

**UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA
CATEDRA DE REZISTENTA MATERIALELOR**

Ing. Marcela Sava

TEZA DE DOCTORAT

**STUDIUL COMPORTAMENTULUI PULBERILOR
METALICE PRESATE LA TEMPERATURA AMBIANTA**

BIBLIOTECA CENTRALA
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMISOARA

2003

**Conducător științific
Prof. dr. ing. Ionel DOBRE**

2003

CUPRINS

INTRODUCERE GENERALA.....	1
NOTATIILE.....	4
I.SINTEZA MODELELOR DE COMPORTAMENT- Introducere.....	6
I.1. Criterii de plasticitate pentru materiale poroase.....	6
I.1.1. Criteriul lui Kuhn și Downey.....	6
I.1.2. Modelul lui Green.....	8
I.1.3.Criteriul lui Shima – Oyane.....	10
I.1.4. Alte modele de tip Green sau Shima – Oyane.....	13
I.1.5. Modelul lui Gurson.....	16
I.1.6. Variante ale modelului lui Gurson.....	18
I.1.7. Concluzie.....	19
I.2. Modele din mecanica solurilor.....	20
I.2.1. Criteriul tip curba intrinsecă.....	20
I.2.2. Criteriul de plasticitate perfectă al lui Drucker – Prager.....	20
I.2.3. Modelele Cam-clay.....	21
I.2.4. Modelul lui Nova, "Simfonieta classica".....	22
I.2.5.Modele care țin cont de al treilea invariant al tensorului deviator.....	25
I.2.6. Cap model.....	27
I.2.7. Modele cu două mecanisme.....	30
I.2.8. Luarea în considerare a anizotropiei.....	33
I.2.9. Modele de plasticitate avansată.....	33
I.2.9.1.Modele multisuprafețe	33
I.2.9.2. Modele endocronice.....	36
I.2.9.3. Hipoelasticitate.....	36
I.2.10. Concluzie.....	36
I.3. Modele pentru pulberi comprimate la temperatura ambiantă.....	37
I.3.1. Modelul lui Fleck.....	37
I.3.2. Modelele eliptice.....	38
I.3.3. Modelul bicap.....	40

I.3.4. Modelul lui Shtern.....	42
I.3.5. Cap model adaptat pentru pulberi metalice.....	42
I.3.6. Concluzie.....	44
II. MODELAREA COMPORTAMENTULUI UNEI PULBERI DE FIER PRESATE LA TEMPERATURA AMBIANTA.....	45
II.1. Rezultate experimentale utilizate.....	45
II.2. Notatii.....	46
II.3. Model propus.....	46
II.3.1. Suprafata de incarcare.....	46
II.3.2. Analiza modelului propus.....	49
II.3.3. Parametrul de ecruisare.....	50
II.3.4. Functiunea modelului.....	53
II.3.4.1. Densificarea.....	53
II.3.4.2. Dilatanta.....	54
II.3.5. Metoda de calare; identificarea parametrilor.....	55
II.4. Concluzie.....	60
III.COMPARATIE INTRE MODELUL PROPUȘ SI MODELELE CELE MAI UTILIZATE IN LITERATURA DE SPECIALITATE.....	63
III.1. Recapitulare – modelul propus.....	63
III.2. Modelul Cam-clay modificat.....	65
III.2.1. Functiunea modelului.....	66
III.2.1.1. Densificarea.....	66
III.2.1.2. Dilatanta.....	67
III.2.2. Calarea modelului Cam-clay modificat pe rezultatele experimentale.....	68
III.2.3.Comparație între modelul propus și modelul Cam-clay modificat.....	68
III.3. Cap model.....	71
III.3.1. Functiunea modelului.....	71
III.3.1.1. Densificarea: funcția f_2	72
III.3.1.2. Dilatanta : funcția f_1	73
III.3.2. Cap model modificat	74

III.3.3. Calarea Cap modelului modificat pe rezultatele experimentale.....	77
III.3.4. Comparație între modelul propus și modelul Cam-clay modificat.....	79
III.4. Concluzie.....	81
IV. STUDIU EXPERIMENTAL.....	82
IV.1. Realizarea pieselor din pulberi metalice prin presare la temperatura ambiantă.....	82
IV.1.1. Consolidarea pulberilor metalice în timpul presării la temperatura ambiantă.....	83
IV.1.2. Presarea unidirecțională.....	85
IV.1.2.1. Studiul mijloacelor de laborator utilizate pentru presarea unidirecțională.....	87
IV.1.3. Presarea izostatică.....	91
IV.1.4. Presarea triaxială.....	91
IV.1.4.1. Studiul mijloacelor de laborator utilizate pentru presarea triaxială.....	92
IV.2. Incercări experimentale.....	96
IV.2.1. Presarea uniaxială a pulberii de fier.....	97
IV.2.1.1. Dispozitiv experimental.....	98
IV.2.1.2. Rezultatele încercărilor pentru pulberea de fier.....	101
IV.2.1.3. Evoluția densității în timpul încercării.....	103
IV.2.1.4. Interpretarea rezultatelor experimentale.....	106
IV.2.2. Presarea izostatică a pulberii de fier.....	110
IV.2.2.1. Dispozitivul experimental.....	110
IV.2.2.2. Rezultatele încercărilor izostatice.....	111
IV.2.3. Incercarea la compresiune a comprimatelor din pulbere de fier.....	113
IV.2.3.1. Principiul încercării.....	113
IV.2.4. Presarea uniaxială a pulberii de bronz.....	115
IV.2.4.1. Instalația experimentală.....	115
IV.2.4.2. Rezultatele încercărilor pentru pulberea de bronz.....	118

IV.2.4.3. Evoluția densității în timpul încercării.....	121
IV.2.4.4. Interpretarea rezultatelor experimentale.....	122
IV. 2.5. Incercarea la compresiune simplă a comprimatelor din pulbere de bronz.....	125
IV.2.6. Concluzie.....	127
V.STUDIUL MICROSTRUCTURAL AL PULBERII DE FIER UTILIZATE	129
V.1. Pulberea de fier utilizată	129
V.2. Tipuri de probe utilizate.....	129
V.3. Studiul deformației plastice a particulelor de pulbere de fier pe parcursul presării la temperatura ambiantă.....	130
V.3.1. Apreciere calitativă a deformației plastice.....	131
V.3.2. Studiul ecrusării probelor.....	135
V.4. Analiza liniară cantitativă a distribuției porilor în pulberea de fier presată la temperatura ambiantă.....	138
V.4.1. Metoda și aparatura.....	138
V.4.2. Rezultate obținute.....	142
V.4.2.1. Probe izotrope.....	142
V.4.2.2. Probe presate uniaxial în matriță.....	143
V.4.2.3. Comparație între probele izotrope și cele presate uniaxial în matriță.....	145
V.5. Concluzii.....	146
VI.SIMULARE NUMERICA.....	147
VI.1. Prezentarea programului LAGAMINE.....	147
VI.2. Integrarea legilor elastoplastice.....	149
VI.2.2. Funcționarea subprogramului PELL2AN1.for.....	152
VI.2.3. Metoda returului radial.....	152
VI.2.4. Integrarea modelului propus.....	154
VI.3. Simularea încercărilor simple.....	157
VI.3.1. Presarea uniaxială în matriță.....	157
VI.3.2. Presarea izotropă.....	159
VI.4. Concluzii.....	161

VII.CONCLUZII GENERALE.....	162
BIBLIOGRAFIE.....	167
ANEXE.....	173

INTRODUCERE GENERALA

Elaborarea pieselor prin procedeele metalurgiei pulberilor este în plină expansiune, permițând prelucrarea metalului sub formă de pulbere, fără a impune topirea lui. Pulberea este un ansamblu de particule cu dimensiuni cuprinse între 5 și 500 μm , de metale pure, de aliaje, de compuși intermetalici, de compuși chimici ai metalelor sau de amestecuri ale mai multor componente (SURDEANU); supunând pulberea unor acțiuni mecanice și termice este posibilă elaborarea unui material solid, datorită fenomenului de sinterizare (tendința particulelor unui sistem pulverulent de a se suda între ele și de a elimina golurile care le separă (BOUVARD), fenomen activat de temperatură).

Procesul de formare a pieselor în metalurgia pulberilor comportă două aspecte:

- presarea pulberilor în matriță sau sub presiune izotropă, al cărei rezultat este o piesă de formă și dimensiuni determinate, care are o coeziune suficientă pentru a fi manipulată; presarea este urmată de sinterizare;
- presarea la cald a pulberilor .

Metalurgia pulberilor a fost utilizată de incași pentru prelucrarea minereurilor de platină, de egipteni, pentru fabricarea sculelor din minereu de fier, de triburile africane, pentru realizarea vârfurilor săgeților. Dar adevăratul avânt l-a luat în secolul XX, devenind o tehnologie competitivă pentru producerea de piese în serie, la preț scăzut.

Pe plan mondial sunt produse anual circa 60000 tone de piese din pulberi, pentru majoritatea sectoarelor industriale, de la industria automobilului până la informatică, industria aerospațială, echipamente electrice, sectorul medical.

La noi în țară, fabricarea primelor produse sinterizate a început la nivel de

microproducție, iar din anul 1970 s-a trecut la fabricarea lor la scară industrială la SINTEROM Cluj-Napoca.

Metalurgia pulberilor permite :

a - producerea pieselor mici (în special pentru industria automobilului) cu avantajele următoare:

- obținerea într-o singură operație a unor piese de formă relativ complexă și cu o bună calitate a suprafeței;
- economie de material și de energie;
- puține prelucrări ulterioare;
- creșterea productivității datorită automatizării (2000 piese / oră pentru piese de 20 la 50 grame).

Procedeul de formare utilizat în acest caz este presarea la temperatura ambiantă urmată de sinterizare și calibrare. Piesele obținute prezintă o porozitate reziduală și au proprietăți mecanice mijlocii (70 - 80% din caracteristicile materialului dens).

b - producerea de produse poroase (filtre, cuzineți autolubrifianți), fiind singurul procedeu cunoscut;

c - elaborarea de materiale care nu pot fi obținute prin metode tradiționale datorită temperaturii ridicate de topire.

Toate avantajele prezentate mai sus au făcut ca elaborarea pieselor prin procedeele specifice metalurgiei pulberilor să fie preferată metodelor clasice ca forjarea sau turnarea. Pentru a cuceri noi piețe, piesele astfel obținute trebuie să răspundă unor exigențe din ce în ce mai importante. În urma presării la temperatura ambiantă pot să apară diverse defecte (fisuri ale piesei „crude”, geometrie necorespunzătoare, neomogenitate a densității) care compromit calitatea finală a pieselor.

Pentru a rezolva aceste probleme este important să se cunoască forma optimă a matriței pentru a obține dimensiunile și coeziunea dorite; la fel de importantă este cunoașterea comportamentului pulberii în timpul presării. Simularea numerică poate asigura controlul și optimizarea procesului de

fabricație, cu condiția unei bune cunoașteri a comportamentului mecanic al pulberii, asociat unei modelări care să poată reproduce fenomenele preponderente.

În acest context, obiectivele acestei teze sunt modelarea comportamentului unor pulberi metalice în timpul formării la temperatura ambiantă, studiul experimental efectuat pe pulberi de fier și bronz și simularea numerică a presării izostatice și uniaxiale în matriță a pulberii de fier.

Sinteza modelelor de comportament existente în literatura de specialitate reprezintă o contribuție originală și arată necesitatea elaborării unui nou model, care să depindă de un număr redus de parametri ușor de determinat pe baza rezultatelor experimentale și care să poată fi integrat într-un cod de element finit destinat simulării comportamentului pulberilor metalice presate la temperatura ambiantă.

