h_0 = 1,3$  mm





c)  $h_0 = 0,8$  mm




d)  $h_0 = 0,5$  mm

Legendă:

$\rho(w)$  conform relației 3.66 

$\rho(w)$  conform relației 3.79 

$\rho(w)$  conform relației 3.90 

**Fig.3.18. Reprezentare comparativă a variației presiunii determinate pe baza a trei criterii diferite**

Din analiza curbelor reprezentate în Fig. 3.18 se observă că diferențele cele mai mici sunt între curbele determinate de relațiile (3.66) și (3.90), considerând din nou că relația (3.66) descrie cel mai fidel fenomenul deformării.

Diferențele care apar între cele trei reprezentări sunt datorate faptului că descrierea teoretică absolut riguroasă a fenomenului intrinsec al deformării este practic imposibilă, astfel încât a fost necesar să fie formulate unele ipoteze de calcul care să permită totuși o descriere teoretică a fenomenului, cu abateri acceptabile față de situația reală care se poate obține prin încercări experimentale.

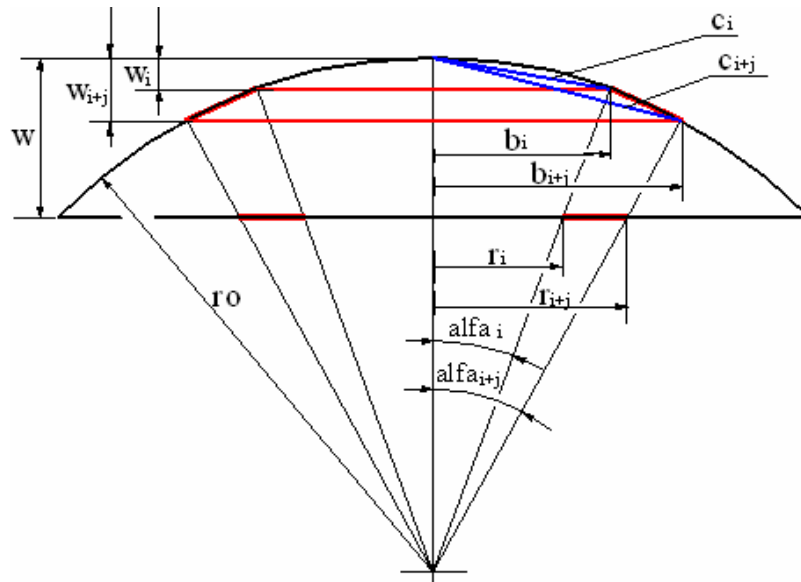
Pentru validarea rezultatelor teoretice obținute s-au efectuat cercetări experimentale prezentate în cadrul capitolului 4 în vederea evaluării corectitudinii acestora.

### **3.4. Determinarea variației grosimii piesei deformate în funcție de rază**

Problema descrierii grosimii piesei deformate în funcție de poziția elementului de calotă față de raza semifabricatului nu este rezolvată teoretic în totalitate în literatura de specialitate, datorită dificultăților care apar în rezolvarea ecuațiilor diferențiale care descriu fenomenul deformării (relația 3.51).

**Având în vedere acest fapt am propus un model de calcul al grosimii piesei deformate având la bază următoarele observații:**

- forma piesei deformate este o calotă sferică;
- un punct de pe discul de grosime  $h_0$  nedeformat se deplasează, în timpul deformării, radial față de raza sferei din care face parte calota (Fig.3.19);
- suprafața inelară de rază  $r_i$  și  $r_{i+j}$  și grosime  $h_0$  se transformă într-un segment de sferă de raza sferei  $r_0$ , înălțime  $w_{i+j}-w_i$ ;
- volumul inelului nedeformat este egal cu volumul segmentului de sferă.



**Fig.3.19. Modelul geometric al deformării semifabricatului**

Calculul grosimii piesei deformate se face pe baza calculului raportului dintre o suprafață curentă  $S_0$  a unui inel nedeformat și suprafața elementului de calotă omolog  $S_c$  și având în vedere relația de proporționalitate dintre suprafețe și grosimi pe baza constanței volumului.

$$S_0 \cdot h_0 = S_c \cdot h \quad (3.91)$$

$$\frac{h}{h_0} = \frac{S_0}{S_c} = R \quad (3.92)$$

Pentru calculul acestui parametru  $R$  pe care l-am definit ca fiind o **variație a grosimii relative** am prezentat modelul geometric al deformării (Fig.3.19) și am elaborat într-un program Mathcad un model iterativ de calcul pentru variația relativă a grosimii  $R$ . Notățiile mărimilor geometrice utilizate în Fig. 3.19 sunt făcute în așa fel încât să corespundă cu cele utilizate în programul de calcul.

$$r_0 = \frac{100^2 + w^2}{2 \cdot w} \quad (3.93)$$

$$S_{0i} = \pi \cdot r_i^2 \quad (3.94)$$

$$r_{i+j} = r_i + 10 \quad (3.95)$$

$$S0_{i+j} = \pi \cdot r_{i+j}^2 \quad (3.96)$$

$$S0(i) = S0_{i+j} - S0_i \quad (3.97)$$

$$alfa_{i+j} = a \tan\left(\frac{r_{i+j}}{ro - w}\right) \quad (3.98)$$

$$c_{i+j} = 2 \cdot ro \cdot \sin\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right) \quad (3.99)$$

$$w_{i+j} = c_{i+j} \cdot \sin\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right) \quad (3.100)$$

$$b_{i+j} = c_{i+j} \cdot \cos\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right) \quad (3.101)$$

$$Sc_{i+j} = SI_{i,i+j} - SI_{i-j,i} \quad (3.102)$$

$$R(i, j) = \frac{S0_i}{Sc(i, j)} \quad (3.103)$$

Calculule și reprezentarea grafică au fost efectuate cu o secvență de program Mathcad prezentată în Anexa 4. Rezultatele acestor calcule au fost prezentate în Tab.3.4 iar reprezentarea grafică a variației grosimii relative  $R$  în funcție de rază a fost dată în Fig.3.20.

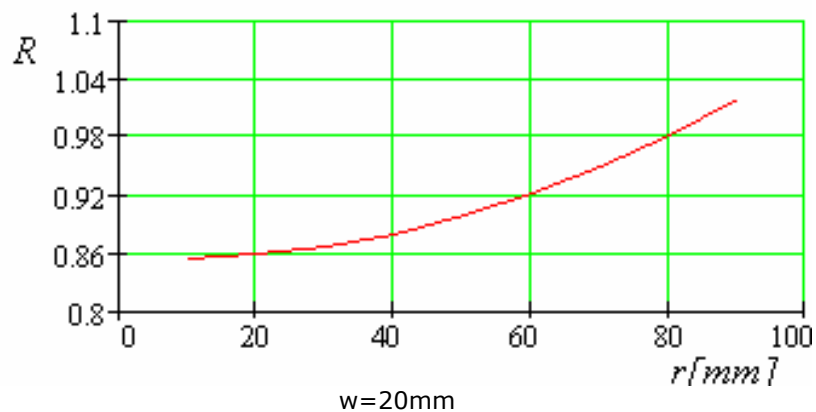
Analizând valorile grosimilor relative se pot face următoarele observații:

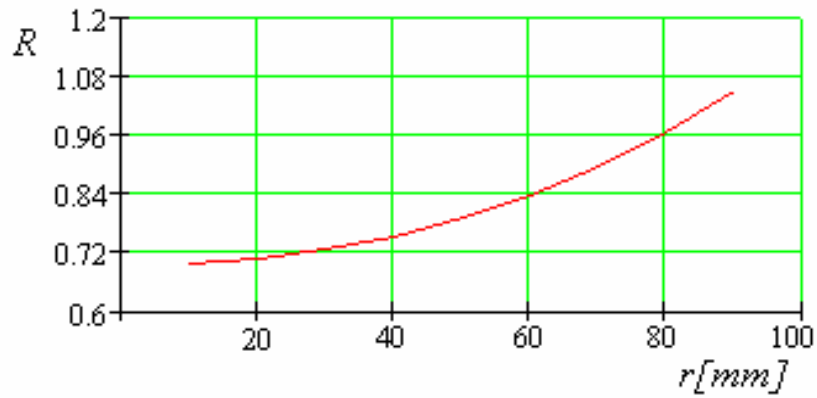
- grosimile relative scad odată cu creșterea deformației maxime a calotei  $w$ ;
- grosimile relative cresc odată cu creșterea razei (dinspre polul calotei spre baza acesteia);
- în apropiere de baza calotei grosimile relative devin supraunitare datorită faptului că se produc comprimări radiale ale semifabricatului ca urmare a scăderii lungimii cercurilor omoloage de la discul plan spre calotă.

Aceste relații de calcul a grosimii își mențin valabilitatea pentru grade de deformare de maxim 30%.

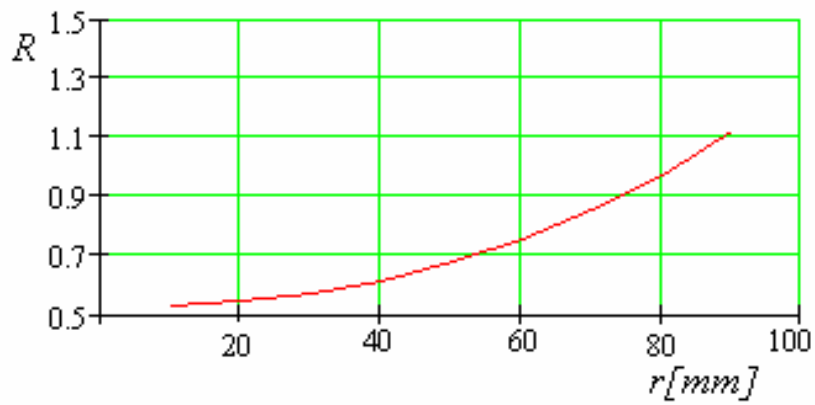
**Tab.3.4.** Variația grosimii relative  $R$  a semifabricatului (calculată pe baza relației 3.92) în funcție de raza curentă  $r$  a calotei deformate

r [mm]	R			
	w=20mm	w=30mm	w=40mm	w=50mm
10	0.853	0.699	0.528	0.365
20	0.858	0.708	0.542	0.384
30	0.867	0.727	0.571	0.424
40	0.880	0.754	0.616	0.486
50	0.898	0.792	0.677	0.573
60	0.921	0.840	0.756	0.688
70	0.948	0.899	0.854	0.835
80	0.980	0.969	0.974	1.019
90	1.018	1.051	1.118	1.243

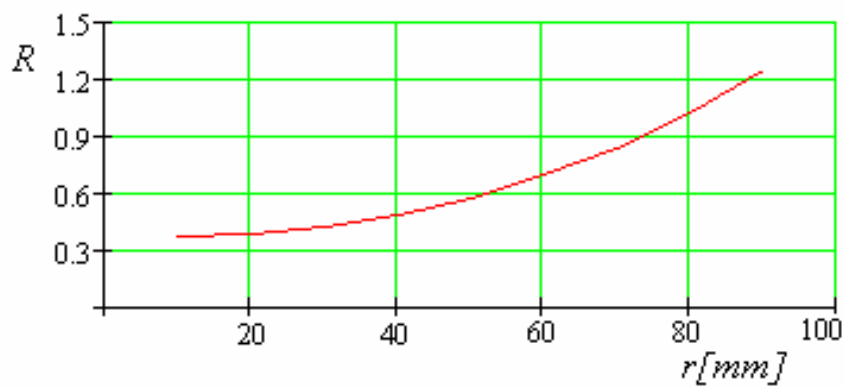




w=30mm



w=40mm



w=50mm

**Fig. 3.20. Variația grosimii relative a piesei deformate în funcție de rază**

Pentru determinarea grosimii curente  $h$ , în toate situațiile analizate anterior, pe baza relației 3.92 se obține:

$$h = h_0 \cdot R \quad (3.104)$$

Valorile grosimilor obținute pe baza relației (3.104) pentru toate grosimile inițiale  $h_0$  și pentru toate înălțimile  $w$  de la polul calotei sunt prezentate în Tab. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8.

**Tab.3.5.** Grosimea curentă  $h$  a semifabricatului în funcție de raza curentă  $r$  a calotei deformate pentru o grosime inițială a semifabricatului  $h_0=0.5\text{mm}$

r [mm]	h			
	w=20mm	w=30mm	w=40mm	w=50mm
10	0.427	0.350	0.264	0.182
20	0.429	0.354	0.271	0.192
30	0.433	0.363	0.286	0.212
40	0.440	0.377	0.308	0.243
50	0.449	0.396	0.338	0.286
60	0.460	0.420	0.378	0.344
70	0.474	0.449	0.427	0.418
80	0.490	0.484	0.487	0.509
90	0.509	0.525	0.559	0.622

**Tab.3.6.** Grosimea curentă  $h$  a semifabricatului în funcție de raza curentă  $r$  a calotei deformate pentru o grosime inițială a semifabricatului  $h_0=0.8\text{mm}$

r [mm]	h			
	w=20mm	w=30mm	w=40mm	w=50mm
10	0.683	0.559	0.422	0.292
20	0.686	0.567	0.434	0.307
30	0.693	0.581	0.457	0.339
40	0.704	0.604	0.493	0.389
50	0.718	0.634	0.541	0.458
60	0.736	0.672	0.605	0.550
70	0.758	0.719	0.683	0.668
80	0.784	0.775	0.779	0.815
90	0.814	0.841	0.894	0.995



**Tab.3.7.** Grosimea curentă  $h$  a semifabricatului în funcție de raza curentă  $r$  a calotei deformate pentru o grosime inițială a semifabricatului  $h_0=1.3\text{mm}$ 

r [mm]	h			
	w=20mm	w=30mm	w=40mm	w=50mm
10	1.109	0.909	0.686	0.474
20	1.115	0.921	0.705	0.499
30	1.126	0.945	0.743	0.551
40	1.144	0.981	0.800	0.631
50	1.167	1.030	0.880	0.744
60	1.197	1.092	0.982	0.894
70	1.232	1.168	1.111	1.086
80	1.274	1.259	1.266	1.324
90	1.323	1.366	1.453	1.616

**Tab.3.8.** Grosimea curentă  $h$  a semifabricatului în funcție de raza curentă  $r$  a calotei deformate pentru o grosime inițială a semifabricatului  $h_0=2\text{mm}$ 

r [mm]	h			
	w=20mm	w=30mm	w=40mm	w=50mm
10	1.706	1.398	1.056	0.730
20	1.715	1.417	1.084	0.768
30	1.733	1.453	1.143	0.847
40	1.760	1.509	1.231	0.971
50	1.796	1.584	1.353	1.145
60	1.841	1.680	1.511	1.375
70	1.896	1.797	1.709	1.670
80	1.961	1.937	1.948	2.038
90	2.036	2.102	2.235	2.486

### **3.5. Concluzii**

În prima parte a acestui capitol am prezentat elemente comparative referitoare la solicitarea unei plăci circulare subțiri în cazul unei ambutisări clasice și în cazul în care aceasta este supusă la o presiune uniform distribuită. Am descris analitic tensiunile și deformațiile plăcii supusă la presiunea uniform distribuită pentru trei cazuri de fixare pe contur: simplu rezemată, încastrată și semiîncastrată până în momentul apariției deformațiilor plastice. Pe baza analizei valorilor tensiunii care apar în placă se observă că acestea sunt maxime în centrul plăcii în toate situațiile de fixare ceea ce duce la concluzia că în această zonă vor apare prima dată deformațiile plastice.

În continuare am făcut o descriere analitică a tensiunilor și deformațiilor plăcilor circulare subțiri încastrate pe contur la solicitarea în domeniul plastic cu deformații mari. Descrierea stării de tensiune și deformare am făcut-o în primă fază în ipoteza cazului general al teoriei deformațiilor plastice mari pentru plăci circulare subțiri încastrate pe contur. Această metodă rezolvă problema tensiunilor și deformațiilor plastice într-o manieră satisfăcătoare și prezintă distribuția deformațiilor tangențiale precum și raportul tensiunilor principale în timpul solicitării membranei. Metoda poate fi aplicată la estimarea presiunii necesare realizării unor deformații mari ale membranei circulare încastrate pe contur supuse acțiunii unei presiuni hidraulice. Metoda oferă posibilitatea de a estima condițiile tehnologice pentru realizarea prin deformare plastică hidraulică a unor table de diverse dimensiuni dar este foarte laborioasă și dificil de aplicat.

Datorită acestui fapt, s-a emis ipoteza formei de calotă sferică a plăcii deformate, ipoteză care permite un calcul mai puțin laborios al parametrilor deformării, dar care este suficient de exact.

Pe baza analizei distribuției tensiunilor și deformațiilor care apar la o calotă sferică de geometrie cunoscută supusă unei presiuni uniform distribuite pe fața concavă a acesteia **am determinat analitic o expresie originală (relația 3.66) a presiunii necesare deformării care descrie dependența dintre presiune, grosimea semifabricatului și înălțimea la polul calotei pentru un material**

**caracterizat prin constanta  $K$  și coeficientul de anizotropie mediu  $\nu$** . Această expresie, prin valoarea calculată a presiunii care poate fi considerată o măsură a stării de solicitare a materialului, pune în evidență zonele de tranziție dintre deformările elastice spre cele plastice fără ecrusare, respectiv trecerea spre deformările plastice în care apare fenomenul de ecrusare a materialului.

Modificarea de formă și dimensiuni a plăcii semifabricat în timpul deformării presupune un consum energetic. Pe baza acestor observații **am propus o metodă originală a calculului presiunii necesare deformării din considerente energetice. Această metodă se bazează pe faptul că energia minimă necesară deformării unui semifabricat de volum cunoscut se poate determina pe baza ipotezelor de plasticitate, iar energia hidraulică cedată semifabricatului de către fluidul de lucru se poate calcula cunoscând parametri hidraulici ai fluidului.** Ținând seama de observațiile de mai sus **am dedus două relații de calcul originale a presiunii necesare deformării (relațiile 3.79 și 3.90), relații care, în afară de dimensiunile geometrice ale piesei de dinainte și după deformare, definesc presiunea doar în funcție de limita de curgere a materialelor.** Relațiile (3.79) și (3.90) le-am determinat în două ipoteze de deformare: ipoteza transformării unui semifabricat în formă de disc

Într-o piesă de formă de calotă sferică și ipoteza asimilării energiei de deformare a semifabricatului în formă de disc cu energia necesară deformării unei plăci pătrate echivalente de aceeași grosime și suprafață cu cea a discului, prin modificarea uneia dintre dimensiuni până când suprafața plăcii pătrate deformate devine egală cu suprafața calotei sferice obținute din disc.

Prin compararea rezultatelor obținute conform relațiilor (3.66), (3.79) și (3.90), reprezentate în Fig. 3.15 am pus în evidență faptul că diferențele dintre aceste variante de calcul nu sunt mari.

**Propunerea privind optimizarea calculului presiunii necesare deformării se dovedește a fi validă întrucât s-au obținut două relații de calcul (3.79) și (3.90) mai puțin laborioase decât alte relații cunoscute în literatura de specialitate, rezultatele obținute având diferențe acceptabile din punct de vedere practic.**

Pentru o mai bună înțelegere a modificării formei și dimensiunilor pieselor din tablă subțire prelucrate prin deformare plastică hidraulică **am definit gradul de deformare  $\psi$  a suprafeței semifabricatului (relația 3.73)**. Acest grad de deformare este principal diferit față de coeficienții de ambutisare care, în diverse forme de explicitare exprimă rapoarte dintre diametrul inițial și cel final al pieselor dar care nu evidențiază gradul de modificare a suprafeței semifabricatului.

Problema descrierii grosimii piesei deformate în funcție de poziția elementului de calotă față de raza semifabricatului nu este rezolvată teoretic în totalitate în literatura de specialitate, datorită dificultăților care apar în rezolvarea ecuațiilor diferențiale care descriu fenomenul deformării (relația 3.51).

**Având în vedere acest fapt am realizat o metodologie de calcul originală a grosimii curente a piesei deformate în funcție de rază, pe baza variației suprafețelor omoloage ale piesei nedeformate respectiv deformate având la bază următoarele observații: forma piesei deformate este o calotă sferică; un punct de pe discul de grosime  $h_0$  nedeformat se deplasează, în timpul deformării, radial față de raza sferei din care face parte calota (Fig.3.19); suprafața inelară de rază  $r_i$  și  $r_{i+j}$  și grosime  $h_0$  se transformă într-un segment de sferă de raza sferei  $r_0$ , înălțime  $w_{i+j}-w_i$ ; volumul inelului nedeformat este egal cu volumul segmentului de sferă.**

**În acest scop am definit un parametru  $R$  ca fiind o variație relativă a grosimii piesei am prezentat modelul geometric al deformării (Fig.3.19) și am elaborat într-un program Mathcad prezentat în Anaxa 4 un model iterativ de calcul pentru variația relativă a grosimii  $R$ .**

Analizând valorile grosimilor relative se pot trage următoarele concluzii: grosimile relative scad odată cu creșterea deformației maxime a calotei  $w$  și cresc odată cu creșterea razei (dinspre polul calotei spre baza acesteia); în apropiere de baza calotei grosimile relative devin supraunitare datorită faptului că se produc comprimări radiale ale semifabricatului ca urmare a scăderii lungimii cercurilor omoloage de la discul plan spre calotă. Relațiile de calcul obținute în cadrul acestui capitol oferă posibilitatea dezvoltării unor cercetări teoretice ulterioare referitoare la tehnologiile de deformări plastice mari.