Comparația între modelul propus în aceasta teză și modelele cele mai utilizate din literatura de specialitate este necesară pentru a sublinia originalitatea contribuției aduse în capitolul II.

Încercările experimentale furnizează date importante pentru cunoașterea comportamentului pulberilor în timpul presării și permit realizarea modelării acestui comportament.

Studiul original realizat la nivel microscopic furnizează informații importante referitoare la gradul de densificare a pulberii și la modul în care se realizează deformația plastică a particulelor de pulbere în timpul presării.

NOTATII

- $\underline{\sigma}$ tensorul tensiunilor (Cauchy);
- $\dot{\underline{\sigma}}$ tensorul vitezelor de tensiune ;
- σ_{ij} componenta ij a tensorului tensiunilor ;
- δ_{ij} componenta ij a tensorului unitate;
- σ_z tensiunea axială ;
- σ_r tensiunea radială ;
- σ_θ tensiunea circumferențială;
- σ_e tensiunea echivalentă ;
- σ_0 tensiunea uniaxială de curgere a materialului dens ;
- σ_p tensiunea uniaxială de curgere a materialului poros
cu densitatea relativă ρ_r ;
- σ_c rezistența la compresiune simplă ;
- χ rezistența la tracțiune izotropă;
- $S_1 = \sigma_{ij} \delta_{ij}$ primul invariant al tensorului tensiunilor ;
- $p = \frac{S_1}{3}$;
- $I_2 = \frac{1}{2} \underline{\sigma} : \underline{\sigma}$ al doilea invariant al tensorului tensiunilor ;
- $\bar{\sigma}_{ij}$ componenta ij a deviatorului tensorului tensiunilor ;
- $s_{ij} = \bar{\sigma}_{ij}$;
- $\bar{S}_2 = \sqrt{\bar{\sigma}_{ij} \bar{\sigma}_{ij}}$ al doilea invariant al deviatorului tensorului tensiunilor ;
- $q = \sqrt{\frac{3}{2}} \bar{S}_2$;
- \bar{S}_3 al treilea invariant al deviatorului tensorului tensiunilor ;
- \underline{C} tensor care caracterizează legea elastoplastică ;
- $\bar{\varepsilon}$ tensorul deformație echivalentă ;
- ε_V^p deformația volumică plastică;

$\underline{\underline{\varepsilon}}$ tensorul vitezelor de deformație ;
 $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ increment al vitezei de deformație plastică;
 $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ increment al vitezei de deformație elastică;
 δ_{ij}element al tensorului unitate ;
 ρ_r densitatea relativă a materialului poros ;
 V volumul pulberii comprimate;
 m masa pulberii;
 νcoeficientul lui Poisson ;
 λ și μ coeficienții lui Lamé;
 E modulul de elasticitate longitudinal;
 $dM = \dot{\lambda} = d\lambda$ multiplicatorul plastic;
 g potențialul plastic ;
 M coeficient de frecare internă a materialului ;
 β coeficient de transmitere a tensiunilor ;

SINTEZA MODELELOR DE COMPORTAMENT DIN LITERATURA DE SPECIALITATE

Introducere

Studiul prezentat în continuare are ca scop realizarea unei sinteze a modelelor de comportament pentru diferite tipuri de materiale și stabilirea stadiului actual al cercetării în acest domeniu. S-au studiat în special modelele de tip elastoplastic cu ecrusare (în densitate, deformație plastică volumică sau lucru mecanic plastic) care au o formă relativ simplă și sunt adecvate pentru modelarea rezultatelor experimentale care se pot obține la ora actuală. Intuitiv, comportamentul pulberii este elastic dacă tensiunea care apare datorită solicitării este inferioară unei anumite limite ; în caz contrar, pulberea are un comportament plastic.

Modelele din literatura de specialitate sunt clasificate în cele ce urmează în trei mari categorii categorii, astfel :

- criterii pentru materiale solide, poroase ;
- modele pentru materiale granulare de tip soluri ;
- modele pentru pulberi metalice presate la temperatura ambiantă.

I.1. CRITERII DE PLASTICITATE PENTRU MATERIALE POROASE

I.1.1. Criteriul lui KUHN și DOWNEY

KUHN și DOWNEY (1971) au fost primii care au propus o lege pentru a descrie comportamentul materialelor din metalurgia pulberilor ; având ca punct de

plecare compresiunea uniaxială liberă a unor cilindri din pulbere de fier sinterizată, ei au dedus dependența coeficientului lui Poisson (ν) de densitatea relativă (ρ_r):

$$\nu = 0.5 \rho_r^{1.92} \quad (1.1)$$

Criteriul de plasticitate propus, cu ecrisare în densitate relativă are forma :

$$f = \sqrt{3\bar{S}_2^2 - (1-2\nu) \cdot I_2} - \sigma_0 = 0 \quad (1.2)$$

$\bar{S}_2^2 = \bar{\sigma}_{ij} \cdot \bar{\sigma}_{ij}$ este al doilea invariant al deviatorului tensorului tensiunilor ;

$\bar{\sigma}_{ij}$ = tensiune deviatoare ;

$I_2 = \frac{1}{2} \sigma : \sigma$ este al doilea invariant al tensorului tensiunilor;

σ_0 = tensiunea de curgere uniaxială a materialului dens.

Suprafețele de plasticitate sunt elipse, reprezentate (Fig.1.1 în planul $(S_1/\sigma_0, \sqrt{3}\bar{S}_2/\sigma_0)$).

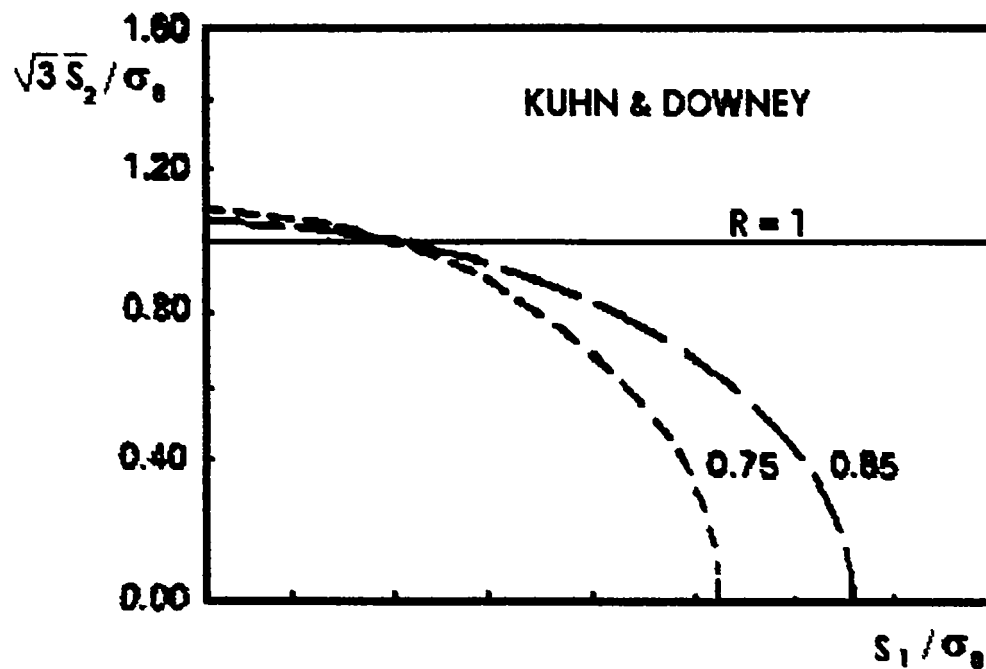


Fig.1.1. Suprafețele de plasticitate propuse de Kuhn & Downey.

Kuhn și Downey folosesc o lege de curgere asociată. Validitatea legii de comportament a fost verificată prin încercări de compresiune a unor cilindri de densitate dată și prin încercări de compresiune în deformații plane ale unor corpuri paralelipipedice inserate între două plane paralele .

1.1.2. Modelul lui GREEN

Modelul cel mai utilizat în metalurgia pulberilor metalice, pentru formarea la temperatura ambiantă, a fost propus de GREEN în 1972; acesta a elaborat o lege de tip elastoplastic cu ecrisare izotropă în densitate, folosind o generalizare a criteriului lui VON MISES. Criteriul este propus sub forma :

$$f = \bar{S}_2 + \alpha S_1^2 = \delta \cdot \sigma_0^2 \quad (1.3)$$

unde : f = tensiunea echivalentă a materialului poros ;

S_1 = primul invariant al tensorului tensiunilor ;

α și δ - parametri dependenți de densitatea relativă ; α și δ indică ponderea solicitărilor de compresiune și forfecare asupra comportamentului materialului ; când $\rho = 1$, $\alpha(1) = 0$ și $\delta(1) = 1$ și se ajunge la criteriul lui Von Mises pentru materiale dense.

Green consideră materialul poros constituit dintr-o matrice metalică cu găuri approximate prin sfere uniform repartizate în material. Comportamentul matricii este considerat rigid-perfect plastic, însă cavitățile îi conferă materialului proprietatea de compresibilitate.

Legea de curgere este asociată. Criteriul de plasticitate (1.3) este reprezentat în planul $(S_1, \sqrt{3} \bar{S}_2)$ de o familie de elipse centrate în origine (Fig.1.2).

Criteriul lui Geen a fost popularizat ulterior de către alți autori (dintre care îi amintim pe Abouaf) sub forma (relația 1.4):

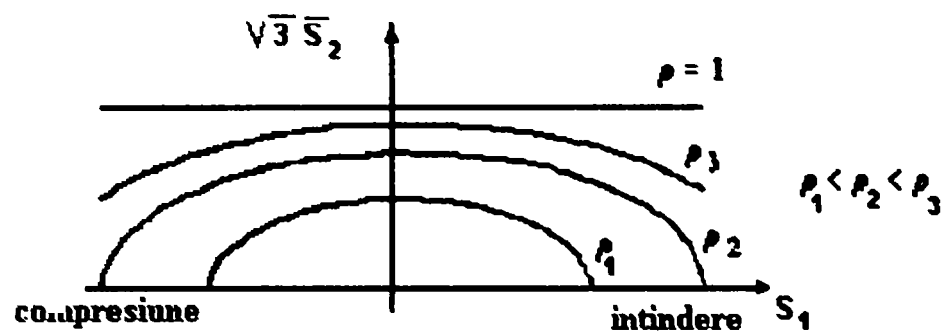


Fig.1.2. Suprafețele de plasticitate propuse de Green.

$$f = \sqrt{3 \cdot c_G \cdot \bar{S}_2^2 + f_G S_1^2} - \sigma_0 = 0 \quad (1.4)$$

c_G și f_G sunt parametri care variază cu densitatea relativă ρ_r a materialului, determinați analitic de către Green (Fig.1.3) :

$$c_G = \left\{ \frac{\left[3 - 2(1 - \rho_r)^4 \right]^2}{3 \left[1 - (1 - \rho_r)^3 \right]} \right\} \quad f_G = \frac{1}{4 \left[\ln(1 - \rho_r) \right]^2} \quad (1.5)$$

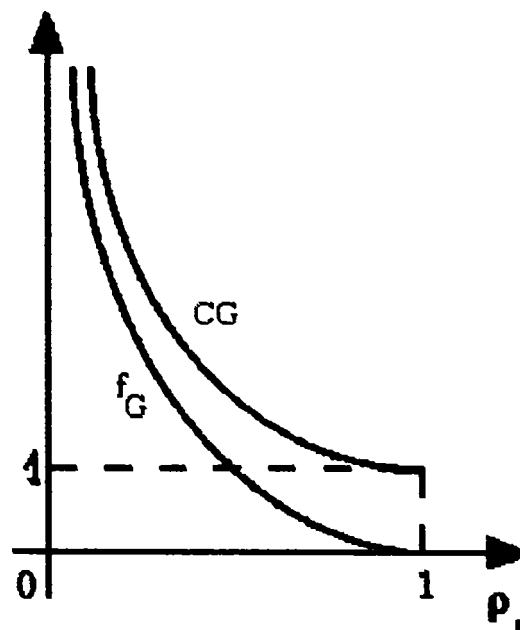


Fig.1.3. Variația parametrilor c_G și f_G .