## **CAPITOLUL 4**

### **CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ HIDRAULICĂ (DPH) A PLĂCILOR SUBȚIRI ÎNCASTRATE PE CONTUR**

#### **4.1. Generalități**

Încercările experimentale au vizat validarea rezultatelor teoretice care descriu fenomenul deformării libere cu deformații mari a unor plăci circulare subțiri de grosimi diferite, încastrate pe contur, supuse unor presiuni hidraulice.

Încercările experimentale de deformare plastică hidraulică a plăcilor se pot face în două moduri principial diferite:

1. urmărirea gradului de deformare în funcție de un șir de valori bine definite de presiuni;
2. măsurarea presiunii necesare pentru realizarea unui șir de grade de deformare bine definite (metoda pas cu pas).

În urma încercărilor preliminare pe care le-am efectuat am ajuns la concluzia că prima metodă nu asigură o repetabilitate suficient de bună a rezultatelor încercărilor datorită imposibilității practice de a menține reglaje suficient de exacte ale supapelor de reglare a presiunii, ceea ce a dus la opțiunea utilizării celei de-a doua metode menționată anterior.

#### **4.2. Cercetări experimentale privind deformarea plastică hidraulică a plăcilor subțiri încastrate pe contur**

În vederea efectuării încercărilor experimentale **am proiectat și executat în totalitate o instalație experimentală** pentru studiul deformării plastice hidraulice ale plăcilor subțiri încastrate pe contur.

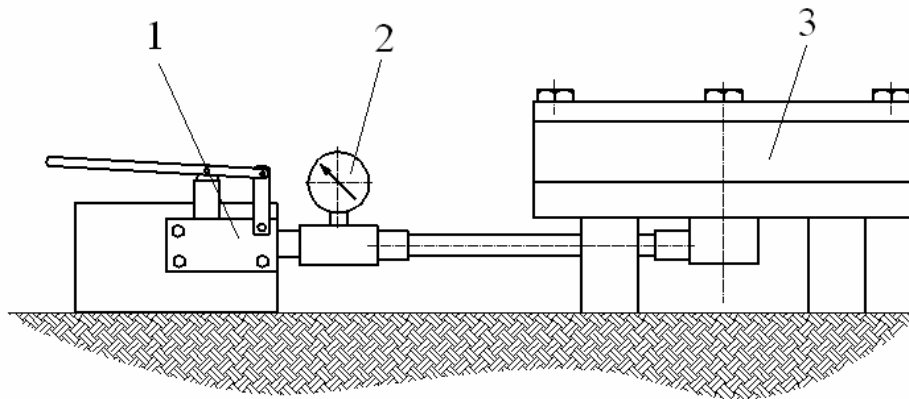
##### **4.2.1. Descrierea instalației experimentale pentru studiul deformării plastice hidraulice a plăcilor subțiri încastrate pe contur**

Instalația experimentală pentru studiul deformării plastice hidraulice a plăcilor subțiri încastrate pe contur (Fig.4.1) constă dintr-un dispozitiv cu ajutorul căruia se pot executa deformări hidraulice ale semifabricatelor de tip placă, dispozitiv care este prevăzut cu aparatura necesară urmării evoluției deformării semifabricatului în funcție de presiunea de lucru.

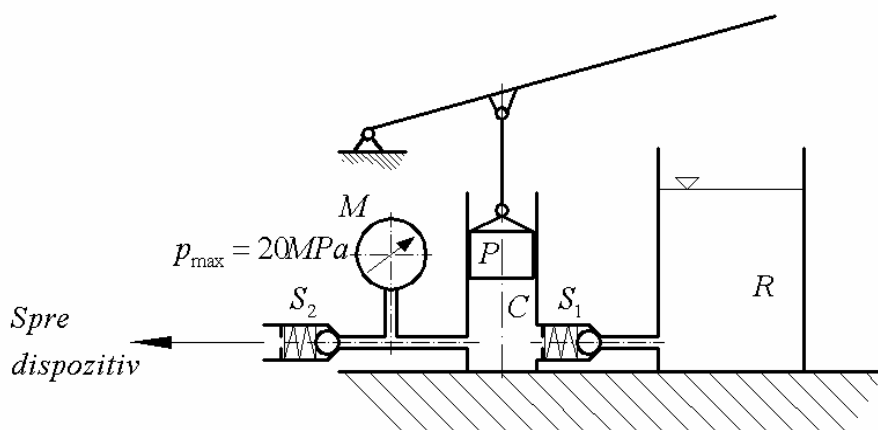
Principalele părți componente ale instalației sunt:

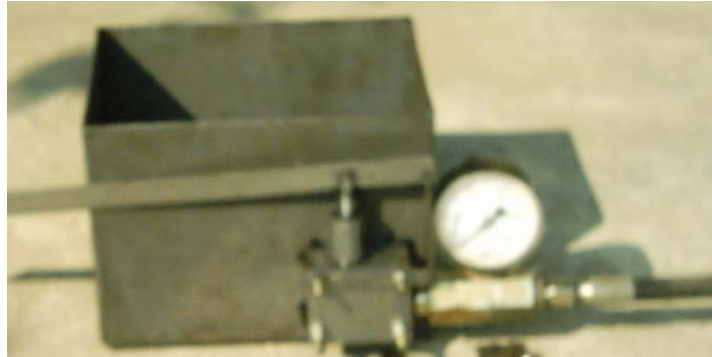
- 1.Sursa de energie hidraulică;
- 2.Aparatura de măsurare a presiunii;
- 3.Dispozitivul de deformare hidraulică propriu-zis.

1.Sursa de energie hidraulică (Fig.4.2) este o pompă cu piston clasică cu simplă acțiune, cu acționare manuală. Presiunea maximă pe care o poate realiza pompa este de aproximativ 20 Mpa (200 bar).



**Fig.4.1. Instalația experimentală pentru deformarea plastică hidraulică a plăcilor subțiri încastrate pe contur**





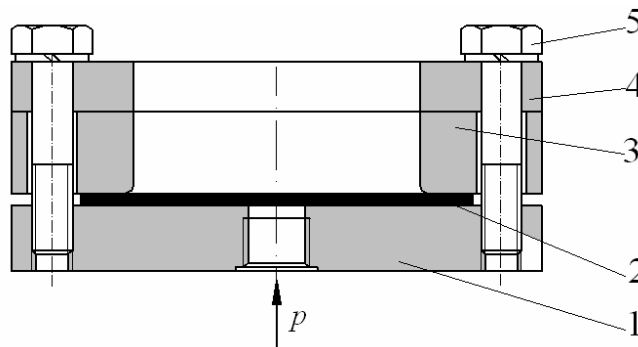
**Fig.4.2. Sursa de energie hidraulică**

Principalele părți componente ale acestei pompe sunt următoarele: un rezervor de ulei  $R$  cu o capacitate de  $2 \text{ dm}^3$  racordat, prin intermediul unei supape de sens unic  $S_1$ , la partea inferioară a cilindrului de lucru  $C$ . Supapa  $S_1$  are rolul de a împiedica revenirea uleiului în rezervor la cursa activă a pistonului (descendentă). În interiorul cilindrului  $C$ , pistonul  $P$ , realizat sub formă de plunjer, execută o mișcare alternativă rectilinie antrenat de un sistem de bare articulate. Partea inferioară a cilindrului este pusă în legătură cu orificiul la care se racordează dispozitivul de deformare prin intermediul supapei de sens unic  $S_2$ .

2. Aparatura de măsurare a presiunii este materializată de un manometru cu clasa de precizie 2,5 presiunea maximă de măsurare fiind 100 bar.

3. Dispozitivul de deformare plastică hidraulică propriu-zis (Fig.4.3) este compus dintr-o placă de bază  $1$  a cărei parte inferioară este racordată la pompă. Semifabricatul  $2$  este strâns între placa intermediară  $3$  și placa de închidere  $4$ . Întregul pachet de piese este strâns cu ajutorul unui ansamblu de șuruburi  $5$ .

Evoluția formei semifabricatului în timpul deformării este urmărită cu un set de instrumente de măsură cu ajutorul cărora se măsoară parametri geometrici ai profilului real al piesei deformate pentru diferite grade de deformare.





**Fig.4.3. Dispozitivul de deformare hidraulică**

#### 4.2.2. Probleme specifice instalației experimentale

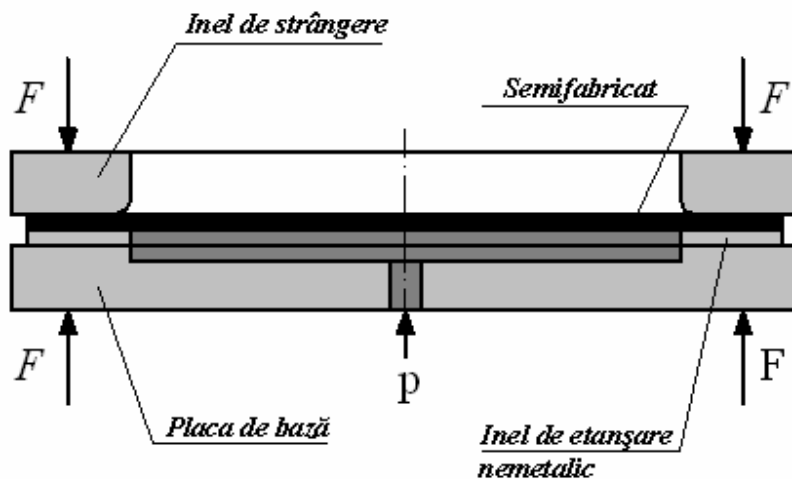
Pentru a se putea efectua în condiții optime încercările experimentale este necesar să fie îndeplinite două deziderate principale: asigurare etanșeității pentru a se evita pierderile de fluid de lucru și strângerea semifabricatului astfel încât să nu se producă nici pierderea etanșeității și nici alunecarea (retragerea) semifabricatului între elementele dispozitivului de deformare.

##### 4.2.2.1. Asigurarea etanșeității

Verificarea soluțiilor constructive de etanșare

Există mai multe metode (posibilități) de etanșare a semifabricatului

1. O primă metodă de etanșare este aceea că între semifabricat și placa inferioară a dispozitivului se dispune un element de etanșare nemetalic de forma plăcii de strângere (Fig.4.4).



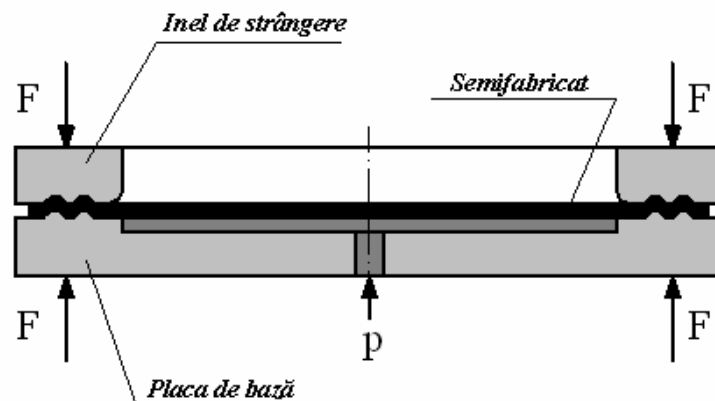
**Fig.4.4. Etanșare cu element nemetalic**

În urma efectuării încercărilor preliminare am ajuns la concluzia că această metodă asigură o etanșare relativ bună, dar, datorită faptului că pe partea semifabricatului pe care este dispus inelul de etanșare nemetalic se modifică condițiile de frecare dintre semifabricat și dispozitiv în sensul scăderii coeficientului de frecare, existând posibilitatea alunecării (retragerii) semifabricatului dintre elementele de strângere până la pierderea contactului dintre acesta și dispozitiv, ceea ce duce la pierderea totală a etanșeității (Fig.4.5).



**Fig.4.5. Exemplu de defect de prelucrare cu alunecării semifabricatului**

2. O altă metodă de etanșare este prezentată în Fig.4.6. în care dispozitivul și placa activă sunt profilate cu forme conjugate astfel încât în zona de strângere și etanșare semifabricatul să fie deformat. Și această metodă asigură condiții bune de etanșare, dar, datorită faptului că forțele necesare pentru strângerea materialului sunt foarte mari, în zonele deformate ale semifabricatului pot apare subțieri ale acestuia, subțieri care produc slăbiri în zonele respective, slăbiri ce au drept consecință ruperea semifabricatului în timpul procesului de deformare.

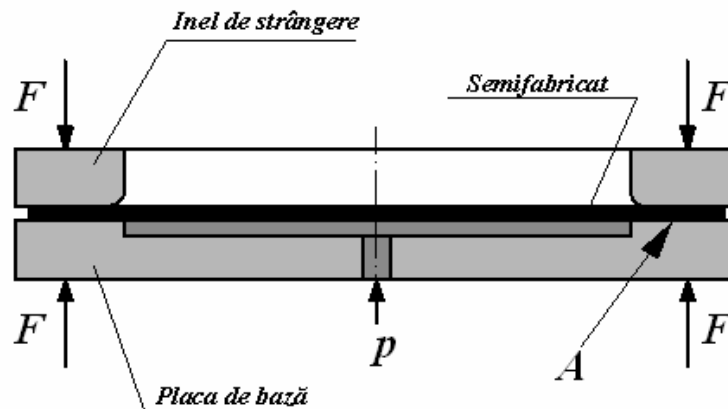






**Fig.4.6. Etanșare cu profilarea conjugată a elementelor de strângere**

3. Etanșarea utilizată pentru încercările efectuate în lucrarea de față este prezentată în Fig.4.7, suprafața de etanșare fiind o suprafață inelară plană la care suprafața de contact dintre dispozitiv și semifabricat a fost prelucrată în condiții de rugozitate și abateri de formă ale acesteia foarte mici (precise) astfel încât s-a eliminat necesitatea dispunerii unui element de etanșare suplimentar nemetalic, etanșarea făcându-se pe interstițiul dispozitiv-semifabricat, metal pe metal.



**Fig.4.7. Etanșare cu suprafață inelară plană**

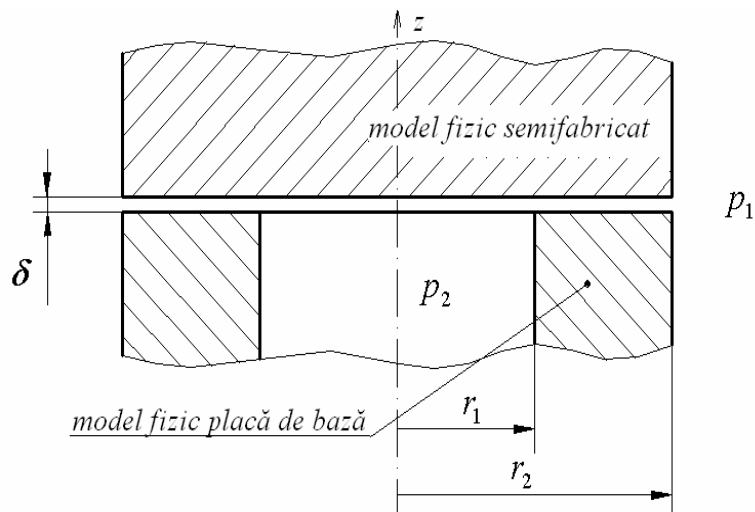
Încercările experimentale pe care le-am efectuat au dus la concluzia că această variantă asigură o etanșare suficient de bună a semifabricatului și, printr-o strângere corespunzătoare nu se produce alunecarea semifabricatului. Pierderile de lichid de lucru prin neetanșetăți există, dar ele sunt foarte mici astfel încât să poată asigura presiunea de lucru necesară deformării.

Estimarea pierderilor de lichid pentru a asigura presiunea necesară deformării

Datorită faptului că pe suprafața A de contact dintre placa de bază și semifabricat trebuie să se realizeze o etanșare cât mai bună, această suprafață a fost realizată cu o abatere foarte mică de la planeitate. Cu toate măsurile de

siguranță posibilă din punct de vedere tehnologic pentru acest tip de etanșare, între placa de bază și semifabricat vor exista interstiții prin care vor fi pierderi de lichid de lucru. Estimarea acestor pierderi se poate face cu ajutorul unui model matematic de curgere a lichidelor prin fante frontale circulare conform modelului fizic din Fig.4.8.

Determinarea debitului de lichid pierdut (respectiv a pierderilor de lichid) prin acest tip de fante se face pornind de la ecuațiile de mișcare și de continuitate scrise în coordonate cilindrice  $(r, z, \varphi)$  în care  $v_z = 0$  (viteza lichid de lucru este paralelă cu axa cilindrului)  $v_\varphi = 0$ ,  $v_r = v(r, z)$ .



**Fig.4.8. Curgerea lichidului prin fante circulare frontale**

Presupunând interstițiul  $\delta$  ca fiind zona de contact teoretic între semifabricat și placa de bază, pentru acest interstițiu ecuația de curgere are următoarea formă [ 6 ]:

$$v \frac{\partial v}{\partial r} = \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \quad (4.4)$$

Având în vedere că din ecuația (4.4) rezultă că:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v^2}{r} = 0 \quad (4.5)$$

precum și faptului că:

$$v \frac{\partial v}{\partial r} \leq v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \text{ prin înlocuirea acestor date în ecuația (4.1) aceasta devine:}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} = v \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r} \right) \quad (4.6)$$

care după integrare și determinarea constantelor exprimă valoarea vitezei astfel:

$$v = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dr} (z^2 - \delta \cdot z) \quad (4.7)$$

unde:

$\eta$  – coeficientul de viscozitate dinamică al lichidului

$\nu = \frac{\eta}{\rho}$  – coeficientul de viscozitate cinematică al lichidului

$\rho$  – densitatea lichidului

Debitul de lichid care trece prin fantă exprimat în funcție de viteza medie se poate scrie astfel:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \delta \cdot v_{med} \quad (4.8)$$

unde:

$$v_{med} = \frac{1}{\delta} \cdot \int_0^{\delta} v \cdot dz = \frac{1}{2 \cdot \eta} \frac{dp}{dr} \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} (z^2 - \delta \cdot z) dz \quad (4.9)$$

sau:

$$v_{med} = -\frac{\delta^3}{12 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (4.10)$$

De aici debitul:

$$Q = -\frac{\pi \cdot r \cdot \delta^3}{6 \cdot \eta} \cdot \frac{dp}{dr} \quad (4.11)$$

de unde:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{6 \cdot \eta \cdot Q}{\pi \cdot r \cdot \delta^3} \quad (4.12)$$

sau integrând după  $r$  și determinând constanta de integrare din condiția la limită  $p = p_2$  la  $r = r_1$  și  $p = p_1$  la  $r = r_2$  se obține:

$$p_1 - p_2 = -\frac{6 \cdot \eta \cdot Q}{\pi \cdot \delta^3} \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (4.13)$$

de unde se deduce debitul prin fanta frontală:

$$Q = (p_1 - p_2) \cdot \frac{\pi \cdot \delta^3}{6 \cdot \eta \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (4.14)$$

Alegând valori corespunzătoare pentru interstițiul  $\delta$ , și cunoscând geometria dispozitivului ( $r_1$  și  $r_2$ ) și coeficientul de vâscozitate al lichidului de lucru utilizat se poate calcula debitul pierdut prin interstițiu pentru diferite valori ale diferenței de presiune ( $p_1 - p_2$ ) care este de fapt presiunea de lucru. Acest debit pierdut poate fi interpretat și ca debitul minim de lichid pentru menținerea presiunii ( $p_1 - p_2$ ) necesară deformării.

Dintre toți parametri enunțați anterior cel mai dificil de apreciat este valoarea interstițiului  $\delta$  întrucât acesta este dat de eventualele abateri de grosime a semifabricatului tip placă plană. Având în vedere caracterul aleator al abaterilor de grosime, pentru estimarea valorii debitului de lichid pierdut se poate alege o valoare echivalentă a lui  $\delta$ . Admițând o abatere de grosime de 2%, pentru o grosime de 1

mm a semifabricatului, ar rezulta o abatere de 0,02mm. Întrucât această abatere de grosime nu este distribuită uniform pe întreaga suprafață de contact dintre placa de bază și semifabricat, pentru etapa de estimare a pierderilor, se va adopta o valoare echivalentă pentru  $\delta$  de 0,01mm.

Diferența de presiune ( $p_1 - p_2$ ) va fi determinată în principal de grosimea semifabricatului și de configurația piesei putând lua valori foarte diferite. Pentru calculul estimativ pe care mi l-am propus am considerat ( $p_1 - p_2$ ) = -10MPa.

Coeficientului de vâscozitate cinematică al lichidului folosit pentru deformare poate lua valori foarte diferite în funcție de tipul de lichid utilizat, o valoare uzuala putând fi  $\nu = 10^{-4} \frac{m^2}{s}$ . Densitatea lichidului  $\rho$  se situează în

jurul valorii de  $900 \frac{kg}{m^3}$ . Recapitulând :

$$(p_1 - p_2) = -10MPa = -1 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\delta = 0,01mm = 10^{-5} m$$

$$\nu = 10^{-4} \frac{m^2}{s}$$

$$\rho = 9 \cdot 10^2 \frac{kg}{m^3}$$

$$r_1 = 100mm = 10^{-1} m$$

$$r_2 = 120mm = 1,2 \cdot 10^{-1} m \text{ se poate calcula debitul pierdut:}$$

$$Q = (p_1 - p_2) \cdot \frac{\pi \cdot \delta^3}{6 \cdot \nu \cdot \rho \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}} =$$

$$= -1 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot (10^{-5})^3}{6 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^2 \cdot \ln \frac{5}{6}} \cong 0,319 \cdot 10^{-7} \frac{m^3}{s} = 0,0319 \frac{cm^3}{s}$$

Această valoare a debitului pierdut este nesemnificativă astfel încât se poate aprecia că etanșarea este suficient de bună.

#### 4.2.2.2. Strângerea semifabricatului. Calculul șuruburilor

Pentru funcționarea corectă a dispozitivului de deformare pachetul de piese componente este strâns cu ajutorul ansamblelor șurub-piuliță (Fig.4.9) cu o forță  $F_0$  de prestrângere pentru fiecare șurub.

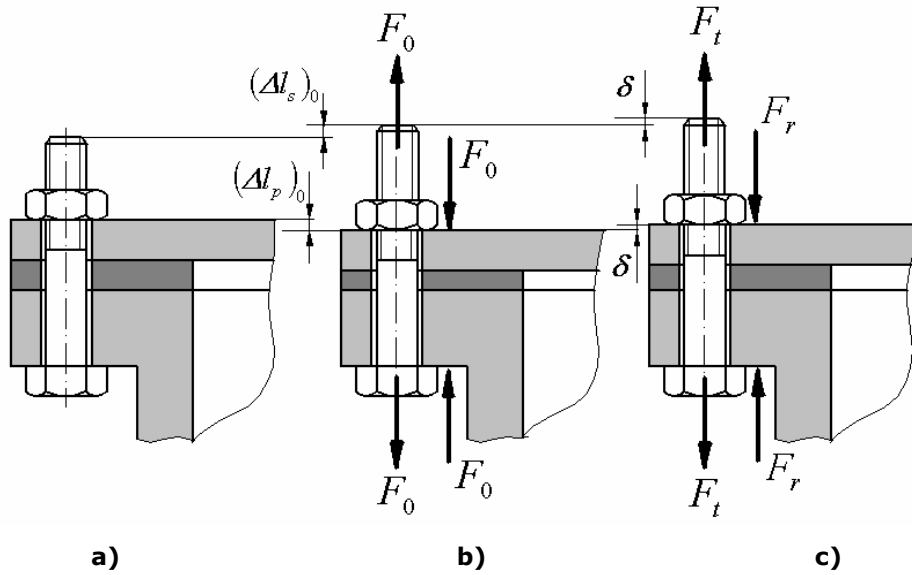
În perioada de funcționare, când în spațiul dintre placa de bază și semifabricat acționează presiunea hidrostatică  $p$ , peste forța de prestrângere  $zF_0$ ,  $z$  fiind numărul de șuruburi, se suprapune o forță de exploatare  $F$  care poate fi considerată ca o solicitare statică. În această fază de funcționare a ansamblului acesta trebuie să îndeplinească atât condiția de rezistență cât și de etanșare (menținerea contactului dintre piese).

Pentru determinarea relațiilor de legătură dintre forțele care apar într-o astfel de asamblare se construiește diagrama de funcționare a acesteia care reprezintă grafic dependența forță-deformație pentru șurub, respectiv pachetul de piese strânse [12].

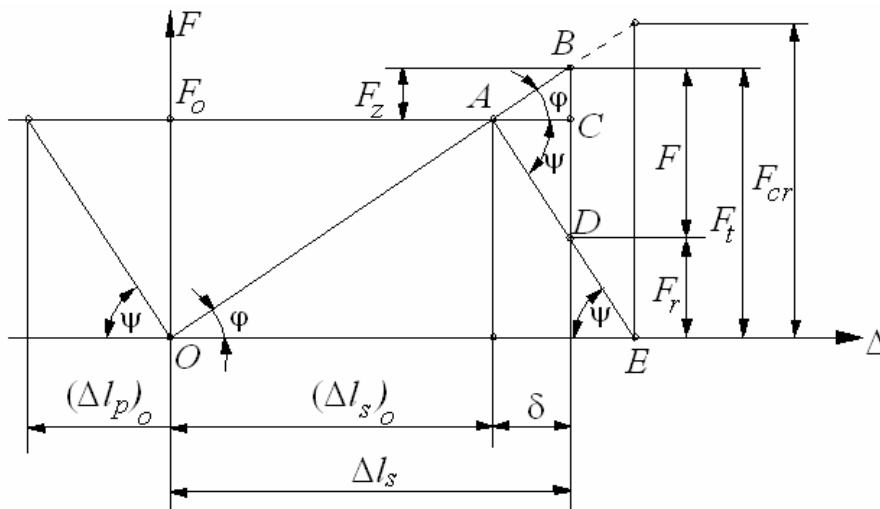
În Fig.4.9.a este reprezentat ansamblul înainte de strângere și fără presiunea interioară  $p$ . Fenomenele care se produc în asamblare după prestrângere și respectiv aplicarea presiunii sunt descrise în Fig. 4.9.

În poziția **a** piulița nu strânge pachetul de piese iar presiunea  $p$  lipsește, astfel încât deformațiile tuturor elementelor îmbinării sunt nule.

În poziția **b** după ce piulițele au fost strânse, fiecare șurub strânge asamblarea cu câte o forță  $F_0$  necesară pentru asigurarea etanșeității. Sub acțiunea forței  $F_0$  șurubul suportă o alungire  $(\Delta l_s)_0$  iar pachetul de piese o comprimare  $(\Delta l_p)_0$ . Admițând că solicitările se produc în domeniul elastic și că respectă legea lui Hooke se trasează cele două drepte care reprezintă dependența deformațiilor de forța de solicitare (Fig.4.10). Se translatează dreapta corespunzătoare deformațiilor pachetului până la suprapunerea forțelor de strângere inițială.



**Fig.4.9. Ansamblul șurub – piuliță cu strângere inițială supus la o forță axială**



**Fig. 4.10. Diagrama de funcționare a ansamblului șurub – piuliță cu strângere inițială supus la o forță axială**

Pantele celor două drepte reprezintă rigiditățile șurubului și respectiv a pachetului de piese strânse.

$$c_s = \frac{F_0}{(\Delta l_s)_0} = \operatorname{tg} \varphi \quad (4.15)$$

$$c_p = \frac{F_0}{(\Delta l_p)_0} = \operatorname{tg} \psi \quad (4.16)$$

În timpul exploatării presiunea fluidului care acționează sub semifabricat determină o forță  $F_{fl}$  care produce în fiecare din cele  $z$  șuruburi ale asamblării câte

o forță de exploatare  $F = \frac{F_{fl}}{z}$ . Sub acțiunea forței de exploatare  $F$  șuruburile se alungesc suplimentar cu  $\delta$  (Fig.4.9.c) permițând pachetului de piese strânse să-și revină elastic cu aceeași cantitate. Deformațiile finale  $\Delta l_s$  pentru șurub și  $\Delta l_p$  pentru pachetul de piese sunt:

$$\Delta l_s = (\Delta l_s)_0 + \delta \quad (4.17)$$

$$\Delta l_p = (\Delta l_p)_0 - \delta \quad (4.18)$$

Deformația finală  $\Delta l_s$  corespunde tensionării șurubului cu forța totală  $F_t \geq F_0$  iar deformația  $\Delta l_p$  corespunde comprimării pachetului cu forța remanentă  $F_r \leq F_0$ .

$$F_t = F + F_r = F_0 + F_z \quad (4.19)$$

unde  $F_z$  este creșterea forței axiale din șurub după apariția forței de exploatare  $F$ . Considerând în Fig.4.10 triunghiurile ABC și ACD se poate scrie:

$$F = \overline{BD} = \overline{BC} + \overline{CD} = \overline{AC} \cdot (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \psi)$$

$$\overline{AC} = \frac{F}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \psi} \quad (4.20)$$



$$F_z = \overline{AC} \cdot \operatorname{tg} \varphi = \frac{F \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \psi} \text{ sau ținând seama de ( 4.15 ) și (4.16) se poate}$$

scrie:

$$F_z = \frac{F \cdot c_s}{c_s + c_p} \quad (4.21)$$

Analizând această relație se observă că la rigidități mai mici ale șurubului față de cele ale pachetului de piese, forța suplimentară  $F_z$  este mai redusă.

Forța totală și forța remanentă se pot scrie astfel:

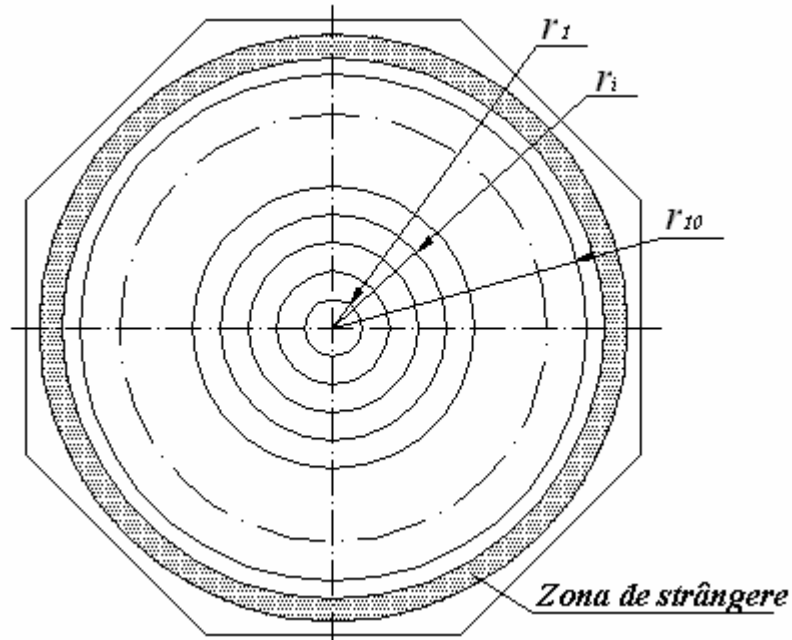
$$F_t = F_0 + F \cdot \frac{c_p}{c_s + c_p} \quad (4.22)$$

$$F_r = F_0 - F \cdot \frac{c_p}{c_s + c_p} \quad (4.23)$$

În condiții optime forța totală trebuie să fie cât mai mică iar forța remanentă să nu devină nulă (s-ar pierde contactul între piesele componente și implicit s-ar pierde etanșeitaea).

#### 4.2.3. Pregătirea semifabricatului în vederea încercării

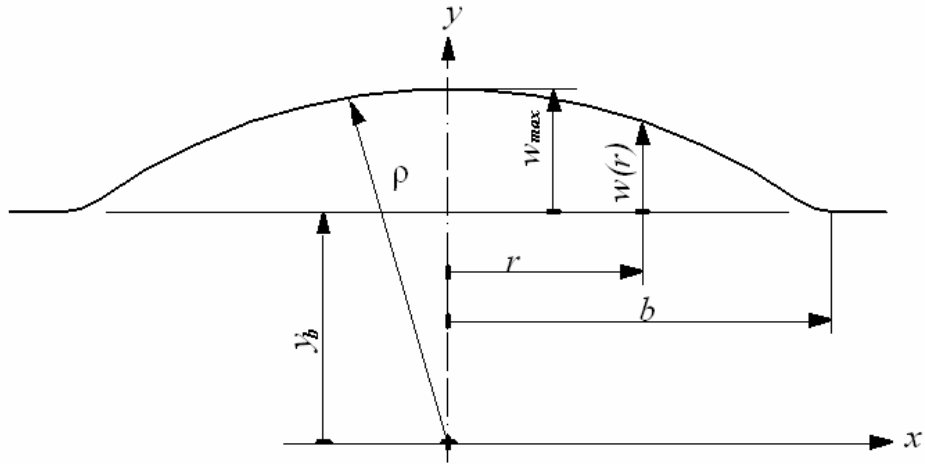
Pentru a se putea efectua măsurători legate de evoluția formei semifabricatului în timpul derformării și compararea acesteia cu forma inițială plană este necesară realizarea unui trasaj pe suprafața probei care să fie cât mai precis și cât mai vizibil. În vederea trasării probei, semifabricatul a fost supus unei acoperiri galvanice foarte fine de cupru prin imersare, după o degresare prealabilă, într-o soluție de  $\text{CuSO}_4$ . Această acoperire dă culoarea roșiatică a probelor în fotografiile din lucrare. După această operație am realizat un carioaj în coordonate polare format din cercuri concentrice de raze de 10,20....100 mm și un număr de 4 raze decalate cu  $90^\circ$  una față de cealaltă. Prin urmărirea deplasării nodurilor acestui carioaj am urmărit geometria deformării. Semifabricatele supuse încercărilor au fost table subțiri din oțel laminate la rece STAS 9684-89 de grosimi de 0,5mm, 0,8mm, 1,3mm și 2mm.



**Fig.4.11. Trasarea semifabricatului supus încercării**

#### **4.2.4. Încercări pentru validarea ipotezei forme de calotă sferică a semifabricatului în timpul deformării**

Această încercare am efectuat-o pe probe de forma din Fig.4.11 supuse unor succesiuni de grade de deformare diferite. Pieselor obținute în acest mod le-am determinat experimental profilele secțiunilor axiale, profile care au fost comparate cu profilele teoretice ale calotelor sferice care au diametrul bazei  $2b$  și înălțimea  $w_{max}$  la polul calotei identice cu cele ale probei. Măsurătorile le-am efectuat pentru 4 înălțimi la pol  $w_{max}$  ale calotei.



**Fig.4.12. Definierea parametrilor geometrici ai profilului unei secțiuni axiale a calotei**

În conformitate cu profilul definit în Fig.4.12, din considerente geometrice privind forma profilului calotei se determină variația înălțimii  $w(r)$  a profilului teoretic astfel:

$$\rho^2 = b^2 + (\rho - w_{max})^2 \quad (4.24)$$

în care  $\rho$  reprezintă raza sferei din care provine calota

Din (4.24) rezultă că:

$$\rho = \frac{w_{max}}{2} \left( 1 + \frac{b^2}{w_{max}^2} \right) \quad (4.25)$$

știind că:

$$\rho^2 = x^2 + y^2 \quad (4.26)$$

rezultă că:

$$y = \sqrt{\frac{w_{max}^2}{4} \left( 1 + \frac{b^2}{w_{max}^2} \right)^2 - x^2} \quad (4.27)$$

respectiv:

$$y_b = \sqrt{\frac{w_{max}^2}{4} \left( 1 + \frac{b^2}{w_{max}^2} \right) - b^2} \quad (4.28)$$

știind că :

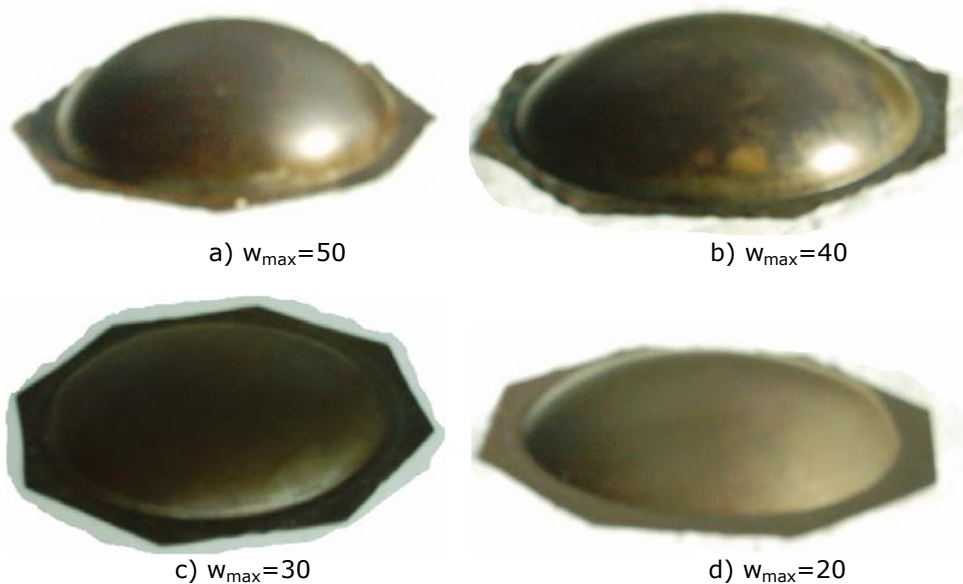
$$w(r) = y - y_b \quad (4.29)$$

rezultă că:

$$w(r) = \sqrt{\frac{w_{max}^2}{4} \left( 1 + \frac{b^2}{w_{max}^2} \right) - r^2} - \sqrt{\frac{w_{max}^2}{4} \left( 1 + \frac{b^2}{w_{max}^2} \right) - b^2} \quad (4.30)$$

Definirea parametrului  $w(r)$  am făcut-o în mod explicit deoarece măsurătorile privind geometria profilului piesei deformate pot fi efectuate cel mai riguros prin determinarea acestui parametru (care poate fi măsurat).

Rezultatele calculului teoretic efectuat cu ajutorul unei secvențe de program Mathcad prezentată în Anexa 5 precum și rezultatele încercărilor experimentale au fost centralizate în tabelul 4.1 și le-am reprezentat grafic în Fig. 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, reprezentare pe care am efectuat-o de asemenea cu ajutorul programului Mathcad.

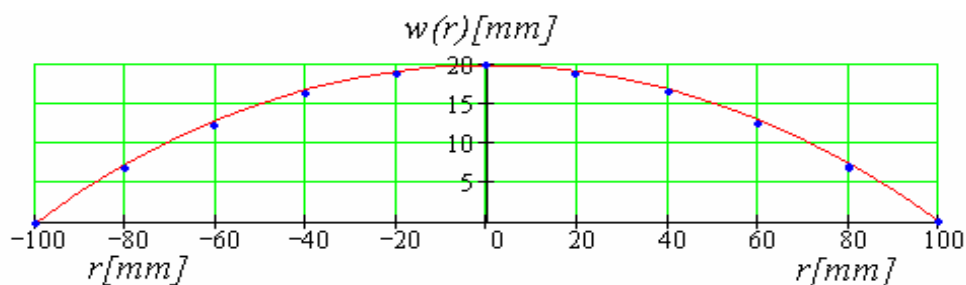


**Fig.4.13. Semifabricate deformate**

Peste curbele teoretice de variație a profilului unei secțiuni de calotă am suprapus punctele determinate experimental prin măsurarea profilului real al piesei deformate (Fig.4.14, 4.15, 4.16, 4.17).