Când $\rho_r \rightarrow 1$, $c_G(1) = 1$ și $f_G(1) = 0$; se regăsește criteriul lui Von Mises.

1.1.3. Criteriul SHIMA – OYANE

Modelul lui OYANE, SHIMA și KONO este inspirat din modelul lui Green. Întâi, în 1973, autorii au considerat materialul poros (pulbere de cupru sinterizată) ca fiind un ansamblu de celule cubice elementare, fiecare având în centrul ei un por cubic. Considerând că energia disipată pentru deformarea unei celule este echivalentă cu cea disipată de către material, autorii au dedus expresia tensiunii echivalente:

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho_r} \sqrt{3 \cdot \bar{S}_2^2 + \left(\frac{S_1}{f_s}\right)^2} \quad (1.6)$$

f_s = funcție de densitatea relativă; pentru $\rho_r \rightarrow 1$, $f_s \rightarrow \infty$ se regăsește tensiunea echivalentă tip Von Mises.

Criteriul corespunzător are forma: $F = \sigma_e - \sigma_0 = 0$.

În 1976, Shima și Oyane modifică acest criteriu, înlocuind densitatea relativă ρ_r cu o funcție f'_s , dependentă de densitatea relativă.

În 1978, Shima, Oyane și Tabata modifică expresia tensiunii echivalente pentru matricea materialului:

$$\sigma_e = \frac{1}{\rho^n} \left[\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} + (\sigma_m / f)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

unde : $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensiuni principale ;

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 = S_1 / 3;$$

$n = \text{constantă}$;

$f = a (1 - p)^m$, cu a și m constante ce se pot determina experimental.

Forma generală a criteriului (cu legea de curgere asociată):

$$F(\sigma, p_r) = \sigma_e - S \quad (1.8)$$

Pentru metalele sinterizate, S reprezintă tensiunea de curgere pentru materialul de bază.

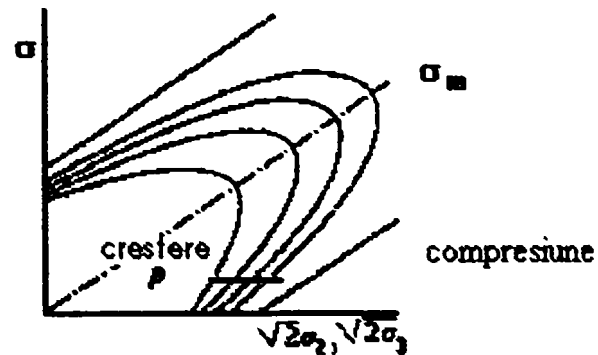


Fig.1.4. Suprafețele de plasticitate Shima – Oyane.

Pentru pulberi metalice, produsul (Sp^n) dă rezistența la compresiune, datorată deformațiilor plastice ale particulelor și interacțiunii particulelor.

În spațiul tensiunilor principale, ecuația (1.8) este reprezentată de elipsoizi a căror axă mare coincide cu axa presiunii hidrostatice (Fig.1.4).

Shima, Oyane și Tabata verifică faptul că ipoteza suprafețelor de plasticitate eliptice rămâne valabilă pentru pulberea de cupru nesinterizată. Ei au presat pulbere de cupru într-o presă triaxială; rezultatele acestei încercări sunt prezentate în figura 1.5, în care elipsele sunt reprezentate pornind de la rezultatele experimentale.

Punctele experimentale s-au obținut prin efectuarea unor încercări triaxiale în celulă cubică, având posibilitatea de a impune deplasări după cele trei direcții principale. Autorii sugerează existența unei limite (OA în Fig.1.5); de la această limită ipotetică compactarea este înlocuită printr-o dilatare care conduce la ruperea materialului.

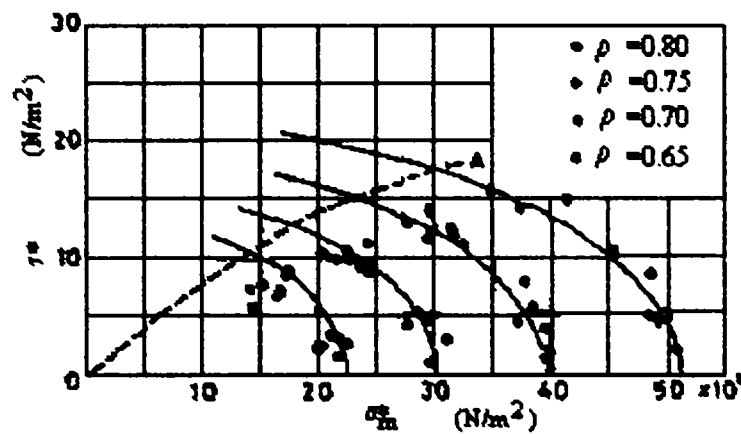


Fig.1.5. Suprafețe de plasticitate experimentale ($\sigma_m^* = S_1 / 3\sqrt{3}$, $\tau^* = \bar{S}_2$).

Shima și colectivul (1997) au modificat modelul propus pentru metale poroase, în scopul descrierii comportamentului pulberilor metalice comprimate la temperatura ambiantă; ei au studiat validitatea modelului pentru patru pulberi diferite de fier solicitate la compresiune biaxială și triaxială. Noul model este asociat și depinde de doi parametri de ecrusare, densitatea și tensiunea echivalentă $\bar{\sigma}$.

Suprafețele de plasticitate sunt definite astfel:

$$F = 3 \cdot \bar{S}_2^2 + \left(\frac{\sigma_m}{f} \right)^2 - (\rho_r^n \cdot \bar{\sigma})^2 = 0 \quad (1.9)$$

$$\bar{\sigma} = K \bar{\varepsilon}^c \quad (1.10)$$

$\bar{\varepsilon}$ = deformația echivalentă ;

K și c – constante de material.

Autorii au identificat parametrii modelului, ($a = 3$, $m = 0.1$, $n = 2.17$) și au reprezentat suprafețele de plasticitate calculate pentru $\rho = 0.8$ (Fig.1.5.1). Ei propun utilizarea unei tensiuni de curgere depinzând de deformația echivalentă ca în cazul solidelor ductile.

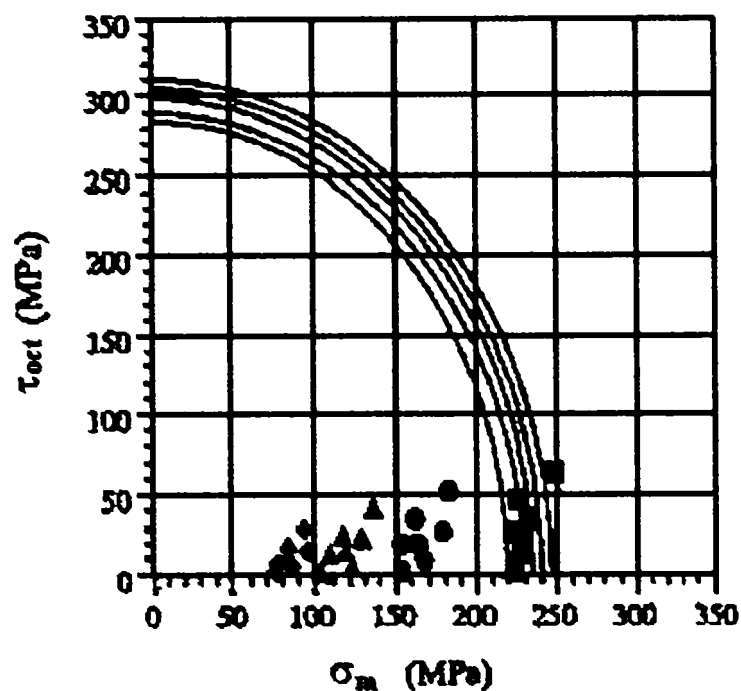


Fig. I.5.1. Suprafețe de plasticitate experimentale, în planul octaedric.

I.1.4. Alte modele de tip "Green" sau "Shima - Oyane"

Mai mulți cercetători au luat în considerare modele de tip Green sau Shima - Oyane :

$$A \cdot \bar{S}_2^2 + B \cdot S_1^2 = \delta \cdot \sigma_0^2 = \sigma_p^2 \quad (I.11)$$

unde σ_p = tensiunea de curgere uniaxială a materialului poros cu densitatea relativă p_r .

Această funcție include influența tensiunii hidrostatice și satisface condițiile de simetrie și convexitate impuse de teoria plasticității pentru materiale poroase. Funcțiile A, B și δ (care variază cu densitatea relativă) propuse de diferiți cercetători au fost grupate și studiate de DORAIVELU și colectivul (1984): majoritatea acestor funcții au fost deduse pe baza rezultatelor experimentale.

În acest context, CORAPCIOGLU și UZ (1978) au prezentat criteriul sub forma următoare :

$$f = \sqrt{3 \cdot \bar{S}_2^2 + B \cdot S_1^2} - \sigma_0 = 0 \quad (1.12)$$

$$\text{cu } B = [0.36 (1 - \rho_r)^2 + 0.4 (1 - \rho_r)] / \rho_r^2 \quad (1.13)$$

ceea ce conduce la forma suprafețelor de plasticitate din figura 1.6.

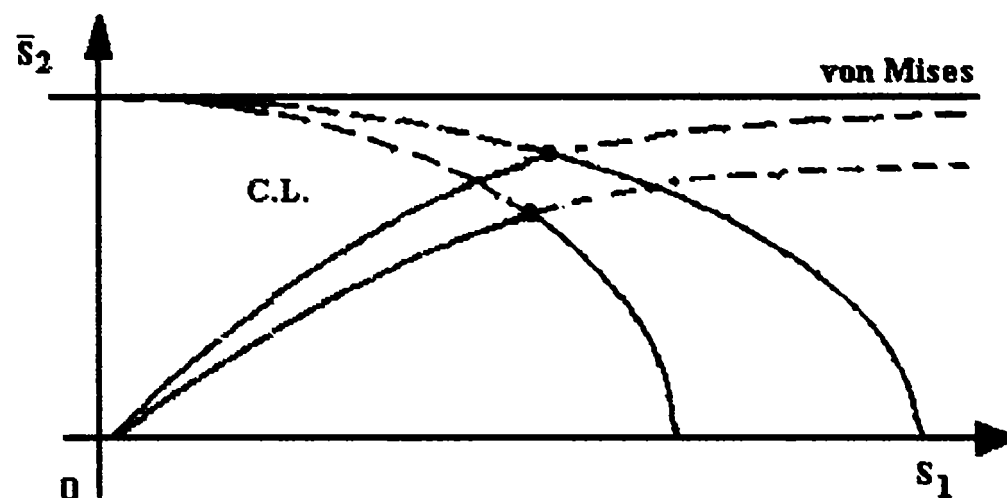


Fig.1.6. Suprafețe de plasticitate și condiții la limită (CL) în varianta lui Corapcioglu.

Autorii propun ecuația (1.14) pentru curba limită dintre domeniul compactant și cel dilatant identificată experimental de Oyane, Shima și Tabata :

$$\sqrt{3 \cdot \bar{S}_2^2 + \sigma_0 \left[\exp\left(\frac{-k \cdot S_1}{\sigma_0}\right) - 1 \right]} = 0 \quad (1.14)$$

unde k este o funcție de densitatea relativă, evaluată experimental pornind de la solicitarea la compresiune a pulberii de cupru :

$$k = 0.16 \left[\frac{1}{1 - \rho_r} - 1 \right] \quad (1.15)$$

DORAIVELU și colectivul (1984) au propus un criteriu de plasticitate de aceeași formă pentru materiale poroase, omogene și izotrope, considerând mediul poros ca fiind un mediu continuu :

$$2 \cdot (1 + \nu) \cdot \bar{S}_2^2 + \frac{1 - 2 \cdot \nu}{3} \cdot S_1^2 = \sigma_p^2 \quad (1.16)$$

ν = coeficientul lui Poisson.