**Tab. 4.1.** Înălțimea curentă a profilului calotei obținută prin calcul  $w_{\text{teor}}(r)$  și experimental  $w_{\text{exp}}(r)$

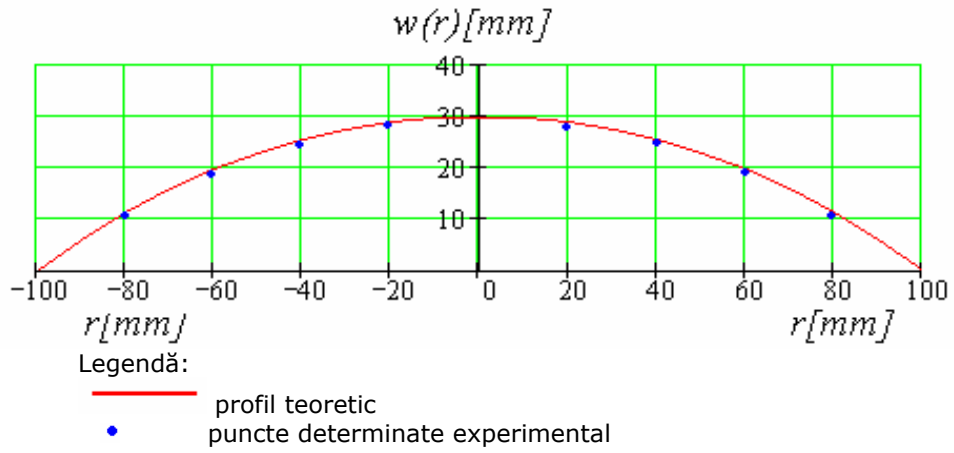
r [mm]	$w_{\text{teor}}(r)$				$w_{\text{exp}}(r)$			
	$w_{\text{max}}=20$ [mm]	$w_{\text{max}}=30$ [mm]	$w_{\text{max}}=40$ [mm]	$w_{\text{max}}=50$ [mm]	$w_{\text{max}}=20$ [mm]	$w_{\text{max}}=30$ [mm]	$w_{\text{max}}=40$ [mm]	$w_{\text{max}}=50$ [mm]
-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0
-80	7.386	11.437	15.934	21.047	7.0	11.0	15.5	20.5
-60	12.982	19.806	27.004	34.659	12.5	19.5	26.5	34.0
-40	16.905	25.542	34.374	43.427	16.5	25.0	33.5	42.5
-20	19.230	28.896	38.614	48.390	19.0	28.5	38.0	48.0
0	20.000	30.000	40.000	50.000	20	30	40	50
20	19.230	28.896	38.614	48.390	19.0	28.5	38.0	48.0
40	16.905	25.542	34.374	43.427	16.5	25.0	33.5	42.5
60	12.982	19.806	27.004	34.659	12.5	19.5	26.5	34.0
80	7.386	11.437	15.934	21.047	7.0	11.0	15.5	20.5
100	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0



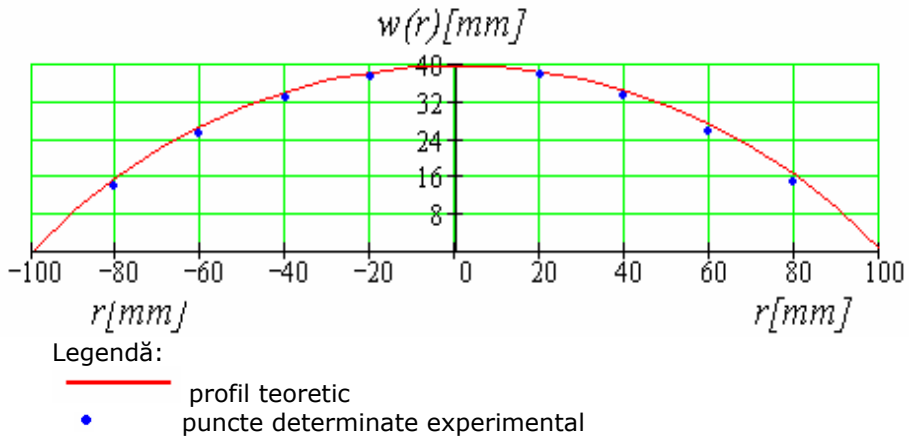
Legendă:

- profil teoretic
- puncte determinate experimental

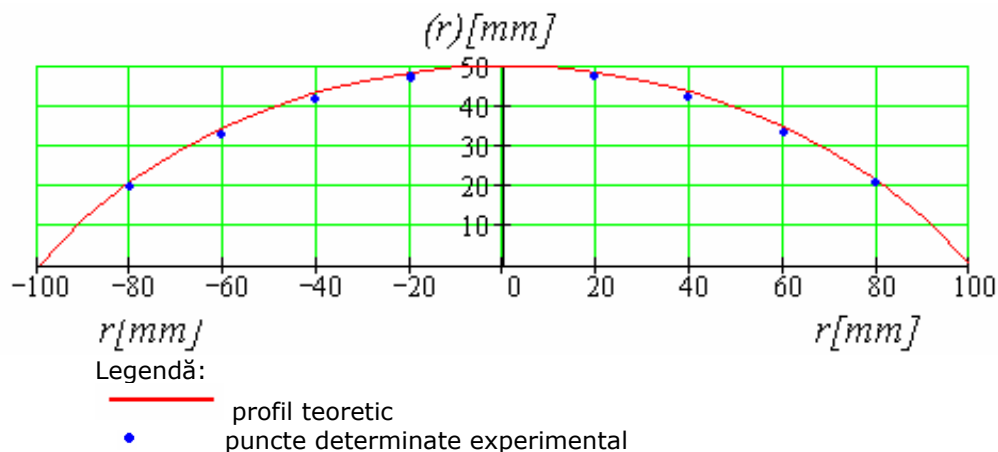
**Fig.4.14.** Comparație între profilul teoretic și profilul determinat experimental pentru semifabricatul deformat la  $w=20\text{mm}$



**Fig.4.15. Comparație între profilul teoretic și profilul determinat experimental pentru semifabricatul deformat la  $w=30\text{mm}$**



**Fig.4.16. Comparație între profilul teoretic și profilul determinat experimental pentru semifabricatul deformat la  $w=40\text{mm}$**



**Fig.4.17. Comparație între profilul teoretic și profilul determinat experimental pentru semifabricatul deformat la  $w=50\text{mm}$**

Valorile  $w(r)$  calculate pentru un profil de calotă sferică sunt suficient de apropiate de cele măsurate pe piesele deformate astfel încât ipoteza privind forma de calotă sferică a piesei deformate poate fi acceptată.

#### 4.2.5. Determinarea experimentală a presiunii necesare deformării libere a semifabricatului.

Încercările experimentale le-am efectuat pe semifabricate de forma din Fig.3.11 cu grosimi  $h_0$  de 0,5; 0,8; 1,3 și 2,0mm.

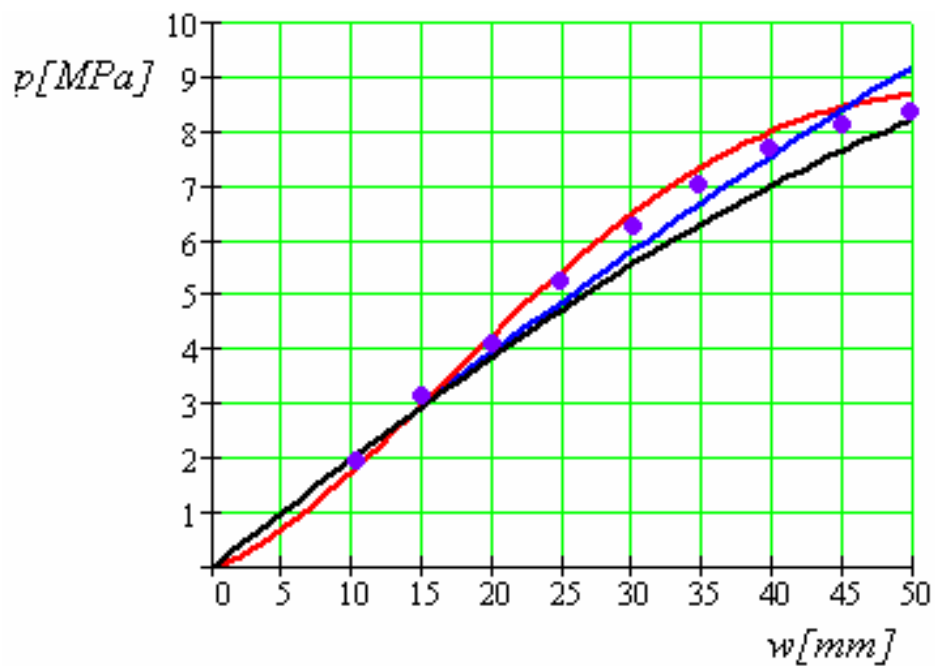
Metodologia de efectuare a încercărilor a fost următoarea: am urmărit valoarea experimentală a presiunii necesare deformării pentru un șir de valori ale înălțimii maxime  $w_{max}=10\text{mm}$ , 15mm, 20mm, 25mm, 30mm, 35mm, 40mm, 45mm, 50mm ale polului calotei, rezultatele obținute fiind suprapuse peste graficele teoretice de dependență între aceiași parametri, trasate în conformitate cu relațiile 3.66, 3.79 și 3.90 din Capitolul 3.

Rezultatele măsurătorilor le-am centralizat în Tab.4.2.

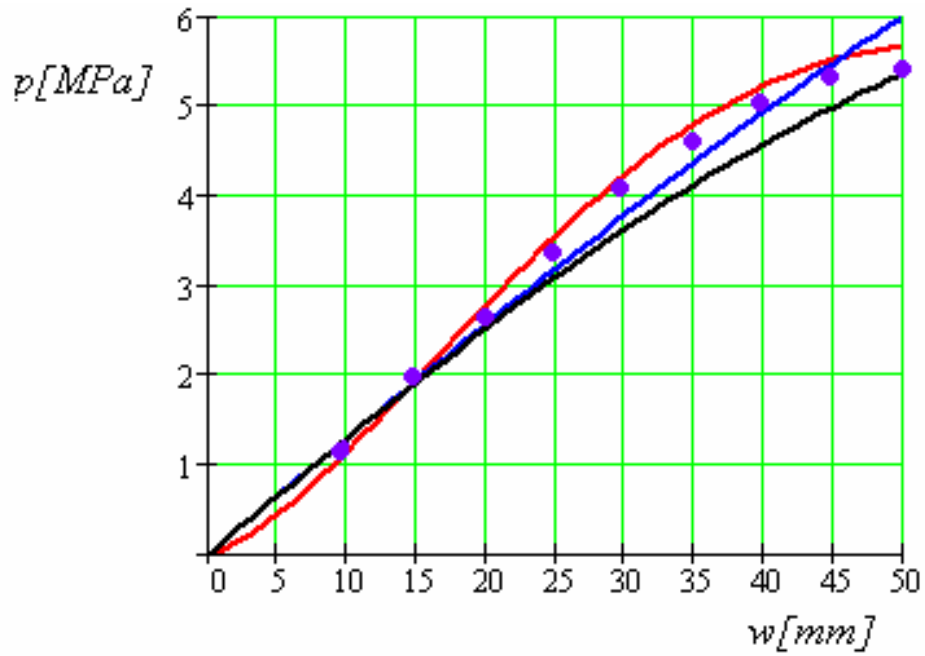
Din analiza graficelor din Fig.4.18 se poate formula următoarea observație importantă: determinările experimentale nu se suprapun în totalitate cu curbele teoretice de variație  $p(w)$  determinate la capitolul 3 dar diferențele nu sunt semnificative din punct de vedere practic. Neconcordanța apărută între cele patru variante de determinare a presiunii necesare obținerii unei anumite înălțimi la polul calotei  $w_{max}$  se explică astfel: curbele determinate teoretic diferă între ele datorită faptului că fiecare din cele trei formule de calcul a presiunii 3.66, 3.79 și 3.90 a fost dedusă pe baza unor criterii diferite unele față de celelalte iar rezultatele experimentale pot fi afectate de unele erori de măsurare a profilului calotei sau a valorii presiunii.

**Tab.4.2.** Presiunea de deformare în funcție de înălțimea polului calotei obținută experimental

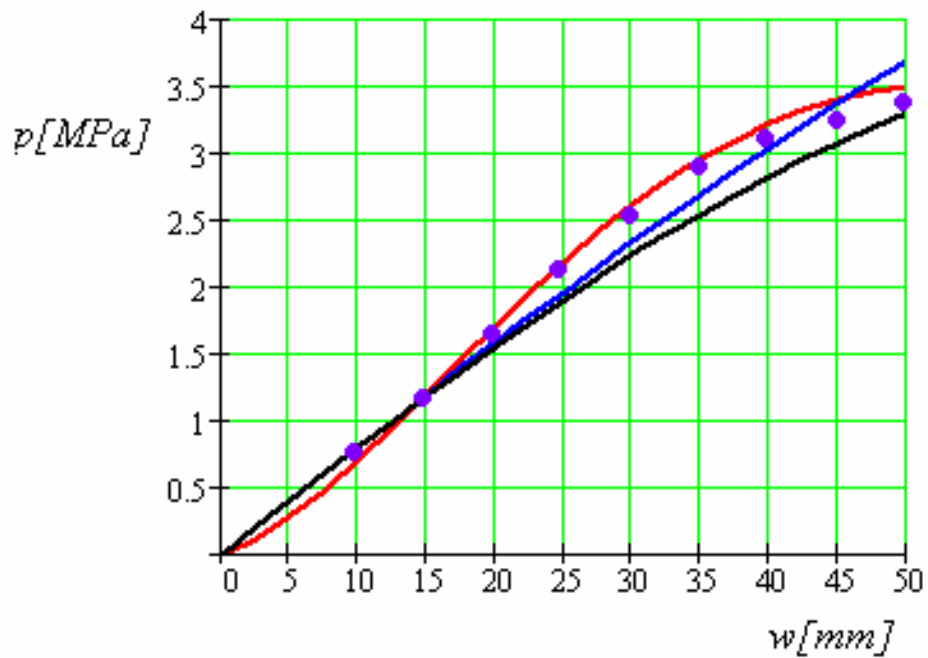
$w_{max}$ [mm]	p [MPa]			
	$h_0=2,0\text{mm}$	$h_0=1,3\text{mm}$	$h_0=0,8\text{mm}$	$h_0=0,5\text{mm}$
10	20	11	8	5
15	31	20	12	7
20	41	27	16	11
25	52	33	21	13
30	63	40	26	16
35	71	46	29	17
40	77	50	32	19
45	81	52	33	21
50	83	53	34	23

a)  $h_0=2$  mm

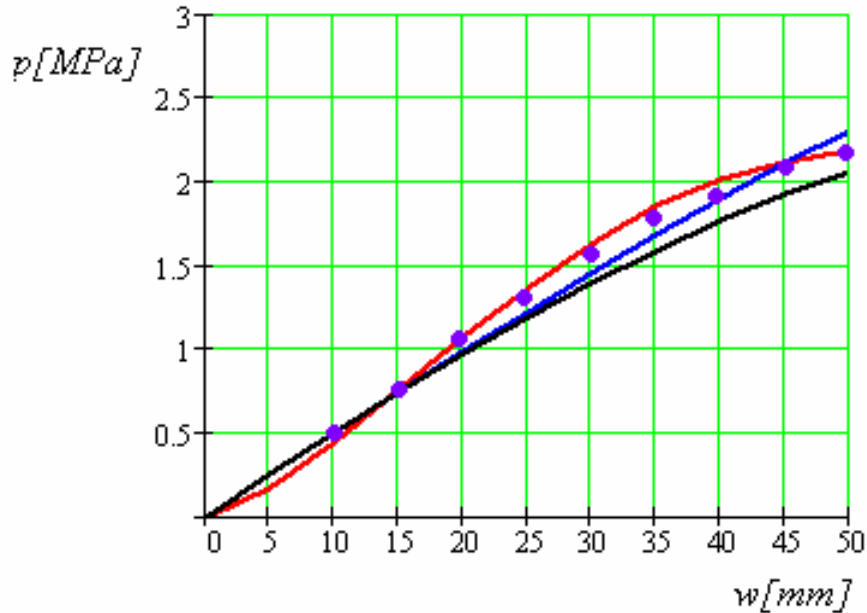




**b)**  $h_0 = 1,3$  mm



**c)**  $h_0 = 0,8$  mm



d)  $h_0=0,5$  mm

**Fig.4.18. Rezultate comparative între măsurătorile experimentale și curbele teoretice de variație a presiunii  $p$  în funcție de evoluția înălțimii polului calotei  $w$**

#### 4.2.6. Determinarea experimentală a grosimii curente $h$ a piesei deformate

Aceste determinări au fost efectuate cu scopul de a verifica ipoteza de calcul a grosimii piesei deformate formulată în Capitolul 3.

Determinarea grosimii curente a piesei deformate am efectuat-o folosind o metodă nedistructivă (fără a secționa piesa) prin reglarea comparatorului la poziția zero pentru o grosime zero a piesei și citirea indicațiilor comparatorului pentru mai multe poziții ale acestuia față de piesă.

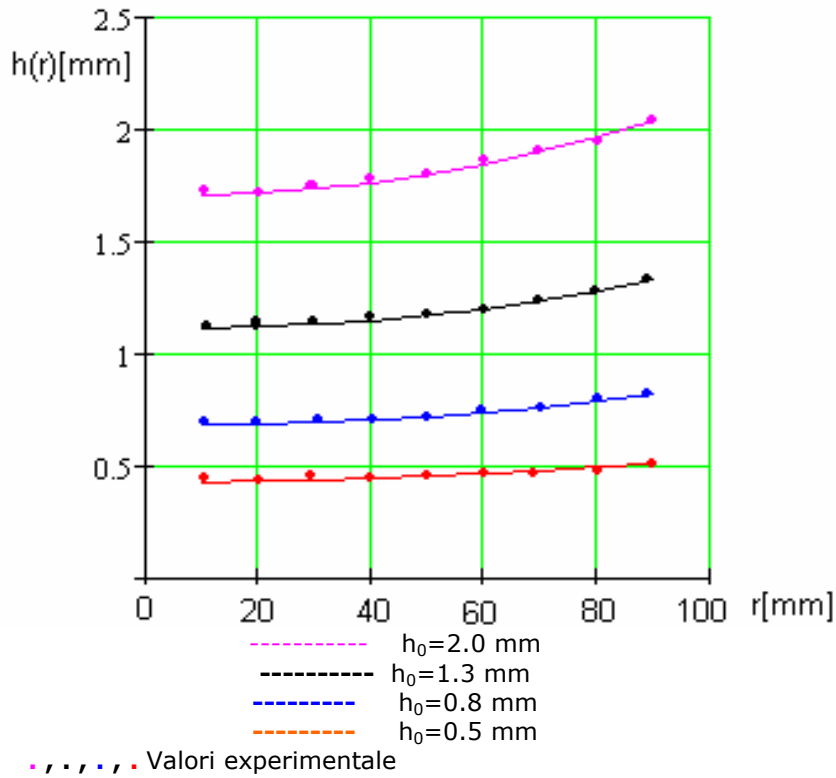
Valorile teoretice ale grosimilor precum și valorile experimentale obținute le-am centralizat în Tab. 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 și le-am sistematizat în funcție de înălțimea maximă a semifabricatului deformat, iar pentru fiecare înălțime maximă am determinat valorile grosimilor pentru fiecare din cele patru grosimi inițiale  $h_0=0.5, 0.8, 1.3$  și  $2$  mm pe baza relației (3.104).

Am făcut reprezentări grafice de variație a valorilor teoretice ale grosimii curente în funcție de rază în Fig.4.19, 4.20, 4.21, 4.22.

Aceste valori ale grosimilor le-am analizat și în comparație cu valoarea grosimii la pol calculate  $h$  conform relației 3.64 [36,40]. Aceste valori au aceeași semnificație cu valorile grosimilor corespunzătoare razelor de 10mm (în apropierea polului) obținute pe baza cercetărilor teoretice descrise în capitolul 3 și menționate în Tab. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8.