Pentru $\nu = 0.5$ (incompresibilitate) se regăsește criteriul lui Von Mises pentru materiale solide. Autorii propun $\nu = 0.5 \rho^n$ și $n = 2$ pentru pulberi sinterizate, sau presate la cald, ceea ce duce la :

$$(2 + \rho^2) \bar{S}_2^2 + \frac{1 - \rho^2}{3} \cdot S_1^2 = \sigma_p^2 \quad (1.17)$$

Figura (1.7) prezintă suprafețele de plasticitate care corespund criteriului de mai sus, cât și rezultatele încercărilor de compresiune.

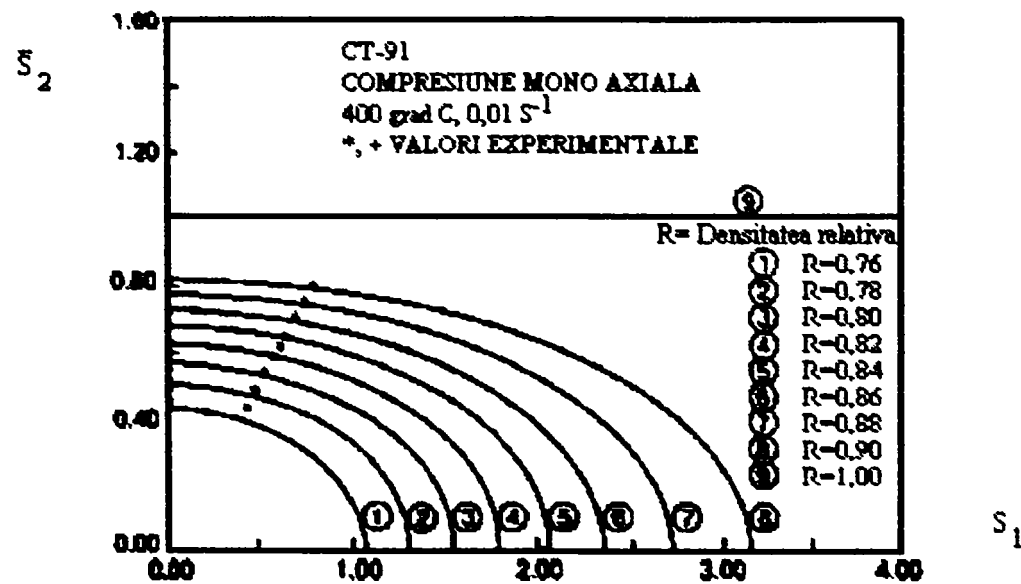


Fig. 1.7. Suprafețele de plasticitate ale lui Doraivelu.

JON JIN PARK (1995) găsește o relație între coeficienții A și B ai modelului (I.11) pe care îi consideră dependenți de material, fiind funcții de coeficientul lui Poisson :

$$B = 1 - \frac{A}{3} \quad (I.18)$$

J.J. Park propune un criteriu de aceeași formă cu (I.11), ținând cont de parametrul δ propus de Shima – Oyane (1976) :

$$(2 + 2\nu) \cdot \bar{S}_2^2 + \frac{1 - 2\nu}{3} \cdot S_1^2 = \sigma_p^2 = \frac{1.44 \rho^5}{2.44 - \rho} \cdot \sigma_0^2 \quad (I.19)$$

Legea normalității este luată în considerare.

J.J.Park a verificat experimental valabilitatea modelului prin încercări de compresiune uniaxială și prin încercări de compresiune hidrostatică efectuate pe o pulbere sinterizată de Al-2024 și prin încercări de compresiune simplă a unor corpuri din fier sinterizat.

Pornind de la încercările în celulă triaxială ale lui Shima – Oyane, HWANG și KOBAYASHI au fost primii care au propus, în 1990, decalarea suprafețelor eliptice ale lui Shima către partea de compresiune a axei hidrostatice (Fig.I.8).

Modelele tip Shima – Oyane au fost aplicate de numeroși cercetători în diverse cazuri : la forjarea unor prefabricate sinterizate (Im și Kobayashi), la pulberi ceramice (Mori), la simularea comprimării pieselor cilindrice cu umeri (Hwang și Kobayashi).

I.1.5. Modelul lui Gurson

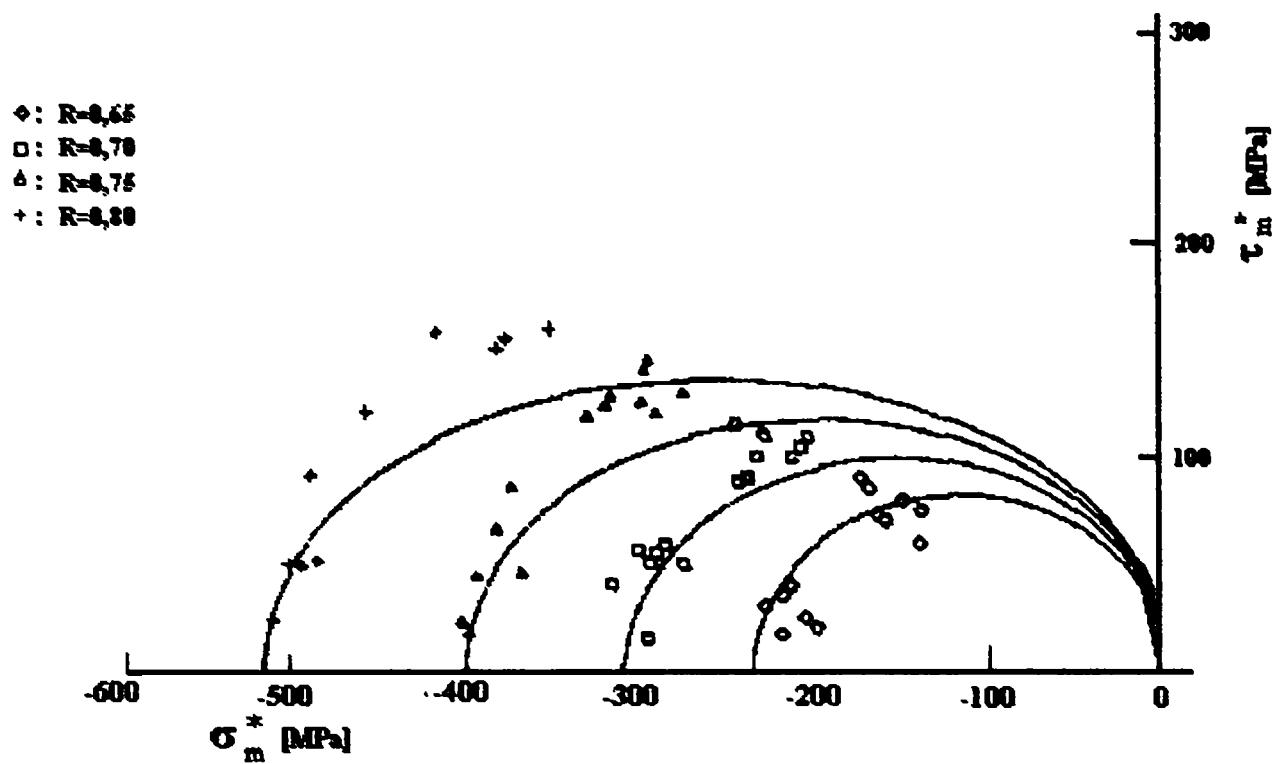


Fig.1.8. Suprafețele de plasticitate propuse de Hwang și Kobayashi.

$$(\sigma_m^* = S_1 / 3\sqrt{3}, \tau^* = \bar{S}_2, R = \rho_r).$$

GURSON (1977) consideră materialul metalic ca fiind constituit dintr-un ansamblu de celule elementare ideale pe care inițial le aproximează prin cuburi dintr-un material rigid – perfect plastic care prezintă în centrul lor niște cavități sferice. Apoi, din motive de simplitate, Gurson aproximează celulele elementare prin sfere cu pereți groși. Criteriul de plasticitate este de forma :

$$f = \frac{3\bar{S}_2^2}{\sigma_0^2} + 2\eta \cosh\left(\frac{S_1}{2\sigma_0}\right) - \eta^2 - 1 = 0 \quad (1.20)$$

unde $\eta = (1 - \rho_r)$ desemnează porozitatea materialului.

Dacă $\rho_r = 1$, porozitatea este absentă și se regăsește criteriul lui Von Mises.

Gurson utilizează o lege de curgere asociată.

Suprafețele de plasticitate sunt redată în Fig.1.9.

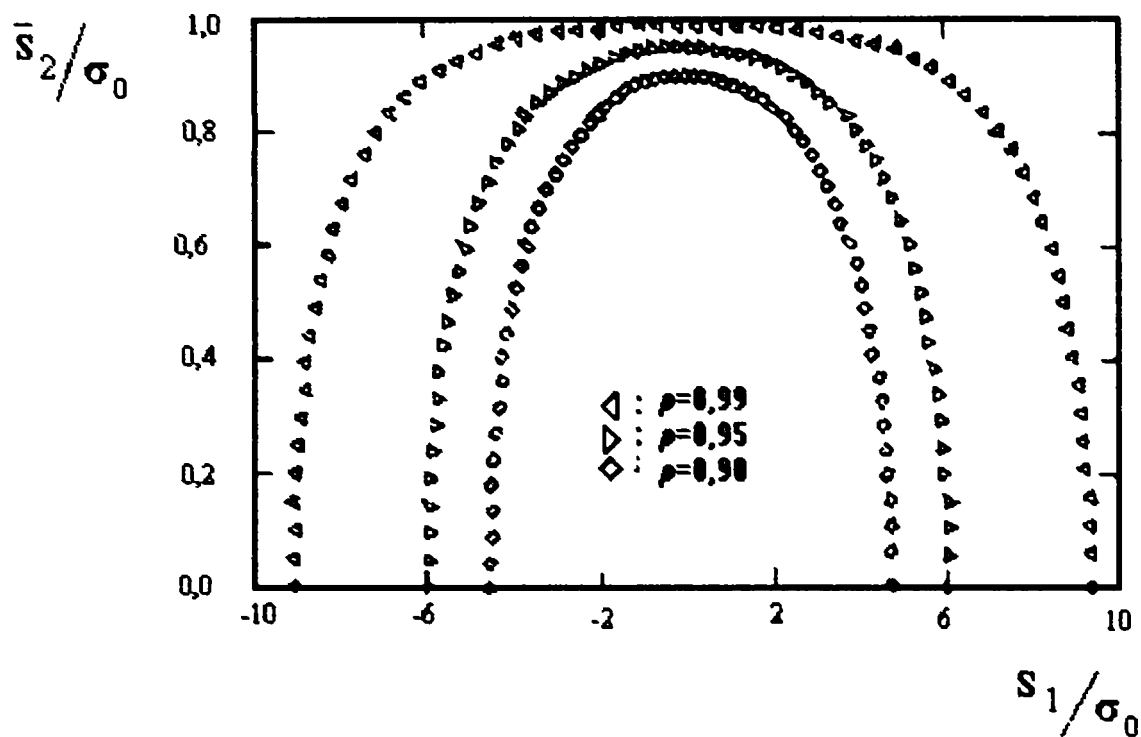


Fig.1.9. Suprafețele de plasticitate ale lui Gurson.

1.1.6. Variante ale modelului lui Gurson

TVERGAARD și NEEDLEMAN (1984) au introdus constante în criteriul lui Gurson, obținând :

$$f = \frac{3\bar{S}_2^2}{\sigma_0^2} + 2q_1\eta^* \cosh\left[\frac{q_2 S_1}{2\sigma_0}\right] - (q_1\eta^*)^2 - 1 = 0 \quad (1.21)$$

unde q_1 și q_2 sunt constante ;

η^* - funcție referitoare la coalescența cavităților.

Dezvoltarea funcției cosinus hiperbolic a condus la o formă a acestui criteriu anlogă criteriului lui Green(a se vedea relația 1.4), cu :

$$c_G = \frac{1}{(1 - q_1\eta^*)^2}; \quad f_G = \frac{q_1 q_2^2 \eta^*}{4(1 - q_1\eta^*)^2} \quad (1.22)$$

Pentru $p_r = 1$, $\eta = \eta^* = (1 - p_r) = 0$, se regăsesc $c_g = 1$ și $f_G = 0$.BINNER și SPITZIG (1990) au introdus în criteriul lui Gurson un termen care materializează

presiunea internă asupra porilor, ceea ce conduce la forma următoare pentru criteriu :

$$f = \frac{3\bar{S}_2^2}{\sigma_0^2} + 2\eta \cosh\left[\frac{S_1 - S_1^i}{2\sigma_0}\right] - \eta^2 - 1 = 0 \quad (1.23)$$

cu : $S_1^i = -3p^i = -3\left(\frac{\eta_0}{\eta}\right)p_0^i$;

η_0 = porozitatea inițială ;

p_0^i = presiunea internă inițială ;

p^i = presiunea internă curentă.

În această formă, modelul lui Gurson reproduce în mod fidel densificarea hidrostatică a pulberii de fier sinterizată.

GOYA și colectivul (1992) propun să se țină cont de anizotropia materialului poros, considerând porii eliptici și pornesc de la ideea unui ansamblu de celule de bază hexagonale. Această tentativă conduce la un criteriu de tip Green în care un tensor suplimentar pentru "efectul formei" traduce evoluția formei porilor.

Modelul lui Gurson dă rezultate apropiate de experiență pentru încărcări proporționale ; predicțiile modelului lui Tvergaard sunt în acord cu rezultatele încercărilor de tracțiune triaxială.

1.1.7. Concluzie

Modelele de tip "metal poros" se dovedesc suficient de precise pentru a descrie comportamentul pulberilor sinterizate, materiale a căror porozitate se datorează existenței cavităților în cadrul unei matrice de bază.

În schimb, aceste modele nu pot descrie comportamentul pulberilor comprimate la temperatura ambiantă, (nesinterizate) care păstrează caracterul de mediu granular ale cărui particule rămân individualizate.

I.2.MODELE DIN MECANICA SOLURILOR

I.2.1. Criteriul tip curbă intrinsecă

Criteriul de ruptura MOHR-COULOMB este dat de relația 1.24 :

$$f(\sigma) = \sigma_1 - \sigma_3 + (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi - 2 \cdot C \cos \varphi \quad (1.24)$$

C = coeziune ;

φ = unghi de frecare ;

f = învelitoare reală a cercurilor limită ale lui Mohr, de rază $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, pentru

care criteriul lui Coulomb este o formă liniară particulară.

În spațiul tensiunilor principale, criteriul lui Mohr - Coulomb are forma unei piramide hexagonale (fig .I.10).

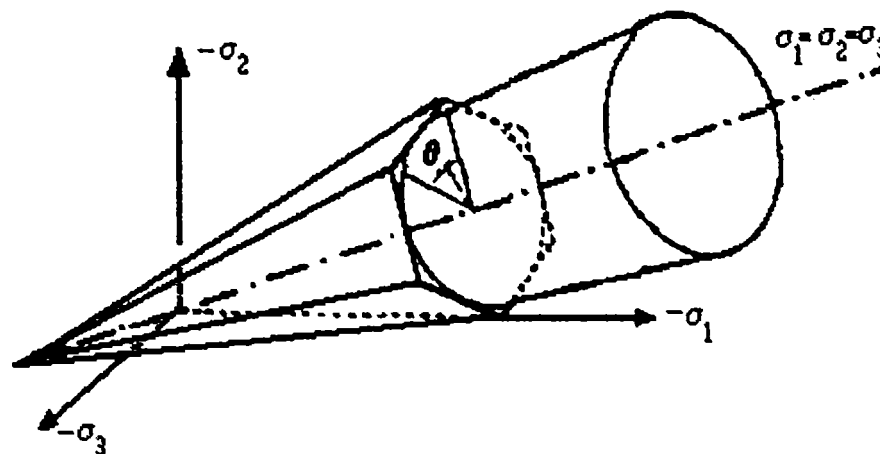


Fig.I.10. Reprezentare tridimensională a criteriilor Mohr-Coulomb și Drucker-Prager.

I.2.2. Criteriul de plasticitate perfectă al lui Drucker-Prager

$$f = \bar{S}_2 - \alpha S_1 - k = 0 \quad (1.25)$$

α, k = parametri dependenți de unghiul de frecare internă.

Dacă $\alpha = 0$, criteriul ia forma criteriului lui Von Mises, dacă se consideră că tensiunea de curgere uniaxială a materialelor dense are ca echivalent unghiul de frecare internă la materialele granulare.

Legea de curgere este asociată.

Criteriul Drucker-Prager este reprezentat în spațiul tensiunilor principale printr-un con având axa hidrostatică drept axă (fig.1.10). Suprafețele obținute prin secționarea piramidei lui Mohr-Coulomb și a conului lui Drucker-Prager cu planul octaedric se măresc cu creșterea presiunii.

1.2.3. Modelele Cam-clay

Modelele Cam-clay și Cam-clay modificat se bazează pe ipoteza stării critice, caracterizată prin volum constant și un raport tensiune deviatoare pe tensiune medie constant, spre care tinde un element de sol supus unei deformații deviatoare crescătoare. Teoria stării critice a fost propusă la Universitatea din Cambridge, de către ROSCOE, SHOFFIELD și WROTH (1968).

Modelul Cam-clay inițial (1.11.a) este asociat și utilizează o suprafață de plasticitate de forma :

$$f = \frac{q}{Mp} + \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = 0 \quad (1.26)$$

unde $p = \frac{S_1}{3} = \frac{\sigma_{kk}}{3}$;

și $q = \sqrt{\frac{3}{2}} \bar{S}_2 = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_{ij} \sigma_{ij}$;

iar p_0 = parametru de ecrusare ;

M = coeficient de frecare internă a materialului.

Starile critice sunt reprezentate prin vârfurile fiecăreia din suprafețe, aliniate pe dreapta de pantă M .

Modelul Cam-clay inițial a fost modificat pentru ca suprafețele de plasticitate să intersecteze axa hidrostatică după o direcție perpendiculară pe aceasta, ceea ce face ca la un increment de presiune izotropă să corespundă o deformare izotropă ; Cam-clay devine astfel Cam-clay modificat (fig. I.11.b), de ecuație :

$$f = \frac{q^2}{M^2 p} + p - p_0 = 0 \quad (1.27)$$

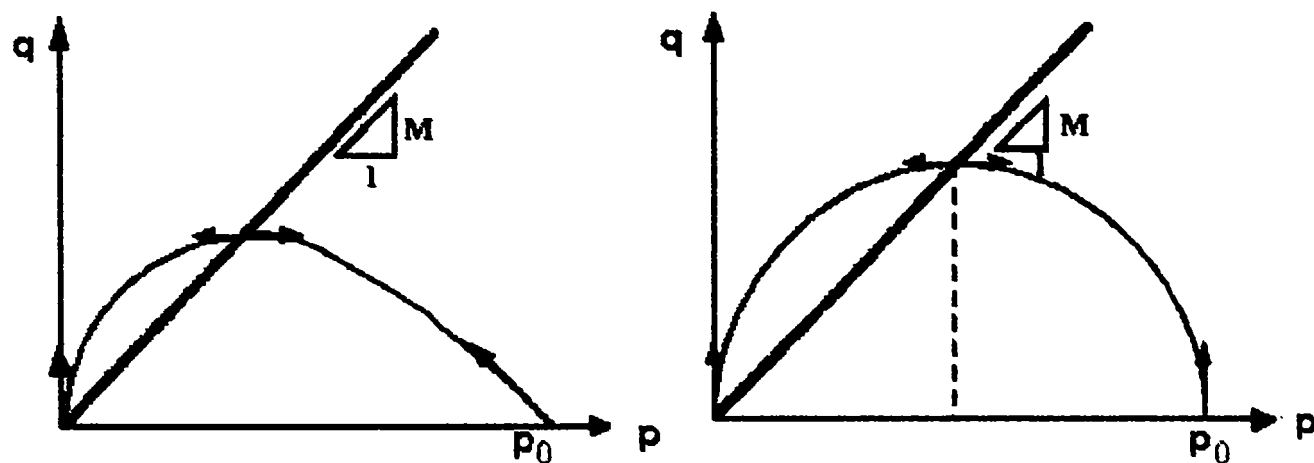


Fig.I.11. Modelele Cam-clay inițial (stânga) și modificat (dreapta).

I.2.4. Modelul lui Nova, "Sinfonietta classica"

"Sinfonietta classica" este un model neasociat, cu ecrisare în deformare elastoplastică, obținut ca urmare a unei combinații între suprafața de plasticitate tip Cam-clay și suprafața de ruptură propusă de MATSUOKA și NAKAI (1974).

Ecuația suprafeței de plasticitate are următoarea formă (Fig.I.12):

$$f = 3 \cdot \beta \cdot (\gamma - 3) \cdot \ln \frac{p'}{p_c} - \gamma \cdot J_{3\eta} + \frac{9}{4} (\gamma - 1) \cdot J_{2\eta} = 0 \quad (1.28)$$

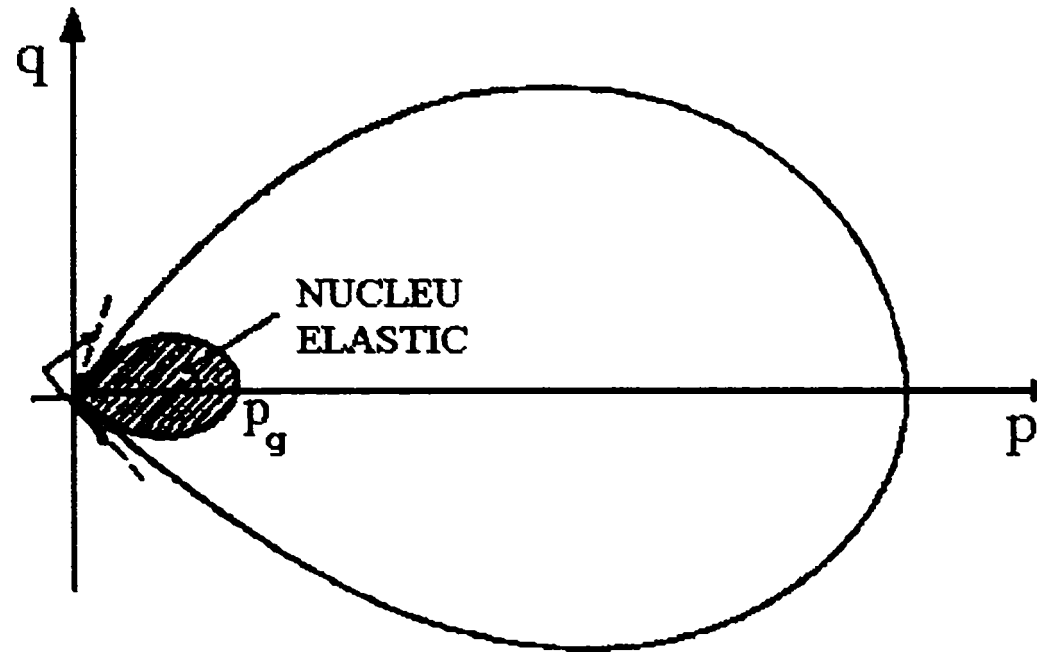


Fig.I.12. Suprafața de plasticitate și nucleul inițial elastic.

cu :

γ = parametru constitutiv, funcție de starea critică M ;

p' = presiunea medie ;

$J_{2\eta} = \eta_{ij} \eta_{ij}$;

$J_{3\eta} = \eta_{ij} \eta_{ik} \eta_{ki}$, și

$\eta_{ij} = \frac{s_{ij}}{p'}$;

unde s_{ij} = tensiune deviatoare efectivă ;

p' = funcție de istoria deformației plastice a materialului.