**Tab.4.3.** Valori teoretice și experimentale ale grosimii curente a piesei deformate pentru  $w_{max}=20mm$

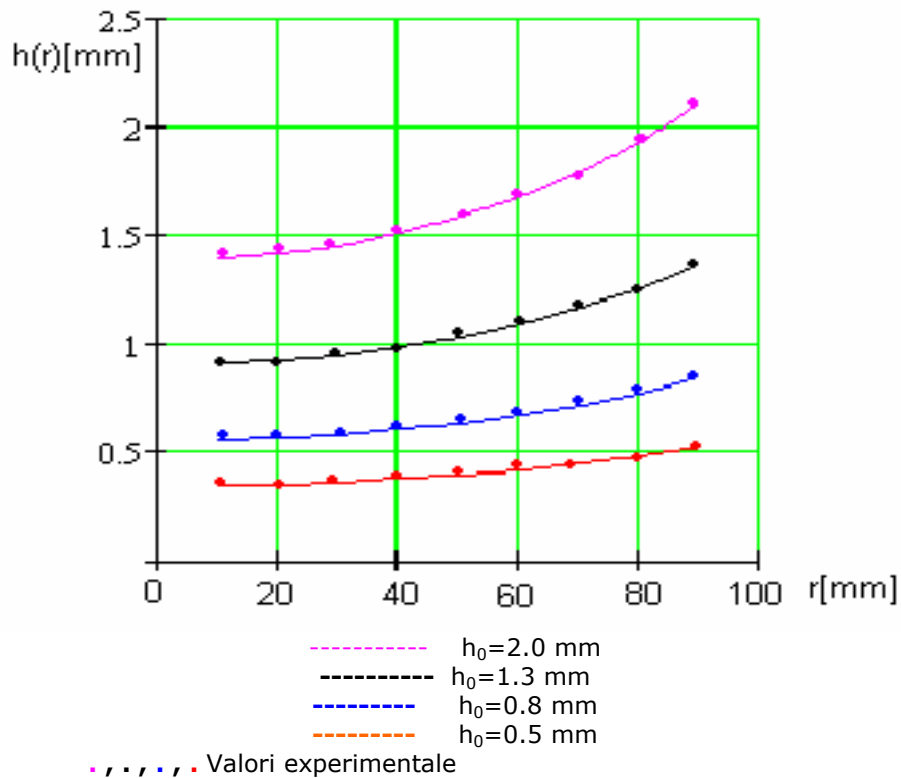
r [mm]	$h_{teor}(r)$				$h_{exp}(r)$			
	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]
10	0.427	0.683	1.109	1.706	0.44	0.70	1.12	1.72
20	0.429	0.686	1.115	1.715	0.44	0.70	1.12	1.72
30	0.433	0.693	1.126	1.733	0.45	0.71	1.13	1.74
40	0.440	0.704	1.144	1.760	0.45	0.71	1.16	1.77
50	0.449	0.718	1.167	1.796	0.46	0.72	1.17	1.80
60	0.460	0.736	1.197	1.841	0.47	0.74	1.19	1.85
70	0.474	0.758	1.232	1.896	0.48	0.76	1.24	1.90
80	0.490	0.784	1.274	1.961	0.49	0.79	1.28	1.95
90	0.509	0.814	1.323	2.036	0.51	0.82	1.33	2.10



**Fig.4.19.** Variația grosimii curente  $h(r)$  în funcție de rază pentru  $w_{max}=20mm$

**Tab.4.4.** Valori teoretice și experimentale ale grosimii curente a piesei deformate pentru  $w_{max}=30mm$

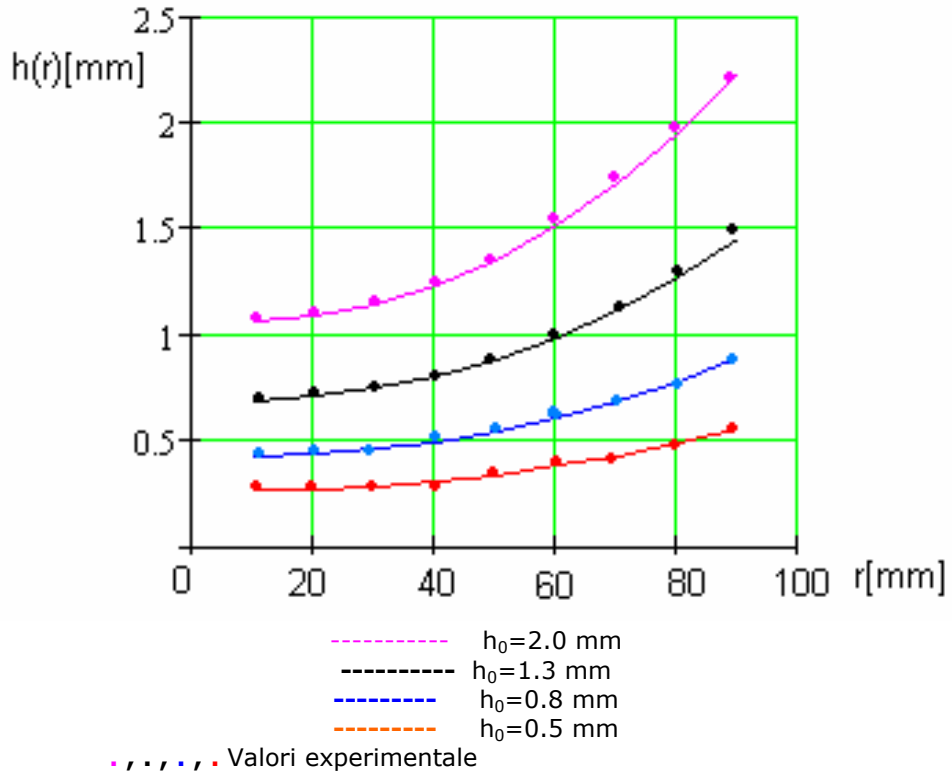
r [mm]	$h_{teor}(r)$				$h_{exp}(r)$			
	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]
10	0.350	0.559	0.909	1.398	0.36	0.57	0.92	1.41
20	0.354	0.567	0.921	1.417	0.36	0.57	0.92	1.43
30	0.363	0.581	0.945	1.453	0.37	0.60	0.96	1.47
40	0.377	0.604	0.981	1.509	0.38	0.62	0.99	1.52
50	0.396	0.634	1.030	1.584	0.41	0.65	1.07	1.61
60	0.420	0.672	1.092	1.680	0.43	0.69	1.16	1.69
70	0.449	0.719	1.168	1.797	0.43	0.74	1.20	1.79
80	0.484	0.775	1.259	1.937	0.45	0.79	1.26	1.94
90	0.525	0.841	1.366	2.102	0.53	0.85	1.37	2.2



**Fig.4.20.** Variația grosimii curente  $h(r)$  în funcție de rază pentru  $w_{max}=30mm$

**Tab.4.5.** Valori teoretice și experimentale ale grosimii curente a piesei deformate pentru  $w_{max}=40mm$

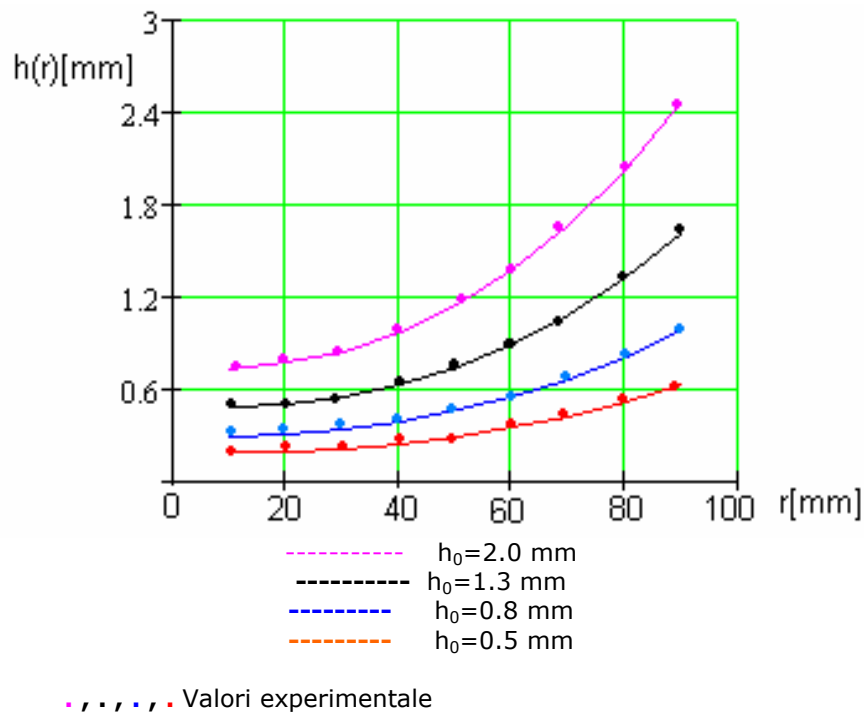
r [mm]	$h_{teor}(r)$				$h_{exp}(r)$			
	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]
10	0.264	0.422	0.686	1.056	0.28	0.44	0.7	1.08
20	0.271	0.434	0.705	1.084	0.28	0.45	0.72	1.11
30	0.286	0.457	0.743	1.143	0.31	0.47	0.75	1.19
40	0.308	0.493	0.800	1.231	0.31	0.52	0.81	1.25
50	0.338	0.541	0.880	1.353	0.35	0.57	0.90	1.37
60	0.378	0.605	0.982	1.511	0.39	0.63	1.00	1.53
70	0.427	0.683	1.11	1.709	0.43	0.70	1.12	1.73
80	0.487	0.779	1.266	1.948	0.50	0.78	1.28	2.00
90	0.559	0.894	1.453	2.235	0.56	0.90	1.5	2.25



**Fig.4.21.** Variația grosimii curente  $h(r)$  în funcție de rază pentru  $w_{max}=40mm$

**Tab.4.6.** Valori teoretice și experimentale ale grosimii curente a piesei deformate pentru  $w_{max}=50mm$ 

r [mm]	$h_{teor}(r)$				$h_{exp}(r)$			
	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]	$h_0=0.5$ [mm]	$h_0=0.8$ [mm]	$h_0=1.3$ [mm]	$h_0=2$ [mm]
10	0.182	0.292	0.474	0.730	0.19	0.31	0.50	0.74
20	0.192	0.307	0.499	0.768	0.21	0.33	0.50	0.78
30	0.212	0.339	0.551	0.847	0.23	0.36	0.55	0.86
40	0.243	0.389	0.631	0.971	0.27	0.40	0.65	1.00
50	0.286	0.458	0.744	1.145	0.30	0.47	0.75	1.19
60	0.344	0.550	0.894	1.375	0.36	0.56	0.90	1.39
70	0.418	0.668	1.086	1.670	0.43	0.68	1.10	1.75
80	0.509	0.815	1.324	2.038	0.52	0.82	1.35	2.05
90	0.622	0.995	1.616	2.486	0.63	1.00	1.65	2.50

**Fig.4.22.** Variația grosimii curente  $h(r)$  în funcție de rază pentru  $w_{max}=50mm$ 

### 4.3. Concluzii

Încercările experimentale au vizat validarea rezultatelor teoretice care descriu fenomenul deformării libere cu deformații mari a unor plăci circulare subțiri de grosimi diferite, încastrate pe contur, supuse unor presiuni hidraulice.

Din punct de vedere al modului de desfășurare a încercărilor acestea pot fi făcute astfel: urmărirea gradului de deformare în funcție de un șir de valori bine

definite de presiuni sau măsurarea presiunii necesare pentru realizarea unui șir de grade de deformare bine definite (metoda pas cu pas).

În urma încercărilor preliminare pe care le-am efectuat am ajuns la concluzia că prima metodă nu asigură o repetabilitate suficient de bună a rezultatelor încercărilor datorită imposibilității practice de a menține reglaje suficient de exacte ale supapelor de reglare a presiunii, ceea ce a dus la opțiunea utilizării celei de-a doua metode menționată anterior

În vederea efectuării încercărilor experimentale **am proiectat și executat în totalitate o instalație experimentală** pentru studiul deformării plastice hidraulice ale plăcilor subțiri încastrate pe contur. Am descris componența și funcționarea instalației cu care am efectuat încercările experimentale pentru deformarea plastică hidraulică a plăcilor și am prezentat problemele specifice instalației experimentale de care trebuie să se țină seama în vederea asigurării unei bune funcționări a acesteia

Instalația experimentală pentru studiul deformării plastice hidraulice a plăcilor subțiri încastrate pe contur (Fig.4.1) constă dintr-un dispozitiv cu ajutorul căruia se pot executa deformări hidraulice ale semifabricatelor de tip placă, dispozitiv care este prevăzut cu aparatura necesară urmării evoluției deformării semifabricatului în funcție de presiunea de lucru. Principalele părți componente ale instalației sunt: sursa de energie hidraulică; aparatura de măsurare a presiunii; dispozitivul de deformare hidraulică propriu-zis.

Pentru a se putea efectua în condiții optime încercările experimentale este necesar să fie îndeplinite două deziderate principale: asigurare etanșeității pentru a se evita pierderile de fluid de lucru și strângerea semifabricatului astfel încât să nu se producă nici pierderea etanșeității și nici alunecarea (retragerea) semifabricatului între elementele dispozitivului de deformare.

Pentru optimizarea etanșării **am efectuat un set de încercări preliminare prin verificarea următoarelor soluții constructive posibile de etanșare**: interpunerea unui element de etanșare nemetalic între semifabricat și dispozitiv (Fig.4.4), profilarea conjugată a elementelor de semifabricatului astfel încât acesta să fie deformat în zona de strângere (Fig.4.6), etanșare metal pe metal cu prelucrarea suprafeței de contact dintre dispozitiv și semifabricat precum și a elementului de strângere în condiții de rugozitate și abateri de formă foarte mici (Fig.4.7). În urma acestor încercări **am ajuns la concluzia că varianta etanșare metal pe metal asigură o etanșare suficient de bună a semifabricatului și, printr-o strângere corespunzătoare nu se produce alunecarea semifabricatului**. Pierderile de lichid de lucru prin neetanșeități există, dar ele sunt foarte mici astfel încât să poată asigura presiunea de lucru necesară deformării.

**Am efectuat un calcul teoretic hidrodinamic al pierderilor de lichid printr-o modelare similar cu geometria dispozitivului de deformare, calcul care de asemenea a dus la concluzia că pierderile de lichid prin neetanșeități sunt ne semnificative.**

Menținerea etanșeității este condiționată și de strângerea pachetului de piese dispozitiv - semifabricat - inel de strângere motiv pentru care, în continuare, am făcut un calcul teoretic al șuruburilor de strângere.

În continuare am descris etapele parcurse în cadrul încercărilor precum și metodologia de încercare.

Pentru a putea efectua măsurători legate de evoluția formei semifabricatului în timpul deformării și compararea acesteia cu forma inițială plană, în primă etapă am făcut pregătirea semifabricatului prin realizarea unui trasaj pe suprafața probei care să fie cât mai precis și cât mai vizibil. În vederea trasării probei, am supus

semifabricatul unei acoperiri galvanice foarte fine de cupru prin imersare, după o degresare prealabilă, într-o soluție de  $\text{CuSO}_4$ . Această acoperire dă culoarea roșiatică a probelor în fotografiile din lucrare. După această operație am realizat un caroiaj în coordonate polare format din cercuri concentrice de raze de 10,20....100 mm și un număr de 4 raze decalate cu  $90^\circ$  una față de cealaltă. Prin urmărirea deplasării nodurilor acestui caroiaj am urmărit geometria deformării. Semifabricatele supuse încercărilor au fost table subțiri din oțel laminate la rece STAS 9684-89 de grosimi de 0,5mm, 0,8mm, 1,3mm și 2mm.

În prima fază a încercărilor propriu-zise **am verificat ipoteza formei de calotă sferică a semifabricatului** în timpul deformării **elaborând o metodologie originală**. Această încercare am efectuat-o pe probe de forma din Fig.4.11 supuse unor succesiuni de grade de deformare diferite. Pieselor obținute în acest mod le-am determinat experimental profilele secțiunilor axiale, profile care au fost comparate cu profilele teoretice ale calotelor sferice care au diametrul bazei și înălțimea la polul calotei identice cu cele ale probei. Măsurătorile le-am efectuat pentru 4 înălțimi la pol ale calotei. Valorile calculate pentru un profil de calotă sferică sunt suficient de apropiate de cele măsurate pe piesele deformate astfel încât ipoteza privind forma de calotă sferică a piesei deformate poate fi acceptată.

În continuare **am efectuat determinarea experimentală a presiunii necesare deformării libere a semifabricatului**. Încercările experimentale le-am efectuat pe semifabricate de forma din Fig.3.11 cu diferite grosimi. Metodologia de efectuare a încercărilor a fost următoarea: am urmărit valoarea presiunii necesare deformării pentru un șir de valori ale înălțimii maxime ale polului calotei, rezultatele obținute fiind suprapuse peste graficele teoretice de dependență între aceiași parametri, trasate în conformitate cu relațiile 3.66, 3.79 și 3.90.

Ultimul set de încercări a fost acelea de **determinare experimentală a grosimii curente  $h$**  a semifabricatului deformat și compararea acestora cu valorile calculate teoretic în Capitolul 3.

Din datele experimentale obținute se pot trage următoarele **concluzii generale**: determinările experimentale nu se suprapun în totalitate cu rezultatele teoretice dar diferențele nu sunt semnificative din punct de vedere practic. Neconcordanțele apărute între aceste variante se explică astfel: curbele determinate teoretic nu pot descrie în totalitate fenomenul intrinsec al deformării deoarece sunt influențate de unele ipoteze simplificatoare necesare posibilității efectuării calculului iar rezultatele experimentale pot fi afectate de unele erori de măsurare.



## **CAPITOLUL 5 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE**

### **5.1. Concluzii**

În cadrul acestui capitol am făcut o scurtă sinteză a problemelor tratate în prezenta teză și am menționat care sunt principalele obiective care au fost urmărite.

#### **5.1.1. Concluzii cu privire la definirea și clasificarea procedeelor de deformare plastică hidraulică (DPH) a pieselor cu pereți subțiri**

În această parte a tezei mi-am propus să realizez o definiție și clasificare unitară a procedeelor de deformare plastică hidraulică (DPH) a pieselor cu pereți subțiri cu menționarea particularităților specifice fiecăruia dintre ele. Am prezentat perspectivele de dezvoltare a tehnologiilor de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri.

Din prezentarea și analiza procedeelor de DPH a pieselor cu pereți subțiri se pot evidenția următoarele aspecte principale:

##### a) referitoare la tuburi:

- deformarea se poate efectua prin supunerea tubului la presiune interioară sau la presiune exterioară

- deformarea se poate efectua cu aport suplimentar de material în zona de deformare sau fără aport suplimentar de material în zona de deformare, prima variantă permițând creșteri mai mari ale diametrului piesei deformate față de diametrul inițial al semifabricatului;

- procesul de deformare plastică hidraulică a tuburilor este influențat în principal de următorii factori: parametri tubului semifabricat (lungime, diametru, grosimea peretelui, caracteristicile mecanice și tehnologice ale materialului, parametri procesului (forța și viteza de avans a apăsării axiale, presiunea internă) limitele tehnologice ale procesului (flambajul semifabricatului, fisurarea-spargerea, încrețirea), influența sculei (forma, rugozitatea suprafeței, duritatea suprafeței, caracteristicile frecării între sculă și semifabricat). Acești parametri trebuie considerați ca un tot unitar în obținerea unei calități corespunzătoare a piesei;

- avantajul esențial al tehnologiei de DPH a tuburilor comparativ cu alte tehnologii de deformare plastică la rece a acestora constă în faptul că, datorită lipsei uneia dintre componentele ansamblului de deformare ca piesă rigidă și înlocuirea ei cu un fluid sub presiune se pot realiza configurații complexe de tuburi date de forma cavității matriței.

##### b) referitoare la plăci:

- deformarea se poate efectua prin supunerea unei singure plăci la o presiune hidraulică pe o parte a ei sau a unei perechi de plăci prin presurizarea spațiului dintre ele;

- deformarea se poate efectua cu aport suplimentar de material în zona de deformare sau fără aport suplimentar de material în zona de deformare, prima variantă permițând grade de deformare mai mari;

- procesul de deformare plastică hidraulică a plăcilor este influențat în principal de următorii factori: parametri semifabricatului (geometria suprafeței, grosimea peretelui, caracteristicile mecanice și tehnologice ale materialului, parametri procesului (viteza de deformare, presiunea internă), limitele tehnologice ale procesului (fisurarea-spargerea, încrețirea), influența sculei (forma, rugozitatea suprafeței, duritatea suprafeței, caracteristicile frecării între sculă și semifabricat). Acești parametri trebuie considerați ca un tot unitar în obținerea unei calități corespunzătoare a piesei;

- avantajul esențial al tehnologiei de DPH a plăcilor comparativ cu alte tehnologii de deformare plastică la rece a acestora constă în faptul că, datorită lipsei uneia dintre componentele ansamblului de deformare ca piesă rigidă și înlocuirea ei cu un fluid sub presiune se pot realiza configurații complexe de plăci date de forma cavității matriței.

În ceea ce privește dezvoltarea în perspectivă a tehnologiilor de deformare plastică hidraulică a tuburilor și plăcilor aceasta se referă la: îmbunătățirea produselor și tehnologiilor existente; dezvoltarea și adaptarea de noi procedee de DPH a tuburilor și plăcilor. Aceste obiective se realizează prin:

- evaluarea caracteristicilor materialelor atât la temperatura mediului ambiant cât și la temperaturi ridicate;
- evaluarea calității lubrifianților precum și obținerea unor aditivi cât mai eficienți pentru îmbunătățirea calității lubrifierii;
- dezvoltarea unor metode eficiente pentru modelarea prin simulare a proceselor de DPH;
- dezvoltarea unor metode cât mai eficiente pentru proiectarea formei pieselor care pot fi realizate prin DPH.