Se presupune existența unui nucleu elastic inițial. În interiorul nucleului materialul are un comportament elastic.

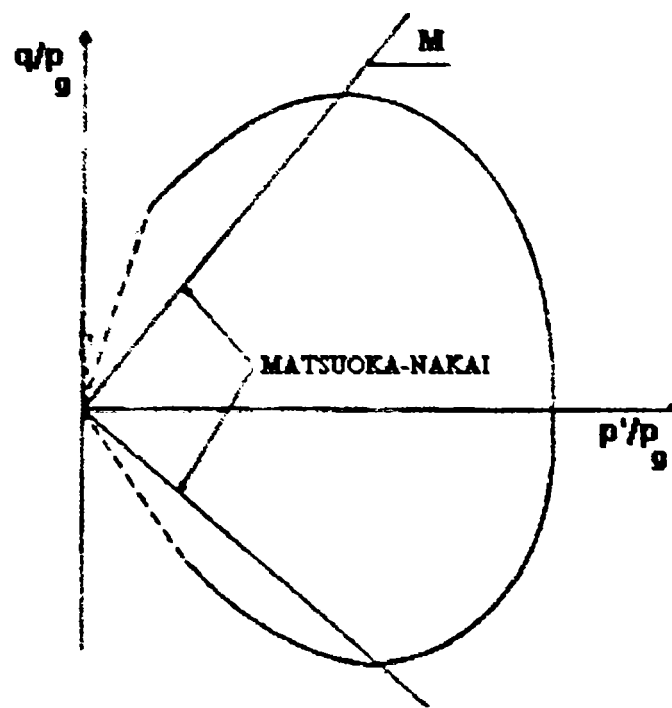


Fig.I.13. Potențial plastic.

Potențialul plastic este dat de relația următoare :

$$g = 9 \cdot (\gamma - 3) \cdot \ln \frac{p'}{p_g} - \gamma \cdot J_{3\eta} + \frac{9}{4} (\gamma - 1) \cdot J_{2\eta} = 0 \quad (I.29)$$

unde p_g este o constantă care reprezintă abscisa punctului de intersecție dintre potențialul plastic (Fig.I.13) și axa hidrostatică.

Modelul lui Nova este simplu ; parametrii săi se pot determina pe baza încercărilor experimentale și prezintă avantajul compatibilității cu codurile de element finit.

1.2.5. Modele care țin cont de al treilea invariant al tensorului deviator

Modelul lui DESAI & HASMI

Atunci când comportamentul materialelor granulare poate fi descris numai în funcție de tensiunea medie σ_m și de al doilea invariant al deviatorului tensorului tensiunilor \bar{S}_2 , suprafețele de plasticitate sunt reprezentate de cercuri situate în planul deviator. Când comportamentul materialului este influențat de cel de-al treilea invariant al tensorului deviator, \bar{S}_3 , al doilea invariant al tensorului deviator variază cu unghiul lui Lode ϕ , și suprafața de plasticitate devine triunghiulară (Fig.1.14). ϕ este dat de una din relațiile 1.30:

$$\cos 3\phi = \sqrt{6} \left(\frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2} \right)^3 \quad (1.30)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2}{\sqrt{3} \cdot \bar{\sigma}_2} \text{ presupunând } \sigma_3 > \sigma_1 \text{ et } \sigma_3 > \sigma_2.$$

Acest unghi reprezintă într-un reper polar din planul deviator orientarea vectorului care leagă originea reperului de punctul reprezentativ al stării de tensiune.

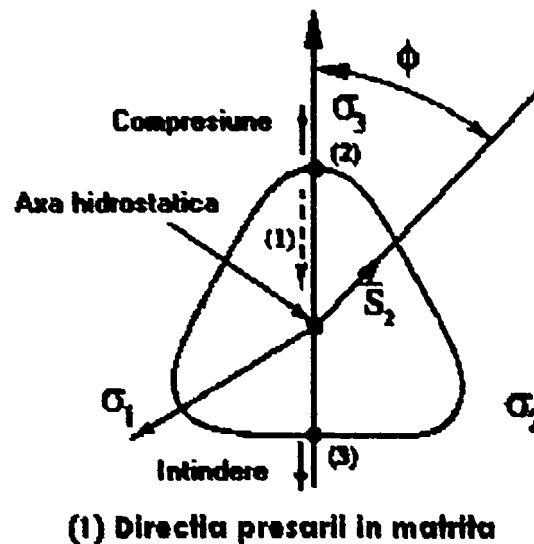


Fig.1.14. Exemplu de suprafață de plasticitate cu influența lui \bar{S}_3 .

Modelul DESAI & HASHMI (1989) neasociat, cu ecrusare, este destinat materialelor geologice. Ecuația suprafeței de plasticitate prezentată în figura I.15 este dată de :

$$F = \bar{S}_2^2 - \left(-\alpha \cdot S_1^n + \gamma \cdot S_1^2 \right) \cdot (1 - \beta \cdot S_r)^m = 0 \quad (I.31)$$

și potențialul plastic este $Q = F + h$;

γ, β, m – constante asociate ultimei suprafețe de plasticitate;

n = constantă asociată tranziției contractanță - dilatantă;

α = funcție de ecrusare;

h = funcție de corecție;

$$S_r = \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2}$$

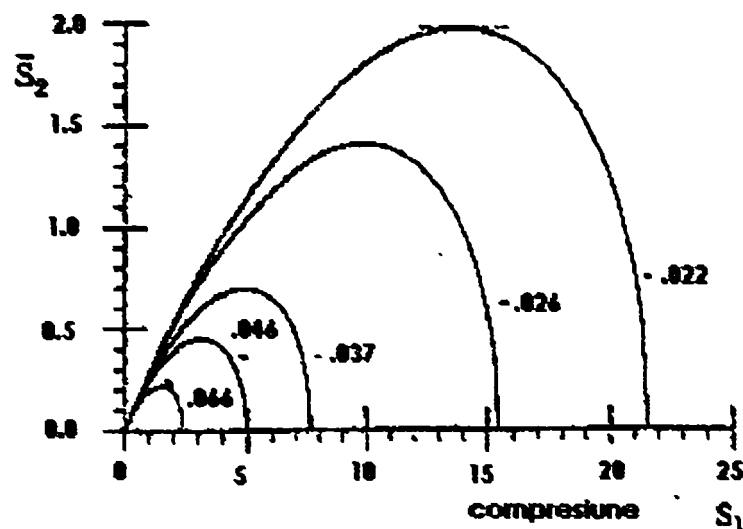


Fig.I.15. Suprafețele de plasticitate ale lui Desai & Hashmi.

Pentru pulberile metalice, $S_r = \text{constant}$ (nu există schimbare de fază) ; termenul $(1 - \beta S_r)$ se regăsește în celelalte constante ale criteriului, care devine:

$$F = \bar{S}_2^2 - \gamma \cdot S_1^2 + \alpha \cdot S_1^n = 0 \quad (I.32)$$

MOSBAH și colectivul (1997) au studiat experimental influența celui de-al treilea invariant al tensorului deviator al tensiunilor (\bar{S}_3) asupra comportamentului unei pulberi de fier propusă în programul internațional de studiu al pulberilor comprimate la temperatura ambiantă (HAGGBLAD & al, 1996),. Pulberea de fier a fost solicitată la compresiune izotropă și triaxială, axial simetrică și nesimetrică. Curbele experimentale ale izodensităților nu sunt circulare în planul deviator și ar putea depinde de unghiul ϕ care indică influența celui de-al treilea invariant.

Autorii remarcă dispersia rezultatelor încercărilor și își propun reluarea încercărilor pentru a confirma concluzia de mai sus.

1.2.6. Cap model

DIMAGGIO și SANDLER (1971) au înlocuit linia de ruptură propusă de Drucker-Prager cu un criteriu de plasticitate perfectă (suprafață de ruptură) care mărginește domeniul elastic și asigură trecerea progresivă între acesta și criteriul lui Von Mises ; ei adaugă un "cap" (în general o parte dintr-o elipsă) depinzând de deformația plastică volumică ϵ_V^P (variabila de ecrusare).

Modelul este deci compus din doua funcții (Fig.1.16) :

$$f_1(S_1, \bar{S}_2) = 0 \text{ - învelitoare de ruptură} \tag{1.33}$$

$$f_2(S_1, \bar{S}_2, \epsilon_V^P) = 0 \text{ - cap}$$

Cele doua legi sunt asociate și permit descompunerea mecanismelor de deformație volumică; învelitoarea de ruptură este o suprafață fixă, nu depinde de coeficientul de ecrusare și nu poate descrie decât fenomenul de dilatanță; mișcarea capului este comandată de densitatea materialului.

Dimaggio și Sandler au propus un cap eliptic care are o tangentă orizontală în punctul de intersecție cu învelitoarea; în acest punct, vectorul increment de deformare plastică nu suferă o rotație bruscă ci o tranziție progresivă.

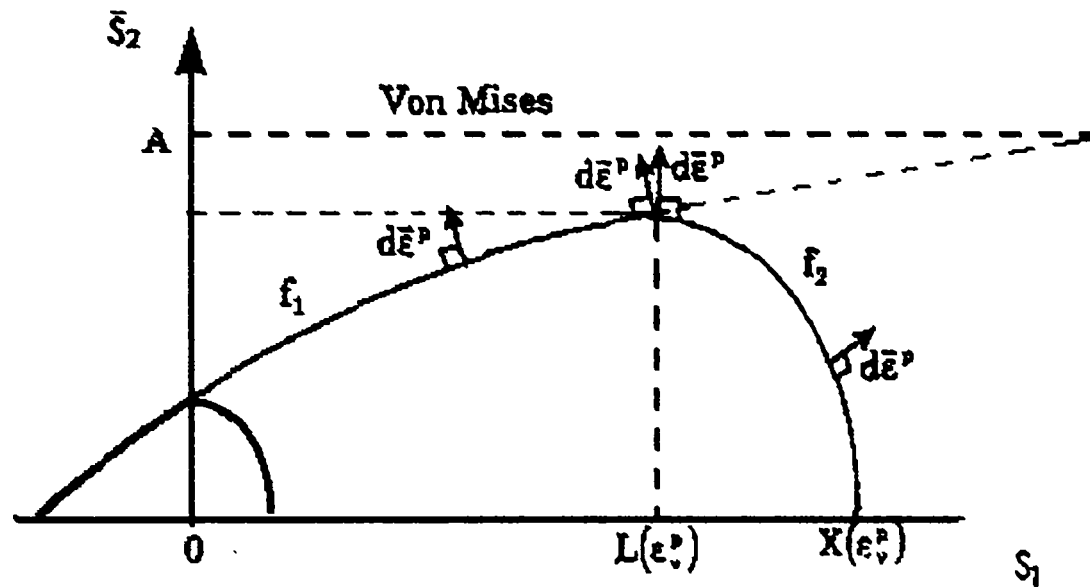


Fig.1.16. Cap modelul lui Dimaggio și Sandler.

FARUQUE (1987) propune o extensie a cap modelului lui Dimaggio și Sandler, a cărei formulare include al treilea invariant al tensorului deviator al tensorului tensiunilor, care caracterizează schimbarea de formă a învelitorii de rupură cu variația presiunii. Ecuația învelitorii de rupură este dată de :

$$f_1 = g(\theta, S_1) \cdot \bar{S}_2 - A - M \cdot S_1 + C \cdot \exp(-B \cdot S_1) = 0 \quad (1.34)$$

unde : $g(\theta, S_1)$ = funcție scalară care guvernează forma învelitorii de rupură în planul octaedric;

θ = unghiul lui Lode, funcție de al treilea invariant al tensorului deviator (\bar{S}_3) ;

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{3 \cdot \sqrt{3} \bar{S}_3}{2 (\bar{S}_2)^{3/2}} \right] \quad (1.35)$$

A,B,C,M – parametri.

Cap modelul eliptic propus de Faruque are expresia următoare:

$$f_2 = g(\theta, L) \cdot \bar{S}_2 - \sqrt{b^2 - (S_1 - L)^2} / R^2 = 0 \quad (1.36)$$

unde: L = valoarea lui S_1 pentru care capul intersectează învelitoarea;

$$b = A + M L - C \exp(-B L);$$

R = parametru;

$$g(\theta, L) = g(\theta, S_1), \text{ când } S_1 = L.$$

Modelul lui Faruque este prezentat în figura I.17.

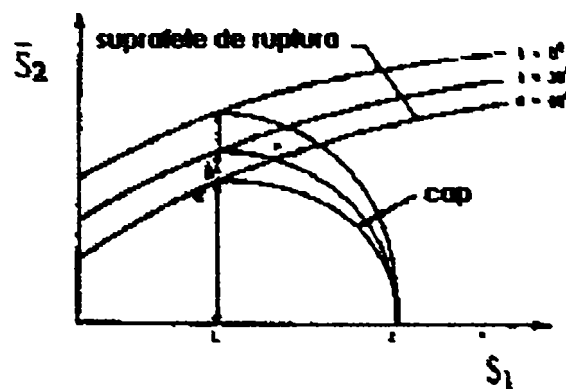


Fig.I.17. Modelul lui Faruque.

TRASORAS & al. au utilizat un cap model apropiat de cel al lui Faruque, pe care l-au implantat într-un cod de elemente finite propus de către SIMO & al. În vederea modelării compresiunii la temperatura ambiantă, în matriță, a unei pulberi de tungsten. Rezultatele simulării comprimării pulberii în matriță cilindrică, respectiv cu secțiune T sunt în concordanță cu experiența.

Inconvenientul major al modelelor cap este prezența discontinuității în punctul de întâlnire dintre cap și suprafața de ruptură unde vectorul increment de deformație plastică nu are o orientare unică după cum ne situăm pe linia de ruptură sau pe cap.

Aceste modele prevăd o rezistență la întindere izotropă pentru toate densitățile și o rezistență la compresiunea simplă independentă de densitate, ceea ce nu s-a verificat experimental.

SANDLER și RUBIN (1979) au folosit un cap model ca și cele prezentate până aici, căruia i-au adăugat o a treia suprafață de rupătură care limitează stările de întindere (a se vedea figura 1.18).

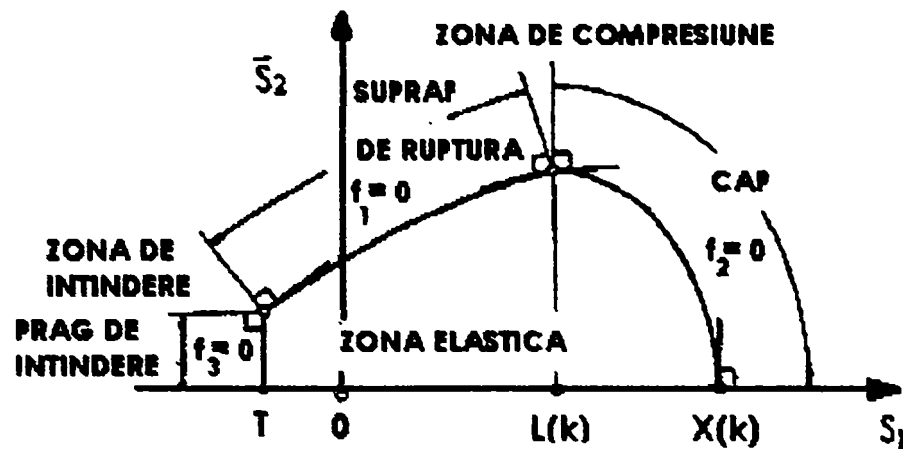


Fig.1.18. Cap model propus de Sandler și Rubin.

1.2.7. Modele cu două mecanisme

LADE (1977) propune un model care presupune existența a două mecanisme: densificarea și dilatanța. Invelitoarea de rupătură este compusă dintr-o familie de suprafețe – învelitori ecrisabile, cărora le este asociat mecanismul de dilatanță; suprafețele de tip cap, sferice, sunt asociate mecanismului de densificare (Fig.1.19). Pentru ambele tipuri de suprafețe, parametrul de ecrisare este densitatea relativă.

Criteriul de curgere corespunzător mecanismului de densificare este dat de:

$$f_c = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (1.40)$$

Legea de curgere este asociată.

Criteriul de curgere corespunzător mecanismului de dilatanță este dat de :

$$f_p = \left(\frac{S_1^3}{S_3} - 27 \right) \cdot S_1^m \quad (1.41)$$

cu $S_3 = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3$.

Legea de curgere este neasociată, cu potențialul plastic g_p :

$$g_p = S_1^3 - \left[27 + \eta_2 \left(\frac{1}{S_1} \right)^m \right] S_3 \quad (1.42)$$

unde η_2 = parametru obținut pe baza unor încercări de compresiune triaxială.

VERMEER (1978) a stabilit un model elastoplastic cu două mecanisme pentru a descrie comportamentul nisipului.

Mecanismul de forfecare este descris de către funcția Y_1 (Fig.I.20) :

$$f_c = \frac{\sqrt{3}S_2}{S_1/3} - H^{-1} \cdot \left[k_1 \cdot \left(\frac{p_0}{S_1/3} \right)^\beta \right] = 0 \quad (1.43)$$

H este o funcție ce se determină pe baza încercărilor experimentale;

p_0 = constantă cu dimensiuni de tensiune, introdusă pentru ca funcția H să devină adimensională;

k_1 – parametru de ecrusare;

β - constantă experimentală.

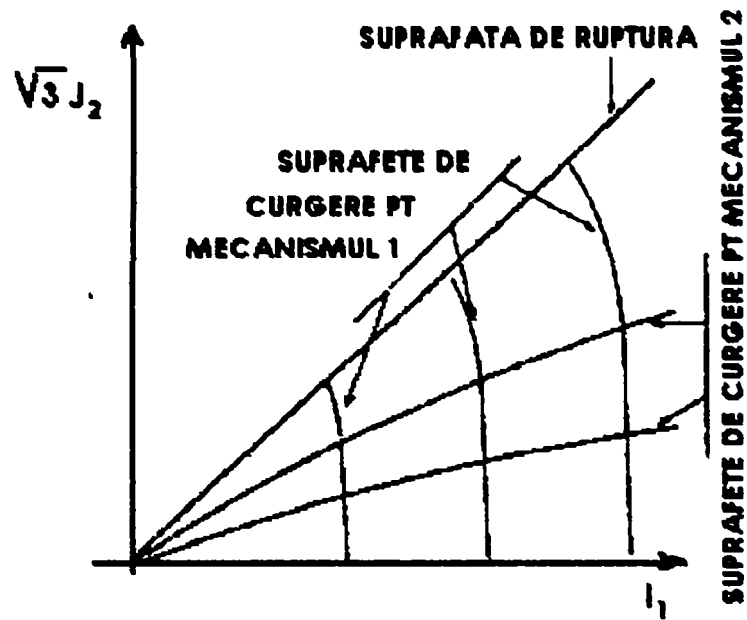


Fig.I.19. Modelul cu dublu potențial al lui Lade ($I_1 = S_1$ et $J_2 = \bar{S}_2$).

Legea de curgere utilizată este furnizată de ecuația tensiune – dilatantă a lui ROWE (1962, 1971) și nu este asociată.

Pe suprafețele de forfecare expresia matematică este în acord cu datele experimentale .

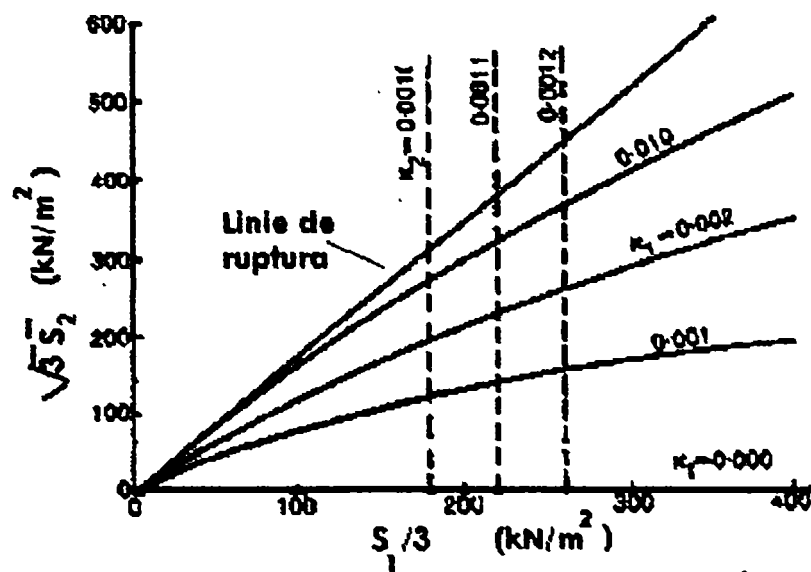


Fig. I.20. Suprafețe de forfecare.

Mecanismul volumic (lege asociată) este descris de:

$$f_v = \alpha \left(\frac{S_1/3}{p_0} \right)^B - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1.44)$$

α - constantă experimentală;

ε_v^p - deformația volumică plastică.

1.2.8. Luarea în considerare a anizotropiei

SHIMA și SALEH (1992) au remarcat anizotropia indusă în probe de pulbere ceramică solicitată la compresiune în matriță care ulterior au fost supuse compresiunii izostatice la temperatura ambiantă. Criteriile propuse de Shima și colaboratorii nu pot să descrie comportamentul acestor pulberi presate. Autorii au introdus ecruisarea cinematică pentru a ține cont de anizotropie, înlocuind în criteriul (1.7) σ_{ij} prin $\sigma_{ij} - \alpha_{ij}$, α_{ij} fiind tensiunea inversă. Apoi, modificând modelul de ecruisare cinematică al lui PRAGER (1995), și pe cel al lui ZIEGLER (1959), au obținut suprafețe de încărcare proporționale cu p^n , (n – parametru în 1.7). Criteriul astfel modificat a fost introdus într-un program de element finit pentru a efectua o analiză. Rezultatele simulării au arătat că ecruisarea cinematică descrie efectul anizotropiei induse.

De asemenea, KUMBHOJKAR și BANERJEE (1993) au propus a se ține seama de anizotropia inițială prin intermediul unui tensor care să reprezinte memoria tensiunilor corespunzătoare deformației plastice pe care solul o are deja; alegerea unui mecanism de ecruisare particular le-a permis să introducă anizotropia indusă odată cu deformarea plastică a materialului.