### **5.1.2. Concluzii cu privire la unele aspecte teoretice generale referitoare la fenomenele care apar în timpul procedeele de deformare plastică a metalelor**

În acest capitol am prezentat principalele noțiuni care stau la baza studiului teoretic al fenomenelor care se produc în materiale la deformarea plastică a acestora, astfel:

- am prezentat starea generală de eforturi unitare și deformații din materialele supuse prelucrărilor prin deformare plastică ;
- am prezentat legile de bază ale deformării plastice;
- am prezentat criteriile de plasticitate pentru diferite materiale punându-se în evidență comportamentul izotrop sau anizotrop al acestora.

Noțiunile teoretice prezentate în cadrul acestui au un caracter general, aplicarea lor făcându-se în conformitate cu situația concretă a unui anumit tip de deformare.

### **5.1.3. Concluzii referitoare la cercetările teoretice efectuate pentru descrierea fenomenului de deformare plastică cu deformații mari a unei membrane (plăci subțiri) sub acțiunea presiunii hidraulice**

Obiectivul principal urmărit în cadrul acestui capitol a fost caracterizarea din punct de vedere teoretic a fenomenului de DPH a plăcilor circulare subțiri încastrate pe contur supuse unei presiuni hidraulice atât din punct de vedere al geometriei piesei deformate cât și al relației dintre presiune și gradul de deformare.

În prima parte am prezentat elemente comparative referitoare la ambutisarea clasică și deformarea plastică hidraulică a plăcilor cu pereți subțiri din care se pot desprinde următoarele concluzii:

1. În cazul ambutisării clasice cu poanson rigid deformările sunt dependente de forma poansonului, de frecările dintre poanson și semifabricat, de modul de fixare al semifabricatului, astfel încât ele sunt foarte diferite.

2. În cazul în care semifabricatul plan încastrat, semiîncastrat sau rezemat pe contur este supus unei presiuni hidraulice, tensiunile care apar în material sunt crescătoare dinspre periferie spre centrul semifabricatului sub formă de placă circulară subțire, astfel încât în zona dinspre periferia piesei există solicitări preponderent elastice iar în zona centrală solicitările sunt preponderent plastice, între ele existând o zonă de tranziție. Această observație stă la baza faptului că subțirile semifabricatului se produc preponderent în zona centrală a acestuia.

3. Dacă aceeași placă circulară subțire încastrată pe contur este supusă unei presiuni hidraulice suficient de mari încât în placă să apară tensiuni care depășesc limita de elasticitate și limita de curgere placa va suporta deformații plastice foarte mari. În urma acestor deformații, datorită distribuției tensiunilor produse în placă apare o variație pronunțată a grosimii plăcii care poate fi estimată dificil din punct de vedere teoretic. După depășirea acestei limite relația dintre presiunea aplicată asupra plăcii și deformația acesteia devine aleatoare.

În continuare, am făcut o descriere a stării de tensiune și deformare, în primă fază în ipoteza cazului general al teoriei deformațiilor plastice mari pentru plăci circulare subțiri încastrate pe contur [36].

4. Această ipoteză de calcul rezolvă problema tensiunilor și deformațiilor plastice într-o manieră satisfăcătoare și prezintă distribuția deformațiilor precum și raportul tensiunilor principale în timpul solicitării plăcii, putând fi aplicată la estimarea presiunii necesare realizării unor deformații mari ale plăcii circulare încastrate pe contur supuse acțiunii unei presiuni hidraulice.

5. Metoda oferă posibilitatea de a estima condițiile tehnologice pentru realizarea prin deformare plastică hidraulică a unor table de diverse dimensiuni dar este foarte laborioasă și dificil de aplicat.

Datorită acestui fapt, s-a emis ipoteza formei de calotă sferică a plăcii deformate [15], ipoteză care permite un calcul mai puțin laborios al parametrilor de deformare (grad de deformare, înălțimea calotei, grosimea curentă a plăcii deformate, presiunea necesară de deformare) calcul care este suficient de exact.

6. Pe baza ipotezei amintite anterior am dedus o relație de calcul a presiunii necesare de deformare (3.66). Luând în considerare același grad de deformare am determinat alte două relații de calcul a presiunii pe baza energiei de deformare (3.79, 3.90), relații care sunt mai puțin laborioase decât alte relații cunoscute în literatura de specialitate [40].

7. Prin compararea rezultatelor obținute conform relațiilor (3.66, 3.79, 3.90) am pus în vedere faptul că diferențele dintre aceste relații nu sunt semnificative.

#### **5.1.4. Concluzii cu privire la cercetările experimentale privind deformarea plastică hidraulică a plăcilor**

1. Am descris componenta și funcționarea instalației experimentale (proiectată și realizată în totalitate de mine) cu care am efectuat încercările experimentale pentru deformarea plastică hidraulică a plăcilor din cadrul prezentei teze.

2. Pentru buna funcționare a instalației este necesar să se asigure o bună etanșare și o strângere corespunzătoare a semifabricatului. În acest scop am efectuat un set de încercări preliminare prin verificarea unor soluții constructive posibile de etanșare

3. Încercările efectuate au vizat: validarea ipotezei de calotă sferică a piesei deformată, stabilirea unei relații experimentale între presiune și înălțimea la vârf a calotei pentru diferite grosimi inițiale ale semifabricatului și determinarea experimentală a grosimii piesei deformată

4. Din datele experimentale obținute se pot trage următoarele concluzii: determinările experimentale nu se suprapun în totalitate cu rezultatele teoretice dar diferențele nu sunt semnificative din punct de vedere practic. Neconcordanțele apărute între aceste variante se explică astfel: curbele determinate teoretic nu pot descrie în totalitate fenomenul intrinsec al deformării deoarece sunt influențate de unele ipoteze simplificatoare necesare posibilității efectuării calculelor iar rezultatele experimentale pot fi afectate de unele erori de măsurare.

## **5.2. Contribuții personale**

Datorită faptului că tehnologia de deformare plastică hidraulică a pieselor cu pereți subțiri este o tehnologie relativ nouă, referirile legate de această tehnologie în literatura de specialitate sunt destul de puține, relativ dispersate și în general nu sunt făcute publice de către marile companii care dezvoltă cercetări în acest domeniu. Situația prezentată mai sus justifică, chiar și impune, abordarea unor cercetări legate de deformarea plastică la rece sub acțiunea unei presiuni hidraulice a semifabricatelor cu pereți subțiri. Pe baza studierii unui volum mare de lucrări publicate în acest domeniu am realizat o analiză unitară a procedeelelor de DPH.

**1. Am prezentat o clasificare extinsă a procedeelelor de DPH a pieselor cu pereți subțiri precum și o descriere unitară a acestora.**

**2. Am prezentat o clasificare și o descriere detaliată a procedeelelor de DPH a tuburilor** cu precizarea unor probleme specifice acestora.

**3. Pentru o mai bună înțelegere a tehnologiei de DPH a tuburilor am prezentat și realizat o schemă constructivă de concepție proprie a unui utilaj cu ajutorul căruia se pot realiza piese în formă de „T”.**

**4. Am prezentat o clasificare extinsă și o descriere a procedeelelor de DPH a tablelor.** Am specificat unele dintre domeniile prioritare de aplicabilitate a tehnologiei de DPH a tablelor cu prezentarea unor exemple concrete (Fig.1.22).

**5. În spiritul tendinței de dezvoltare a unor noi tehnologii de DPH a tablelor am prezentat unele procedee speciale de DPH** precum: DPH cu presiune înaltă la cald și ambutisarea adâncă hidromecanică la cald a tablelor.

**6. Am făcut o caracterizare sub aspect teoretic a fenomenului de DPH a plăcilor circulare subțiri încastrate pe contur supuse unei presiuni hidraulice** atât din punct de vedere al geometriei piesei deformată cât și al relației dintre presiune și gradul de deformare

**7. Pe baza analizei relațiilor de calcul a unor parametri ai deformării plastice hidraulice cu deformații mari, deformații care ajung și chiar depășesc zona de ecruisare a materialului, am determinat analitic o expresie originală care descrie dependența dintre presiune, grosimea semifabricatului și înălțimea la polul calotei pentru un material caracterizat prin constanta  $K$  și coeficientul de anizotropie mediu  $\nu$  (relația 3.66). Această expresie, prin valoarea calculată a presiunii care poate fi considerată o măsură a stării de solicitare a materialului, pune în evidență zonele de tranziție dintre**

**deformările elastice spre cele plastice fără ecrusare respectiv trecerea spre deformările plastice în care apare fenomenul de ecrusare a materialului.**

**8. Pe baza utilizării relațiilor de calcul a energiei necesare deformării am dedus două relații de calcul originale a presiunii necesare deformării (relațiile 3.79 și 3.90), relații care, în afara dimensiunilor geometrice ale piesei de dinainte și după deformare, definesc presiunea doar în funcție de limita de curgere a materialelor. Acestea le-am dedus în două ipoteze de modificare a mărimii suprafeței inițiale a semifabricatului:**

- **modificarea suprafeței unui disc circular de diametru cunoscut într-o calotă sferică de același diametru la baza calotei și înălțime cunoscută**
- **transformarea unei plăci pătrate de suprafață echivalentă cu suprafața discului într-o altă placă pătrată de suprafață egală cu suprafața plăcii deformate sub formă de calotă sferică**

**9. Am efectuat un studiu comparativ al rezultatelor obținute conform relațiilor 3.66, 3.79 și 3.90, reprezentate în Fig. 3.15 și am pus în evidență faptul că diferențele dintre aceste variante de calcul nu sunt mari.**

**Propunerea privind optimizarea calculului presiunii necesare deformării se dovedește a fi validă întrucât s-au obținut două relații de calcul 3.79 și 3.90 mai puțin laborioase decât alte relații cunoscute în literatura de specialitate, rezultatele obținute având diferențe acceptabile din punct de vedere practic.**

**10. Pentru o mai bună înțelegere a modificării formei și dimensiunilor pieselor din tablă subțire prelucrate prin deformare plastică hidrolică am definit un nou parametru al deformării numit grad de deformare  $\Psi$  a suprafeței semifabricatului (relația 3.73).**

**11. Având în vedere faptul că subțierile cele mai pronunțate ale piesei deformate se manifestă în centrul (la polul) acesteia am realizat o metodologie de calcul originală a grosimii curente a piesei deformate, pe baza variației mărimii suprafețelor omoloage ale piesei nedeformate respectiv deformate în timpul procesului de deformare (3.104).**

**12. Am realizat în totalitate proiectarea și execuția instalației experimentale de studiu a deformării plastice hidraulice a tablelor.**

**13. Pe baza unor studii de optimizare a etanșării pe care le-am efectuat am găsit soluția optimă de etanșare a dispozitivului**

**14. Am elaborat o tehnologie originală de efectuare a încercărilor de deformare plastică hidrolică a plăcilor cu pereți subțiri.**

**15. Am efectuat un calcul hidrodinamic riguros al pierderilor de fluid de lucru în procesul de deformare a tablei.**

**16. Am elaborat o metodologie originală de verificare a ipotezei formei de calotă sferică a semifabricatului în timpul deformării**

## **ANEXA 1**

**Secvențe de program Mathcad de calcul a presiunii în  
funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite  
grosimi ale semifabricatului în ipoteza ecruisării  
materialului semifabricatului**

**h0=0.5mm**

h0:=0.5

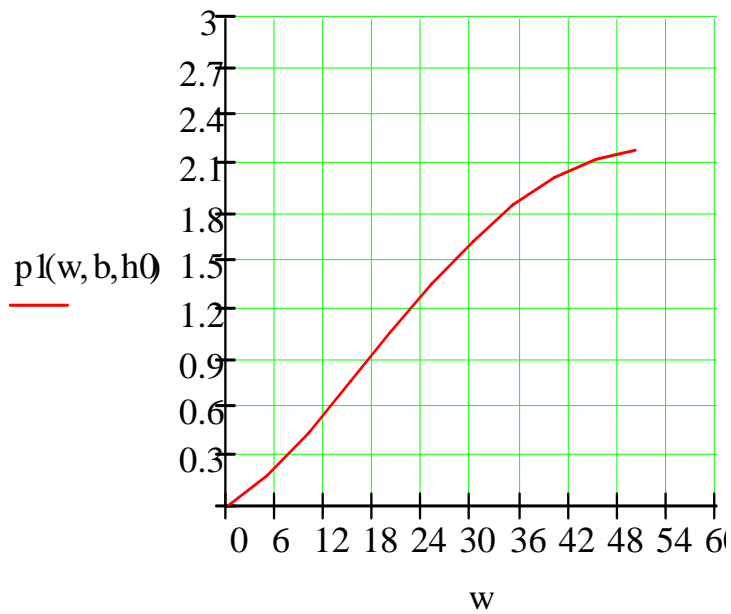
b:=100

w:=0,5..50

$$p_l(w,b,h_0) := 4 \cdot 500 \cdot h_0 \cdot w \cdot \frac{\left( 2 \cdot \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right) \right)^{0.2}}{\left( b^2 + w^2 \right) \cdot e^{2 \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right)}}$$

p<sub>l</sub>(w,b,h<sub>0</sub>) =

0
0.172
0.443
0.753
1.069
1.367
1.63
1.846
2.01
2.12
2.179



**h0=0.8mm**

h0:=0.8      w:=0,5..50  
 b:=100

$$p1(w,b,h0) := 4 \cdot 500 \cdot h0 \cdot w \cdot \frac{\left(2 \cdot \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)\right)^{0.2}}{\left(b^2 + w^2\right) \cdot e^{2 \cdot \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}}$$

p1(w,b,h0) =

0
0.275
0.709
1.205
1.71
2.187
2.608
2.954
3.216
3.392
3.486

p1(w,b,h0)





**h0=1.3mm**

h0:= 1.3

w := 0,5..50

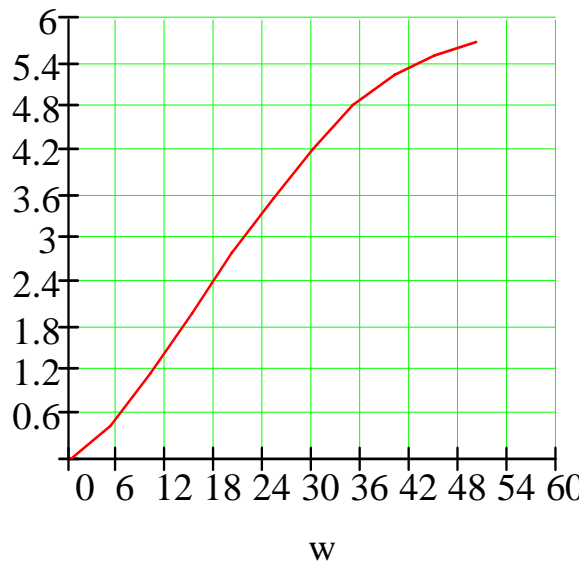
b := 100

$$p1(w,b,h0) := 4 \cdot 500 \cdot h0 \cdot w \cdot \frac{\left(2 \cdot \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)\right)^{0.2}}{\left(b^2 + w^2\right) \cdot e^{2 \cdot \ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}}$$

p1(w,b,h0) =

0
0.447
1.153
1.958
2.779
3.554
4.237
4.8
5.226
5.512
5.664

p1(w,b,h0)



**h0=2mm**

$$h0 := 2$$

$$w := 0,5..50$$

$$b := 100$$

$$p1(w, b, h0) := 4 \cdot 500 \cdot h0 \cdot w \cdot \frac{\left( 2 \cdot \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right) \right)^{0.2}}{\left( b^2 + w^2 \right) \cdot e^{2 \ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right)}}$$

p1(w, b, h0) =

0
0.688
1.774
3.012
4.275
5.467
6.519
7.385
8.04
8.48
8.714

p1(w, b, h0)



## **ANEXA 2**

**Secvențe de program Mathcad de calcul a presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza deformării unui disc**

---

**h0=0,5mm**

$$w := 0,5..50$$

$$b := 100$$

$$h0 := 0.5$$

$$p3(w, b, h0) := 6 \cdot h0 \cdot 500 \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}{w \cdot \left(3 + \frac{w^2}{b^2}\right)}$$

$$p3(w, b, h0) =$$

■

 $p3(w, b, h0)$ 

w

**$h_0 = 0,8\text{mm}$**

$h_0 := 0.8$

$w := 0,5..50$

$$p_3(w, b, h_0) := 6 \cdot h_0 \cdot 500 \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}{w \cdot \left(3 + \frac{w^2}{b^2}\right)}$$

$p_3(w, b, h_0) =$

■

$p_3(w, b, h_0)$



w

$$h_0 = 1,3 \text{ mm}$$

$$w := 0,5..50$$

$$b := 100$$

$$h_0 := 1,3$$

$$p_3(w, b, h_0) =$$

■

$$p_3(w, b, h_0) := 6 \cdot h_0 \cdot 500 \frac{\ln \left( 1 + \frac{w^2}{b^2} \right)}{w \cdot \left( 3 + \frac{w^2}{b^2} \right)}$$

$$p_3(w, b, h_0)$$



w

---

**h0=2 mm**

$$w := 0,5..50$$

$$b := 100$$

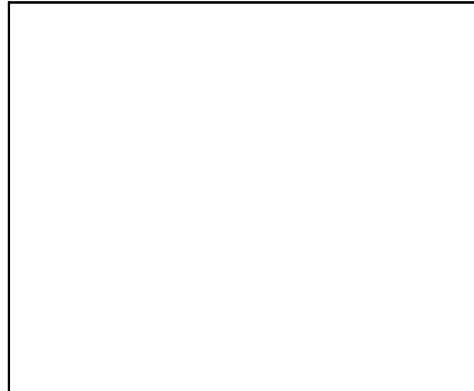
$$h0 := 2$$

$$p3(w, b, h0) := 6 \cdot h0 \cdot 500 \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{w^2}{b^2}\right)}{w \cdot \left(3 + \frac{w^2}{b^2}\right)}$$

$$p3(w, b, h0) =$$

■

p3(w, b, h0)



w

### **ANEXA 3**

**Secvențe de program Mathcad de calcul a presiunii în funcție de înălțimea calotei deformate pentru diferite grosimi ale semifabricatului în ipoteza asimilării discului semifabricat cu o suprafață pătrată echivalentă**



**h0=0.5mm**

w:=0,5..50

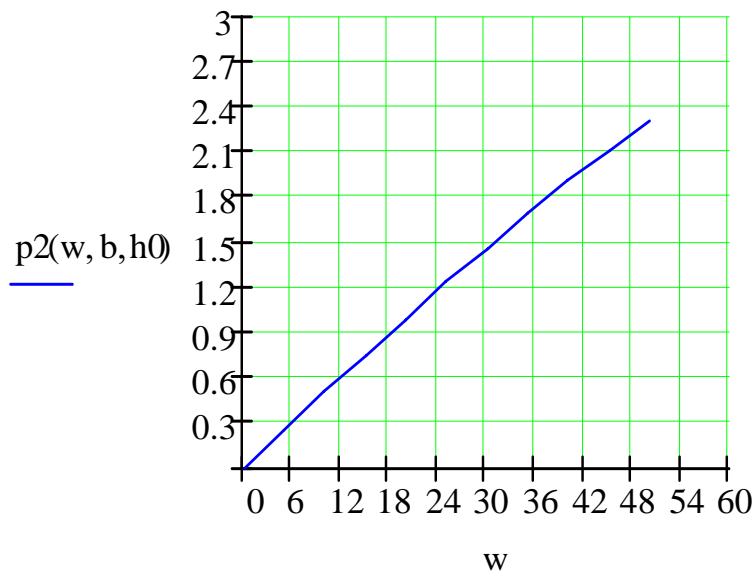
b:=100

h0:=0.5

$$p2(w, b, h0) := 6 \cdot 500 \cdot h0 \cdot \frac{w}{(3 \cdot b^2 + w^2)}$$

p2(w, b, h0) =

0
0.25
0.498
0.744
0.987
1.224
1.456
1.681
1.899
2.108
2.308



**h0=0.8mm**

b:=100

h0:=0.8

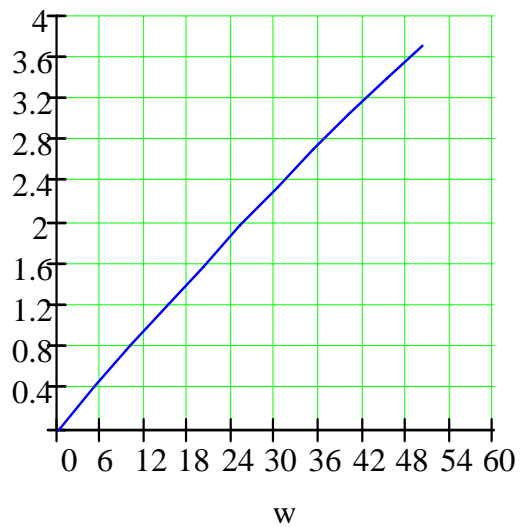
w:=0,5..50

$$p2(w,b,h0) := 6 \cdot 500 \cdot h0 \cdot \frac{w}{(3 \cdot b^2 + w^2)}$$

p2(w,b,h0) =

0
0.4
0.797
1.191
1.579
1.959
2.33
2.69
3.038
3.372
3.692

p2(w, b, h0)



**h0=1.3mm**

w:=0,5..50

b:=100


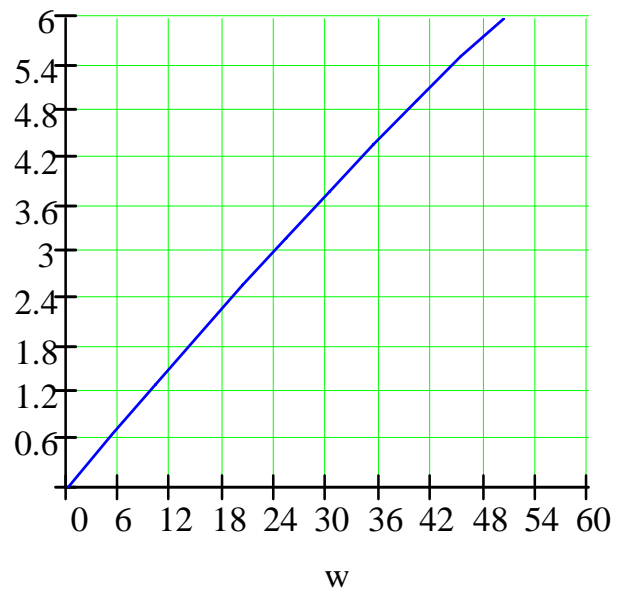
h0:=1.3

$$p2(w, b, h0) := 6 \cdot 500 \cdot h0 \cdot \frac{w}{(3 \cdot b^2 + w^2)}$$

p2(w, b, h0) =

0
0.649
1.296
1.935
2.566
3.184
3.786
4.371
4.937
5.48
6

p2(w, b, h0)

**h0=2mm**

w:=0,5..50

b:=100

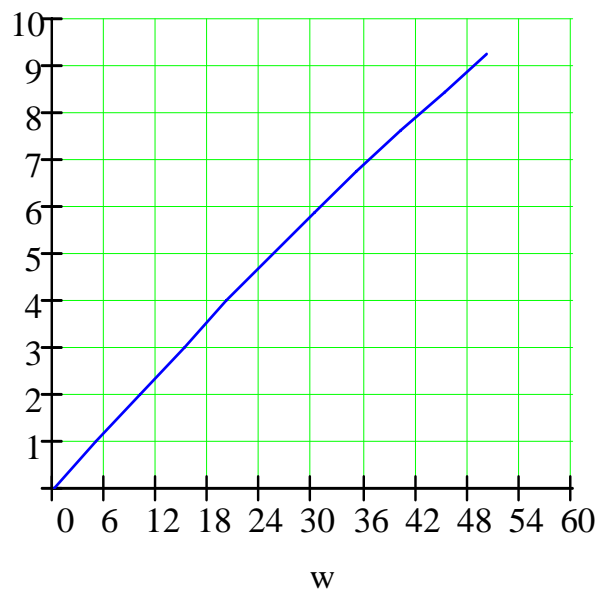
h0:=2

$$p2(w,b,h0) := 6 \cdot 500 \cdot h0 \cdot \frac{w}{(3 \cdot b^2 + w^2)}$$

p2(w,b,h0) =

0
0.999
1.993
2.978
3.947
4.898
5.825
6.725
7.595
8.431
9.231

p2(w, b, h0)



## **ANEXA 4**

**Secvențe de program Mathcad de calcul a variației  
grosimii relative și a grosimii curente a piesei deformată  
în funcție de rază**

**w=20mm**

w := 20                      a := 1                      j := 1                      b := 9                      i := a, a + j.. b

$$ro := \frac{(100^2 + w^2)}{2 \cdot w}$$

ro = 260

i =

1
2
3
4
5
6
7
8
9

r<sub>i</sub> :=

0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

$$S0_i := \pi \cdot (r_i)^2$$

$$S0_{i+j} := \pi \cdot (r_{i+j})^2$$

S0<sub>i+j</sub> =

314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>
2.545·10 <sup>4</sup>

i + j =

2
3
4
5
6
7
8
9
10

r<sub>i+j</sub> := r<sub>i</sub> + 10

r<sub>i+j</sub> =

10
20
30
40
50
60
70
80
90

$$S0(i) := S0_{i+j} - S0_i$$

$$alfa_{i+j} := \text{atan}\left(\frac{r_{i+j}}{ro - w}\right)$$

$$c_{i+j} := 2 \cdot ro \cdot \sin\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right)$$

$$w_{i+j} := c_{i+j} \cdot \sin\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right)$$

$$b_{i+j} := c_{i+j} \cdot \cos\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right)$$

$$S1_{i, i+j} := \pi \cdot [(b_{i+j})^2 + (w_{i+j})^2]$$

$$Sc(i, j) := S1_{i, i+j} - S1_{i-j, i}$$

$$R(i, j) := \frac{S0(i)}{Sc(i, j)}$$

S0<sub>i</sub> =

0
314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>

$b_{i+j} =$

10.824
21.592
32.249
42.744
53.028
63.059
72.8
82.219
91.292

$c_{i+j} =$

10.826
21.61
32.311
42.89
53.309
63.535
73.539
83.295
92.781

$S0(i) =$

314.159
942.478
$1.571 \cdot 10^3$
$2.199 \cdot 10^3$
$2.827 \cdot 10^3$
$3.456 \cdot 10^3$
$4.084 \cdot 10^3$
$4.712 \cdot 10^3$
$5.341 \cdot 10^3$

$w_{i+j} =$

0.225
0.898
2.008
3.538
5.465
7.763
10.4
13.342
16.554

$\alpha_{i+j} =$

0.042
0.083
0.124
0.165
0.205
0.245
0.284
0.322
0.359

$S1_{i,i+j} =$

368.221
$1.467 \cdot 10^3$
$3.28 \cdot 10^3$
$5.779 \cdot 10^3$
$8.928 \cdot 10^3$
$1.268 \cdot 10^4$
$1.699 \cdot 10^4$
$2.18 \cdot 10^4$
$2.704 \cdot 10^4$

$S1_{i-j,i} =$

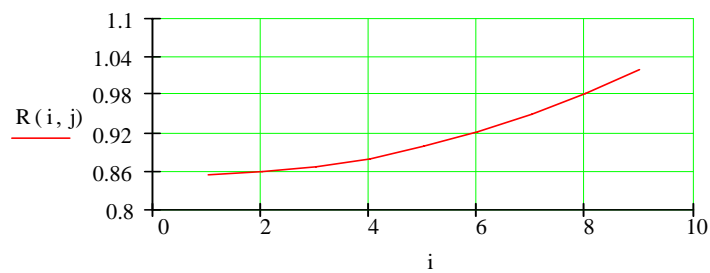
0
368.221
$1.467 \cdot 10^3$
$3.28 \cdot 10^3$
$5.779 \cdot 10^3$
$8.928 \cdot 10^3$
$1.268 \cdot 10^4$
$1.699 \cdot 10^4$
$2.18 \cdot 10^4$

$Sc(i, j) =$

368.221
$1.099 \cdot 10^3$
$1.813 \cdot 10^3$
$2.499 \cdot 10^3$
$3.149 \cdot 10^3$
$3.754 \cdot 10^3$
$4.308 \cdot 10^3$
$4.807 \cdot 10^3$
$5.247 \cdot 10^3$

$R(i, j) =$

0.853
0.858
0.867
0.88
0.898
0.921
0.948
0.98
1.018



$$h1(i,j) := R(i,j) \cdot 0.5$$

$$h2(i,j) := R(i,j) \cdot 0.8$$

$$h3(i,j) := R(i,j) \cdot 1.3$$

$$h4(i,j) := R(i,j) \cdot 2$$

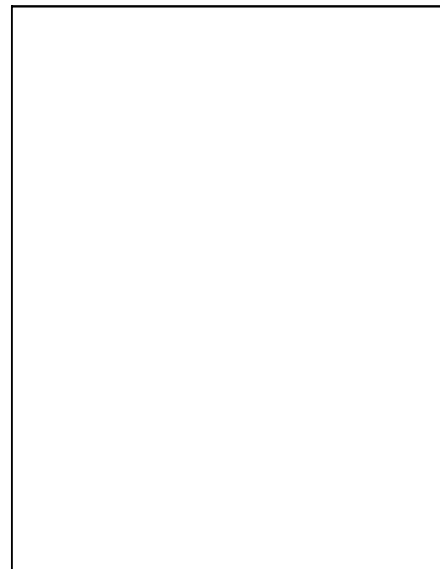
$$h1(i,j) = \quad h3(i,j) =$$

■            ■

$$h2(i,j) = \quad h4(i,j) =$$

■            ■

h1(i,j)  
h2(i,j)  
h3(i,j)  
h4(i,j)



i



**w=30mm**

$w := 30$        $a := 1$        $j := 1$        $b := 9$        $i := a, a + j.. b$

$ro := \frac{(100^2 + w^2)}{2 \cdot w}$        $r_i :=$

$ro = 181.667$        $S0_i := \pi \cdot (r_i)^2$        $i + j =$        $r_{i+j} := r_i + 10$

i =
1
2
3
4
5
6
7
8
9

$r_i :=$
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

$S0_{i+j} := \pi \cdot (r_{i+j})^2$        $r_{i+j} =$

$S0_{i+j} =$
314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>
2.545·10 <sup>4</sup>

$r_{i+j} =$
10
20
30
40
50
60
70
80
90

$S0(i) := S0_{i+j} - S0_i$        $S0_i =$

$S0_i =$
0
314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>

$alfa_{i+j} := \text{atan}\left(\frac{r_{i+j}}{ro - w}\right)$

$c_{i+j} := 2 \cdot ro \cdot \sin\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right)$

$w_{i+j} := c_{i+j} \cdot \sin\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right)$

$b_{i+j} := c_{i+j} \cdot \cos\left(\frac{alfa_{i+j}}{2}\right)$

$Sc(i, j) := S1_{i, i+j} - S1_{i-j, i}$        $S1_{i, i+j} := \pi \cdot [(b_{i+j})^2 + (w_{i+j})^2]$

$R(i, j) := \frac{S0(i)}{Sc(i, j)}$

$b_{i+j} =$

11.952
23.75
35.251
46.328
56.879
66.829
76.129
84.756
92.708

$c_{i+j} =$

11.959
23.802
35.42
46.716
57.608
68.032
77.944
87.315
96.134

$S0(i) =$

314.159
942.478
$1.571 \cdot 10^3$
$2.199 \cdot 10^3$
$2.827 \cdot 10^3$
$3.456 \cdot 10^3$
$4.084 \cdot 10^3$
$4.712 \cdot 10^3$
$5.341 \cdot 10^3$

$w_{i+j} =$

0.394
1.559
3.453
6.006
9.134
12.739
16.721
20.983
25.436

$\alpha_{i+j} =$

0.066
0.131
0.195
0.258
0.318
0.377
0.432
0.485
0.536

$S1_{i,i+j} =$

449.269
$1.78 \cdot 10^3$
$3.941 \cdot 10^3$
$6.856 \cdot 10^3$
$1.043 \cdot 10^4$
$1.454 \cdot 10^4$
$1.909 \cdot 10^4$
$2.395 \cdot 10^4$
$2.903 \cdot 10^4$

$S1_{i-j,i} =$

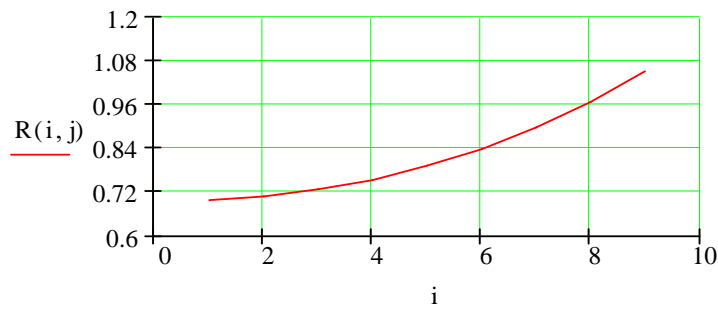
0
449.269
$1.78 \cdot 10^3$
$3.941 \cdot 10^3$
$6.856 \cdot 10^3$
$1.043 \cdot 10^4$
$1.454 \cdot 10^4$
$1.909 \cdot 10^4$
$2.395 \cdot 10^4$

$Sc(i,j) =$

449.269
$1.33 \cdot 10^3$
$2.162 \cdot 10^3$
$2.915 \cdot 10^3$
$3.57 \cdot 10^3$
$4.115 \cdot 10^3$
$4.545 \cdot 10^3$
$4.865 \cdot 10^3$
$5.083 \cdot 10^3$

$R(i,j) =$

0.699
0.708
0.727
0.754
0.792
0.84
0.899
0.969
1.051



$$h1(i,j) := R(i,j) \cdot 0.5$$

$$h2(i,j) := R(i,j) \cdot 0.8$$

$$h3(i,j) := R(i,j) \cdot 1.3$$

$$h4(i,j) := R(i,j) \cdot 2$$

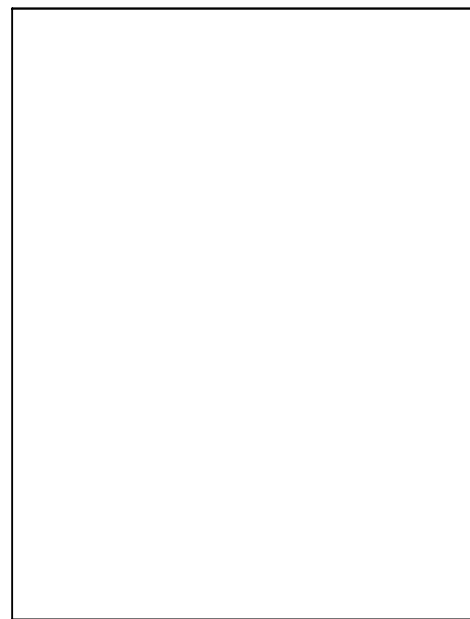
$$h1(i,j) = \quad h3(i,j) =$$

|                      |

$$h2(i,j) = \quad h4(i,j) =$$

|                      |

h1(i,j)  
h2(i,j)  
h3(i,j)  
h4(i,j)



i

**w=40mm**

$$w := 40$$

$$a := 1$$

$$j := 1$$

$$b := 9$$

$$i := a, a + j.. b$$

$$r_o := \frac{(100^2 + w^2)}{2 \cdot w}$$

$$r_o = 145$$

$$i =$$

1
2
3
4
5
6
7
8
9

$$r_i :=$$

0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

$$S0_i := \pi \cdot (r_i)^2$$

$$S0_{i+j} := \pi \cdot (r_{i+j})^2$$

$$S0_{i+j} =$$

314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>
2.545·10 <sup>4</sup>

$$i + j =$$

2
3
4
5
6
7
8
9
10

$$r_{i+j} := r_i + 10$$

$$r_{i+j} =$$

10
20
30
40
50
60
70
80
90

$$S0(i) := S0_{i+j} - S0_i$$

$$\text{alfa}_{i+j} := \text{atan}\left(\frac{r_{i+j}}{r_o - w}\right)$$

$$c_{i+j} := 2 \cdot r_o \cdot \sin\left(\frac{\text{alfa}_{i+j}}{2}\right)$$

$$w_{i+j} := c_{i+j} \cdot \sin\left(\frac{\text{alfa}_{i+j}}{2}\right)$$

$$b_{i+j} := c_{i+j} \cdot \cos\left(\frac{\text{alfa}_{i+j}}{2}\right)$$

$$S1_{i,i+j} := \pi \cdot [(b_{i+j})^2 + (w_{i+j})^2]$$

$$Sc(i, j) := S1_{i,i+j} - S1_{i-j,i}$$

$$R(i, j) := \frac{S0(i)}{Sc(i, j)}$$

$$S0_i =$$

0
314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>

$b_{i+j} =$

13.747
27.131
39.835
51.619
62.34
71.94
80.432
87.876
94.365

$c_{i+j} =$

13.763
27.252
40.223
52.486
63.912
74.434
84.037
92.747
100.614

$S_0(i) =$

314.159
942.478
$1.571 \cdot 10^3$
$2.199 \cdot 10^3$
$2.827 \cdot 10^3$
$3.456 \cdot 10^3$
$4.084 \cdot 10^3$
$4.712 \cdot 10^3$
$5.341 \cdot 10^3$

$w_{i+j} =$

0.653
2.561
5.579
9.499
14.085
19.105
24.353
29.662
34.908

$\alpha_{i+j} =$

0.095
0.188
0.278
0.364
0.444
0.519
0.588
0.651
0.709

$S_{1i,i+j} =$

595.066
$2.333 \cdot 10^3$
$5.083 \cdot 10^3$
$8.654 \cdot 10^3$
$1.283 \cdot 10^4$
$1.741 \cdot 10^4$
$2.219 \cdot 10^4$
$2.702 \cdot 10^4$
$3.18 \cdot 10^4$

$S_{1i-j,i} =$

0
595.066
$2.333 \cdot 10^3$
$5.083 \cdot 10^3$
$8.654 \cdot 10^3$
$1.283 \cdot 10^4$
$1.741 \cdot 10^4$
$2.219 \cdot 10^4$
$2.702 \cdot 10^4$

$S_c(i,j) =$

595.066
$1.738 \cdot 10^3$
$2.75 \cdot 10^3$
$3.572 \cdot 10^3$
$4.178 \cdot 10^3$
$4.573 \cdot 10^3$
$4.781 \cdot 10^3$
$4.837 \cdot 10^3$
$4.779 \cdot 10^3$

$R(i,j) =$

0.528
0.542
0.571
0.616
0.677
0.756
0.854
0.974
1.118



$$h1(i,j) := R(i,j) \cdot 0.5$$

$$h2(i,j) := R(i,j) \cdot 0.8$$

$$h3(i,j) := R(i,j) \cdot 1.3$$

$$h4(i,j) := R(i,j) \cdot 2$$

$$h1(i,j) =$$

0.264
0.271
0.286
0.308
0.338
0.378
0.427
0.487
0.559

$$h3(i,j) =$$

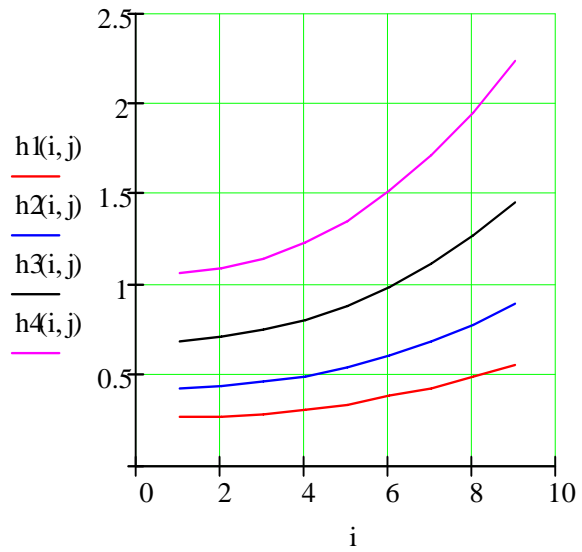
0.686
0.705
0.743
0.8
0.88
0.982
1.111
1.266
1.453

$$h2(i,j) =$$

0.422
0.434
0.457
0.493
0.541
0.605
0.683
0.779
0.894

$$h4(i,j) =$$

1.056
1.084
1.143
1.231
1.353
1.511
1.709
1.948
2.235



**w=50mm**

w := 50

a := 1

j := 1

b := 9

i := a, a + j.. b

$$r_0 := \frac{(100^2 + w^2)}{2 \cdot w}$$

r<sub>0</sub> = 125

i =

1
2
3
4
5
6
7
8
9

r<sub>i</sub> :=

0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

S<sub>0i</sub> := π · (r<sub>i</sub>)<sup>2</sup>

S<sub>0i+j</sub> := π · (r<sub>i+j</sub>)<sup>2</sup>

S<sub>0i+j</sub> =

314.159
1.257·10 <sup>3</sup>
2.827·10 <sup>3</sup>
5.027·10 <sup>3</sup>
7.854·10 <sup>3</sup>
1.131·10 <sup>4</sup>
1.539·10 <sup>4</sup>
2.011·10 <sup>4</sup>
2.545·10 <sup>4</sup>

i + j =

2
3
4
5
6
7
8
9
10

r<sub>i+j</sub> := r<sub>i</sub> + 10

r<sub>i+j</sub> =

10
20
30
40
50
60
70
80
90

S<sub>0(i)</sub> := S<sub>0i+j</sub> - S<sub>0i</sub>

$$\alpha_{i+j} := \text{atan}\left(\frac{r_{i+j}}{r_0 - w}\right)$$

$$c_{i+j} := 2 \cdot r_0 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{i+j}}{2}\right)$$

$$w_{i+j} := c_{i+j} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{i+j}}{2}\right)$$

$$b_{i+j} := c_{i+j} \cdot \cos\left(\frac{\alpha_{i+j}}{2}\right)$$

$$S_{1i,i+j} := \pi \cdot [(b_{i+j})^2 + (w_{i+j})^2]$$

Sc(i, j) := S<sub>1i,i+j</sub> - S<sub>1i-j,i</sub>

$$R(i, j) := \frac{S_{0(i)}}{Sc(i, j)}$$

S<sub>0i</sub> =

0
314.159
257·10 <sup>3</sup>
827·10 <sup>3</sup>
027·10 <sup>3</sup>
854·10 <sup>3</sup>
131·10 <sup>4</sup>
539·10 <sup>4</sup>
011·10 <sup>4</sup>

$b_{i+j} =$

16.52
32.208
46.424
58.824
69.338
78.087
85.29
91.192
96.028

$c_{i+j} =$

16.557
32.483
47.277
60.634
72.446
82.752
91.676
99.382
106.039

$S_0(i) =$

314.159
942.478
$1.571 \cdot 10^3$
$2.199 \cdot 10^3$
$2.827 \cdot 10^3$
$3.456 \cdot 10^3$
$4.084 \cdot 10^3$
$4.712 \cdot 10^3$
$5.341 \cdot 10^3$

$w_{i+j} =$

1.097
4.221
8.94
14.706
20.994
27.391
33.618
39.507
44.977

$\alpha_{i+j} =$

0.133
0.261
0.381
0.49
0.588
0.675
0.751
0.818
0.876

$S_{1i,i+j} =$

861.199
$3.315 \cdot 10^3$
$7.022 \cdot 10^3$
$1.155 \cdot 10^4$
$1.649 \cdot 10^4$
$2.151 \cdot 10^4$
$2.64 \cdot 10^4$
$3.103 \cdot 10^4$
$3.532 \cdot 10^4$

$S_{1i-j,i} =$

0
861.199
$3.315 \cdot 10^3$
$7.022 \cdot 10^3$
$1.155 \cdot 10^4$
$1.649 \cdot 10^4$
$2.151 \cdot 10^4$
$2.64 \cdot 10^4$
$3.103 \cdot 10^4$

$S_c(i,j) =$

861.199
$2.454 \cdot 10^3$
$3.707 \cdot 10^3$
$4.528 \cdot 10^3$
$4.938 \cdot 10^3$
$5.025 \cdot 10^3$
$4.89 \cdot 10^3$
$4.625 \cdot 10^3$
$4.296 \cdot 10^3$

$R(i,j) =$

0.365
0.384
0.424
0.486
0.573
0.688
0.835
1.019
1.243





$$h1(i,j) := R(i,j) \cdot 0.5$$

$$h2(i,j) := R(i,j) \cdot 0.8$$

$$h3(i,j) := R(i,j) \cdot 1.3$$

$$h4(i,j) := R(i,j) \cdot 2$$

$$h1(i,j) =$$

0.182
0.192
0.212
0.243
0.286
0.344
0.418
0.509
0.622

$$h3(i,j) =$$

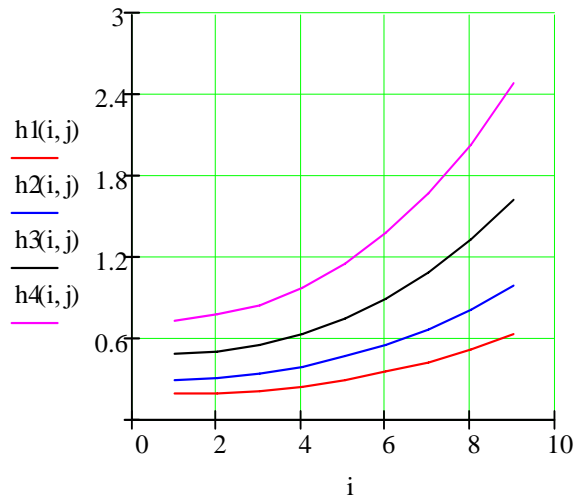
0.474
0.499
0.551
0.631
0.744
0.894
1.086
1.324
1.616

$$h2(i,j) =$$

0.292
0.307
0.339
0.389
0.458
0.55
0.668
0.815
0.995

$$h4(i,j) =$$

0.73
0.768
0.847
0.971
1.145
1.375
1.67
2.038
2.486



## **ANEXA 5**

**Secvențe de program Mathcad pentru calculul profilului  
teoretic al secțiunii transversale prin calota sferică**

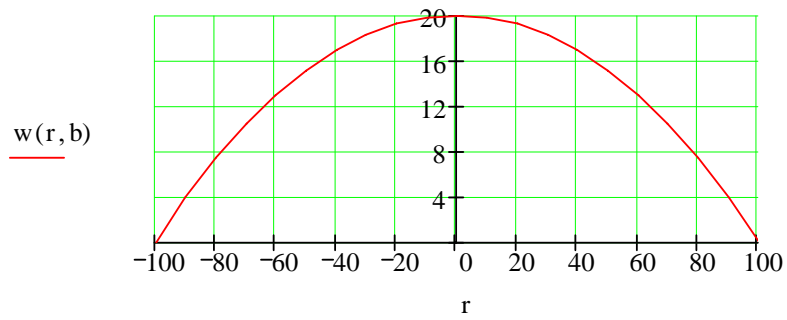
$r := -100, -90.. 100$

$b := 100 \quad w := 20$

$$w(r,b) := \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot r^2}{4}} - \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot b^2}{4}}$$

$w(r,b) =$

0
3.926
7.386
10.4
12.982
15.147
16.905
18.263
19.23
19.808
20
19.808
19.23
18.263
16.905
15.147
12.982
10.4
7.386
3.926
0



$$r := -100, -90..100$$

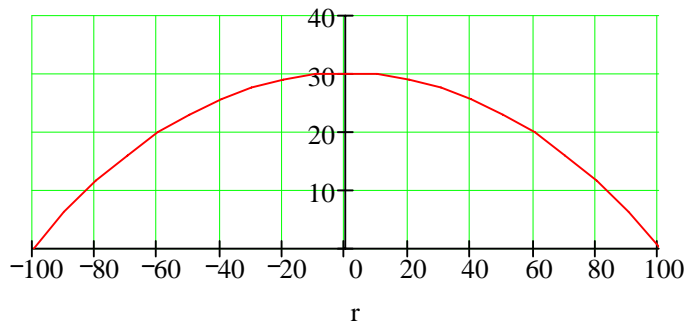
$$b := 100 \quad w := 30$$

$$w(r, b) := \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot r^2}{4}} - \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot b^2}{4}}$$

w(r, b) =

0
6.139
11.437
15.972
19.806
22.984
25.542
27.506
28.896
29.725
30
29.725
28.896
27.506
25.542
22.984
19.806
15.972
11.437
6.139
0

w(r, b)



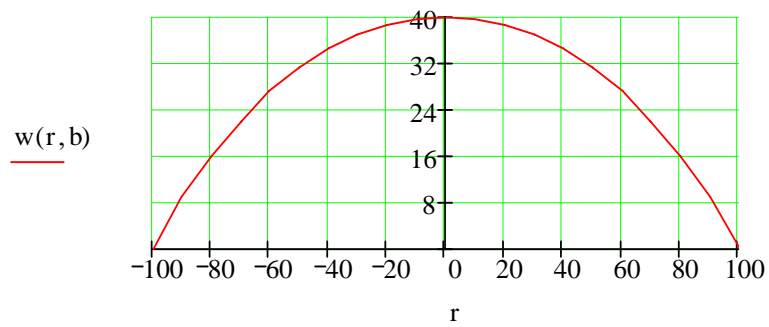
$r := -100, -90..100$

$b := 100 \quad w := 40$

$$w(r, b) := \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot r^2}{4}} - \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot b^2}{4}}$$

$w(r, b) =$

0
8.688
15.934
21.984
27.004
31.107
34.374
36.863
38.614
39.655
40
39.655
38.614
36.863
34.374
31.107
27.004
21.984
15.934
8.688
0



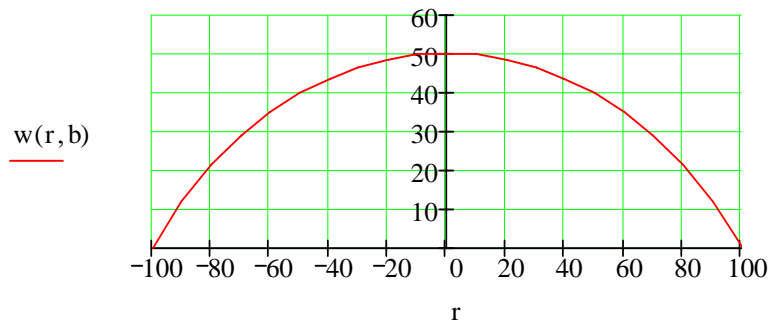
$r := -100, -90..100$

$b := 100 \quad w := 50$

$$w(r, b) := \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot r^2}{4}} - \sqrt{\frac{w^2 \left(1 + \frac{b^2}{w^2}\right)^2 - 4 \cdot b^2}{4}}$$

$w(r, b) =$

0
11.747
21.047
28.562
34.659
39.564
43.427
46.347
48.39
49.599
50
49.599
48.39
46.347
43.427
39.564
34.659
28.562
21.047
11.747
0



## BIBLIOGRAFIE

1. Buzdugan Gh., "Rezistența materialelor", Ed.Tehnică București,1980
2. Cira O. „Lecții de Mathcad”, Ed. Albastra, Cluj Napoca, 2001
3. Cirilo A., „ Tehnologia matrițării și ștanțării la rece”, E.D.P. București, 1966
4. Douglas J.F., Gasiorek J.M. and Swaffield J.A., „Fluid Mechanics”, Third edition, Longman Group Limited 1995, United Kingdom
5. Iliescu C., „Tehnologia presării la rece”, E.D.P., București,1984
6. Oroveanu T., „Mecanica fluidelor vâscoase, Ed. Academiei R.S.Romania, București, 1967
7. Rosinger Șt., „Tehnologia presării la rece”, I.P.“Traian Vuia” Timișoara, 1977
8. Rosinger Șt., „Procese și scule de presare la rece”,Editura Facla Timișoara, 1987
9. Sporea I., „ Tehnologia materialelor”, Vol.II, I.P.Timișoara, 1983
10. Zgură Gh. ș.a., „Prelucrarea metalelor prin deformare la rece”, E.T. București,1977
11. Timoshenko S.P., Woinovsky-Krieger S., „Teoria plăcilor plane și curbe”, E.T. București, 1968
12. \*\*\* „Manualul inginerului mecanic”, E.T. București, 1976
13. Abedrabbo Nader Elias, “Experimental and numerical investigations of Stamp Hydroforming and ironing of wrinkling in Sheet metal Forming” thesis submitted to Michigan State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Department of Mechanical Engineering 2002
14. Abedrabbo N, Zampaloni M.A., Pourboghrat F., „Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming”, International Journal of Mechanical Sciences, 47, pp.333-358, 2005
15. Abrantes J. P., Bataha G.F. „Simulaçã numérica via elementos finitos da conformação de chapas metálicas por pressão hidráulica (Bulge test)”, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 18 a 21 de Maio de 2003
16. Ahmetoglu, M., and Altan, T., "Tube Hydroforming – "State of the Art and Future Trends" SAE Congress, for Spring 1999
17. Ahmetoglu, M., and Altan, T., "Hydroforming of Tubes and Shells", SME FABTECH Conference 1997
18. Altan, T. et. Al. "Tube & Sheet Hydroforming: What's new and important?" presented at the SME Hydroforming Conference, Sept. 2005, Chicago, IL.
19. Altan, T. et al "Advanced Methods of Simulation in Tube Hydroforming - Research Progress and Case Studies", Proceedings of the THF Conference, Stuttgart, October 27/28, 2003, p.111
20. Altan, T., "Advances in Tube and Sheet Hydroforming for Light Weight Automotive Structures" presented at the ASM/TMS Conference, Oct 6-10, 2002, Columbus, Ohio (slides only)
21. Altan T "R. & D. Update sheet hydroforming", Stamping Journal, November/ December, pp 90-93, 1999
22. Aszema E. H., Huétink J., "Incremental formulation of rigid-plastic and elastic-plastic constitutive equations for simulation of forming processes", Computational Plasticity Fundamentals and Applications, D.R.J.Owen et al. (eds.), Printridge Press, Swanska, p.1065-1076,1992
23. Aszema E. H., "Formability of sheet metal and sandwich laminates", Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, ISBN 90-90069410, 1994

24. Aue-u-lan Y. et.al. including T. Altan, "Warm forming magnesium, aluminum tubes - A high temperature process for light weight alloys" Tube and Pipe Journal, September 2006, p.36
25. Barlat F., Lege D.J. and Brem C. "A six component yield functions for Anisotropic Materials", International Journal of Plasticity, Vol.7, pp693-712, 1991
26. Birkert A., "Tool and part design for hydroforming" Proceedings of the International Conference on Hydroforming, Stuttgart, Germany, October 12-13, 2000
27. Borst R., Feenstra P.H., "Studies in anisotropic plasticity with reference to the Hill criterion", Int. J. Num. Meth. Eng., vol.29, pp. 315-336, 1990
28. Drucker D.C., "The significance for additional plastic deformation of metals", J. Colloid Sci vol. 3, p.299-311, 1949
29. Fretty P., "Hydroforming under pressure", Technology Report, case study-hydroforming reshapes BMW, Advanced Manufacturing, November 2001
30. Ghouati O., Lenoir H., Gelin J.C. and Baida M. "Design and control of Forming Processes using optimization technique", Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences September 12-15, 1999, Las Vegas, Nevada
31. Gylienė V., Ostaševičius V., "Study of Hydroforming by implementing necking criterion in FEM code", ISSN 1392-1207, Mechanika, Nr.4(54), 2005
32. Hill R., "The mathematical theory of Plasticity", Clarendon Press, Oxford, 1950
33. Hein P. And Volertsen P., "Hydroforming of sheet metal pairs", Journal of Materials Processing Technology, 87 (1-3), pp.154-164. 1999,
34. Hillier M.J., "The effect of the pressure on the ductility of thin sheet subjected to some simple forming processes", The International Journal of Production Research, 3, pp.341-352
35. Koc M., and Altan T., "Prediction of forming limits and parameters in the tube hydroforming process", International Journal of machines tools & Manufacture, 42, pp.123-138, 2002
36. Lee Wu M.H., "Analysis of plane-plastic stress problems with axial symmetry in strain-hardening range", Report 1021, NACA 1950
37. Levy S., "Square plate with clamped edges under normal pressure producing large deflection", Report No.740
38. Liu J., Atmetoglu M., and Altan T., "Evaluation of sheet metal formability, viscous pressure forming (V.P.F.) dome test", Journal of Material Processing Technology, 98, pp.1-6, 2000
39. Lo S. W., Hsu T. Z., and Wilson W.R.D., "An analysis of the hemispherical punch hydroforming processes", Journal of Material Processing Technology, 37, pp.225-239, 1993
40. Mehdi M. BEN TAHAR, "Contribution a l'etude et la simulation du procede d'hydroformage"; These pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris, 23 septembre, 2005
41. Ngaile, G., Jaeger, S., and Altan T. "Lubrication in Tube Hydroforming-Part II., LDH Test and Pear Shaped Expansion Test" , Journal of Materials Processing Technology, Volume 146, Issue 1, Pages 116-123 , 2004
42. Rosinger Ș., Micșa I., Vucu I., "Considerații teoretice și încercări experimentale privind procesul ambutisării hidraulice", Industria Ușoară 12, nr.2, 1965
43. Sheplak M., Dugundji J., "Large deflections of clamped Circular Plates Under Initial Tension and Transitions to Membrane Behavior", To appear in Journal of Applied Mechanics
44. Siegert K., et al "Evaluation of Lubrication in Tube Hydroforming", Production Engr., vol. X, Nr. 1, 2003, p.23, 2003
45. Siegert K., et al "Sheet Metal Hydroforming", Proceedings of TPR 2000, Cluj-Napoca, May 11-12, 2000, pp.3-20.



46. Sokolowski T., et al (including Altan, T.), "Evaluation of Tube Formability and Material Characteristics", J. of Materials Processing Technology, V. 98, No. 1, Jan 15, 2000, p.34, 2000
47. Yossifon S., Tirosh J., and Kochavi E., " On supression of plastic bucking in hydroforming processes", International Journal of Mechanical Science", 26, pp.389-402, 1984
48. Yu W. R., Zampaloni M., Pourboghrat F., Chung K., Kang T.J., "Sheet hydroforming of woven FRT composites: non-orthogonal constitutive equation considering shear stiffness and undulation of woven structure", Composite Structures 61, pp. 353-362, 2003
49. Timoshenko S. and Woinovsky-Krieger S., "Theory of Plates and Shells", McGraw Hill Classic Textbook Reissue (1987)
50. Thiruvarudchel, van S., and Wang U., "Hydraulic pressure enhangement of the deep drawing process to yield deeper cups", Journal of Materials Processing technology, 82. pp. 156-164,1998
51. Vahl M., Hein P., Bobbert S., "Hydroforming of sheet metal pairs for the production of hollow bodies", Subject of a presentation at the 1999 ATS International Steelmaking Conference (Paris, December 8-9, 1999, Session 4
52. Wilkins M.L., "Calculation of elastic-plastic flow", Methods of computational Physics", Alder et al. (eds). vol.3. pp. 211-263, New York Academic Press, 1964
53. Pernevan I., „Estimarea teoretică a posibilităților de etanșare metal-metal pentru un dispozitiv de deformare hidrostatică a tablelor subțiri”, Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad , 2004, Seria textile, 383-387
54. Pernevan I., „Încercări primare de deformare hidrostatică și rezultatele acestora”, Analele Universității „ Aurel Vlaicu” din Arad, 2004 Seria textile, pag. 388 - 393
55. Pernevan I., Pernevan M.,: "Theoretical analysis of a circular thin plate under pressure clamped to rim in the plastic range deformation", Modelling and optimization in the machine building field-MOCM Bacău, Nov., 2005, 4 pagini.
56. Pernevan I., "A preliminary study for the hydraulic manufacturing of the tubular "T", axially simmetrycal parts with the achievement of the internal pressure with a plunger introduced in the interior of the material", Scientific and Technical Bulletin, Series: Mechanical Engineering, Vol I, No.1, 2005, ISSN1584-918X, 43- 49.
57. Pernevan I., „Analiza variației grosimii semifabricatului la formarea hidraulică a pieselor tubulare” Analele Universității "Aurel Vlaicu" Arad, noiembrie 2002, Seria Mecanica, pag.322, ISSN 1582-3393
58. Лукианов В. П., "Формовка тройников из труб гидравлическим выпучиванием с отбортовкой", УДК 621.774.77, No. 10,1970
59. \*\*\* <http://www.scientific.net/0-87849-972-5/1/>
60. \*\*\* [http://www.crf.it/uk/B/B3\\_1.html](http://www.crf.it/uk/B/B3_1.html)
61. \*\*\* <http://www.springerlink.com/content/h722605460t7q877/>
- 62.\*\*\*[http://www.worldautosteel.org/ulsab/OverviewReport/ULSAB\\_ExecSum.pdf](http://www.worldautosteel.org/ulsab/OverviewReport/ULSAB_ExecSum.pdf)
63. \*\*\* <http://www.woodheadpublishing.com/en/book.aspx?bookID=1359>
64. \*\*\* [http://msl1.mit.edu/msl/meeting\\_04192001/prz\\_pdf/constantine.pdf](http://msl1.mit.edu/msl/meeting_04192001/prz_pdf/constantine.pdf)
- 65.\*\*\*<http://www.edpsciences.org/articles/metal/pdf/2001/09/drewes.pdf?access=ok>
- 66.\*\*\*<http://www.autosteel.org/AM/Template.cfm?Section=PDFs&CONTENTID=4267&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm>
- 67.\*\*\*<http://www.hydroforming.net/hydro/home/html/modules.php?op=modload&name=News&file=index&catid=&topic=1&allstories=1>
- 68.\*\*\*<http://www.memagazine.org/backissues/february97/features/steelcar/steelcar.html>
70. \*\*\* [https://shop.sae.org/technical/papers/ground\\_vehicle/MFG](https://shop.sae.org/technical/papers/ground_vehicle/MFG)