1.2.9. Modele de plasticitate avansată

1.2.9.1. Modele multisuprafețe

MROZ (1967) propune o familie de suprafețe de plasticitate învelite una într-alta, cu un nucleu elastic. Nucleul elastic este suprafața care conține stările de tensiune pentru care comportamentul materialului este elastic ; în cazul în care comportamentul este plastic, nucleul se reduce la un punct.

Bazându-se pe aceeași idee, PREVOST (1978) dezvoltă un model multisuprafețe pentru soluri.

Ecrusarea este descrisă printr-un ansamblu de module plastice corespunzătoare suprafețelor de plasticitate care sunt situate una într-alta. Fiecare modul este constant pentru suprafața care îi corespunde.

În spațiul tensiunilor, suprafețele sunt elipsoizi cu axa mare coaxială inițial cu axa hidrostatică (pentru un material inițial izotrop). (Fig. 1.21).

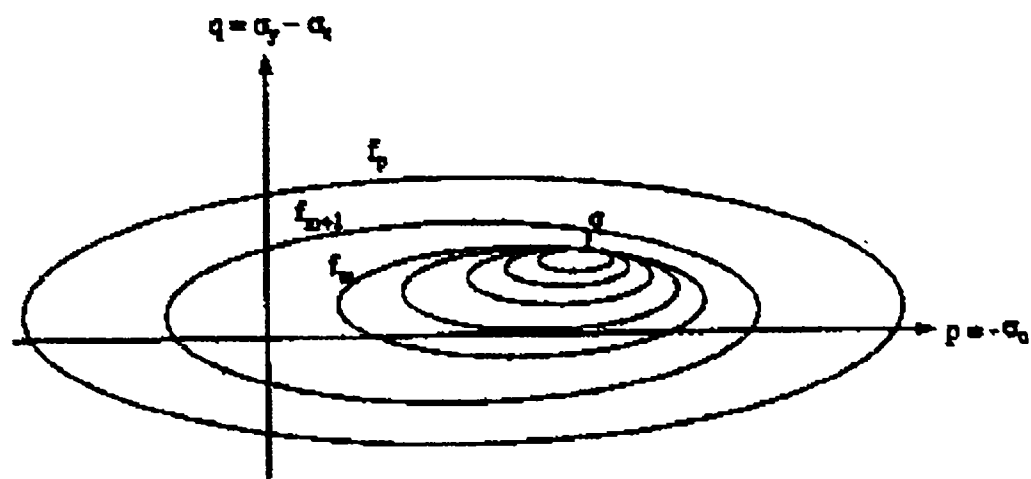


Fig.1.21. Model multisuprafețe.

Suprafața f_m este dată de ecuația :

$$f_m = 3/2(\bar{S}_2 - \alpha^{(m)}):(s - \alpha^{(m)}) + c^2 (\sigma - \beta^{(m)})^2 - (k^{(m)})^2 = 0 \quad (1.45)$$

unde: σ = tensiune normală principală;

$\alpha^{(m)}$ = centrul de coordonate al suprafeței f_m în spațiul deviator;

$\beta^{(m)}$ = centrul de coordonate al suprafeței f_m de-a lungul axei σ ;

c = raportul axelor suprafeței f_m ;

$k^{(m)}$ = raza suprafeței f_m .

Suprafața exterioară poate corespunde unei limite de rupătură; suprafața interioară închide domeniul elastic inițial.

Când o stare de tensiune este situată pe o suprafață f_m , toate suprafețele interioare sunt tangente la f_m . Dacă se aplică un increment de tensiune pornind dintr-un punct de tangență, punctul se va deplasa pe suprafața următoare și mișcarea va fi însoțită de mișcarea ansamblului de suprafețe tangente. Mișcarea suprafețelor echivalează cu un mecanism de ecrusare cinematică.

Legea de curgere corespunzătoare acestor modele este asociată.

HAGGBLAD și McEWAN (1992) au implantat modelul lui Prevost în două coduri de element finit și au simulat compresiunea în matriță cilindrică; simularea arată superioritatea codului implicit față de cel explicit din punct de vedere al timpului de calcul.

KRIEG (1975) propune modelul cu suprafață frontieră $F = 0$, care reprezintă memoria deformațiilor plastice pe care le-a cunoscut materialul; această suprafață este echivalenta suprafeței de plasticitate din teoria clasică, cu ecrusare izotropă.

O a doua suprafață de plasticitate, $f = 0$, definește în interiorul suprafeței frontieră domeniul elastic și se poate translata după același mecanism care caracterizează modelele multisuprafețe (devenind tangentă la suprafața frontieră).

Dacă se produce o descărcare – reîncărcare, suprafața de plasticitate se poate deplasa, în timp ce suprafața frontieră rămâne imobilă.

Modulul de ecrusare are o valoare interpolată, în funcție de distanța care separă punctul de pe suprafața de încărcare de conjugatul său de pe suprafața frontieră.

I.2.9.2. Modele endocronice

VALANIS (1971) a fost primul care a propus un model endocronic care se caracterizează prin absența suprafeței de plasticitate și în care intervine un pseudo – timp dependent de istoria de deformăției materialului. Tensiunile se determină în funcție de deformații, raportate la scara de timp aleasă.

HAGGBLAD a modificat modelul endocronic pentru betoane de Bazant, pentru a-l face aplicabil în cazul pulberilor metalice. Rezultatele obținute sunt în concordanță cu încercările experimentale; inconvenientul modelului constă în numărul mare de parametri, de ordinul zecilor, (dintre care mulți n-au semnificație fizică), parametri legați de existența a numeroase funcții de ecruisare.

I.2.9.3. Hipoelasticitate

TRUESDALL (1955) definește formularea hipoelastică utilizând derivata obiectivă a tensorului tensiunilor în scopul de a lega cele două comportamente ideale, elastic și perfect plastic, căutând o lege de comportament care să poată ține cont de trecerea continuă de la starea elastică la starea plastică.

Pentru prima oară, Stutz (1972) aplică această formulare hipoelastică pentru a descrie comportamentul materialelor pulverulente.

I.2.10. Concluzie

Modelele provenite din mecanica solurilor par adaptate pentru a descrie comportamentul pulberilor comprimate la temperatura ambiantă.

I.3. MODELE PENTRU PULBERI COMPRIMATE LA TEMPERATURA AMBIANTA

I.3.1. Modelul lui Fleck & al.

FLECK & al. (1992) au dezvoltat o lege constitutivă pentru a descrie curgerea plastică a unei aglomerări de particule metalice sferice; autorii au considerat că particulele au puncte de contact izolate și că în vecinătatea acestor puncte apare curgerea plastică. Aglomerarea de particule este considerată omogenă și izotropă, și rezultatele sunt considerate valide pentru densități de 60 % până la 90 % din valoarea densității maxime teoretice. Pornind de la scara microscopică spre scara macroscopică, ei propun funcția de curgere următoare pentru pulberea comprimată:

$$\phi = 5 \left[\frac{S_1/3}{\sigma_0} \right]^2 + \frac{1}{9} \left[\frac{5\sigma_e}{2\sigma_0} + 4 \cdot B \right]^2 - 4 \cdot B^2 = 0 \quad (1.46)$$

unde: σ_0 este tensiunea uniaxială de curgere a materialului dens și depinde de deformația plastică locală;

σ_e = tensiunea echivalentă;

și B este o funcție de densitatea relativă inițială (ρ_0) a pulberii comprimate:

$$B = \frac{9 \rho^2 \cdot (\rho - \rho_0)}{2 \cdot (1 - \rho_0)}$$

Figura I.22 prezintă suprafața de curgere propusă de Fleck & al. în coordonate Σ / p_y (Σ = măsură a tensiunii deviatoare) și Σ_m / p_y ($\Sigma_m = S_1 / 3$); - p_y este presiunea macroscopică care produce curgerea plastică, propusă de către Helle & al. (1985).

GOVINDARAJAN și ARAVAS (1993) au utilizat metode analitice și numerice pentru a analiza compresiunea izostatică la temperatura ambiantă a pulberilor metalice. Comportamentul elastoplastic al pulberilor a fost descris

cu ajutorul modelului constitutiv al lui Fleck & al., care a fost introdus în codul de element finit ABAQUS. Ecuațiile constitutive au fost integrate utilizând metoda lui Euler. Autorii au simulat compresiunea izostatică la temperatura ambiantă a unei pulberi de titan. Rezultatele simulării sunt în concordanță cu datele experimentale.

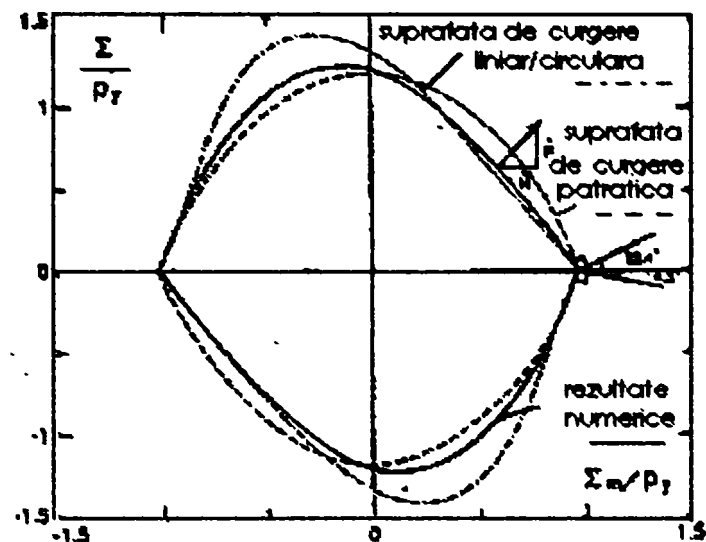


Fig. 1.22. Suprafețele lui Fleck ($\Sigma_m = S_1 / 3$, $\Sigma = \sqrt{\frac{3}{2} S_2}$).

1.3.2. Modelele eliptice

CAROLL și HOLT (1972) au propus o suprafață de încărcare eliptică pentru un material pulverulent elastoplastic; legea de curgere propusă are forma următoare:

$$\sigma_e^2 = \frac{3 \cdot \bar{S}_2^2 + B \cdot S_1^2}{A} \quad (1.47)$$

cu A și B funcții de densitatea relativă determinate experimental, utilizând încercări de compresiune uniaxială în matrită.

Suprafața de încărcare are forma :

$$F = \Lambda \left(S_1, \bar{S}_2^2 \right) - K = 0 \quad (1.48)$$

unde Λ este funcția de curgere.

Parametrul de ecruisare K este funcție de lucrul mecanic plastic.

BRUHNS și SLUZALEK (1993) au introdus modelul lui Carroll și Holt într-un cod de element finit, după ce au abordat problema din punct de vedere variațional; ei au simulat compresiunea în matrită a unei pulberi de aluminiu și au obținut previziuni pentru distribuția densității. Rezultatele sunt în concordanță cu rezultatele experimentale ale lui DUVEZ și ZWELL care au măsurat distribuția presiunii în timpul presării uniaxiale în matrită a unei pulberi de oțel.

MOSBAH (1995) propune un model elastoplastic cu ecruisare în densitate pentru a descrie comportamentul unei pulberi de fier industriale. Modelul utilizează o lege asociată și se prezintă sub forma unei suprafețe eliptice descentrată în raport cu originea. Expresia ei matematică:

$$f = \frac{\bar{S}_2^2}{A} + \frac{(S_1 - C)^2}{B} - 1 = 0 \quad (1.49)$$

Cu A, B, C funcții de densitatea relativă determinate utilizând trei condiții: legea normalității, rezistența la compresiune simplă și tensiunea de pe traseul de presare în matrită.

Figura 1.23 prezintă suprafețele de încărcare și comparația cu curbele provenite din încercările triaxiale.

Modelul este simplu, prevede o rezistență la compresiunea simplă pentru toate probele și modelează corect presarea în matrită.

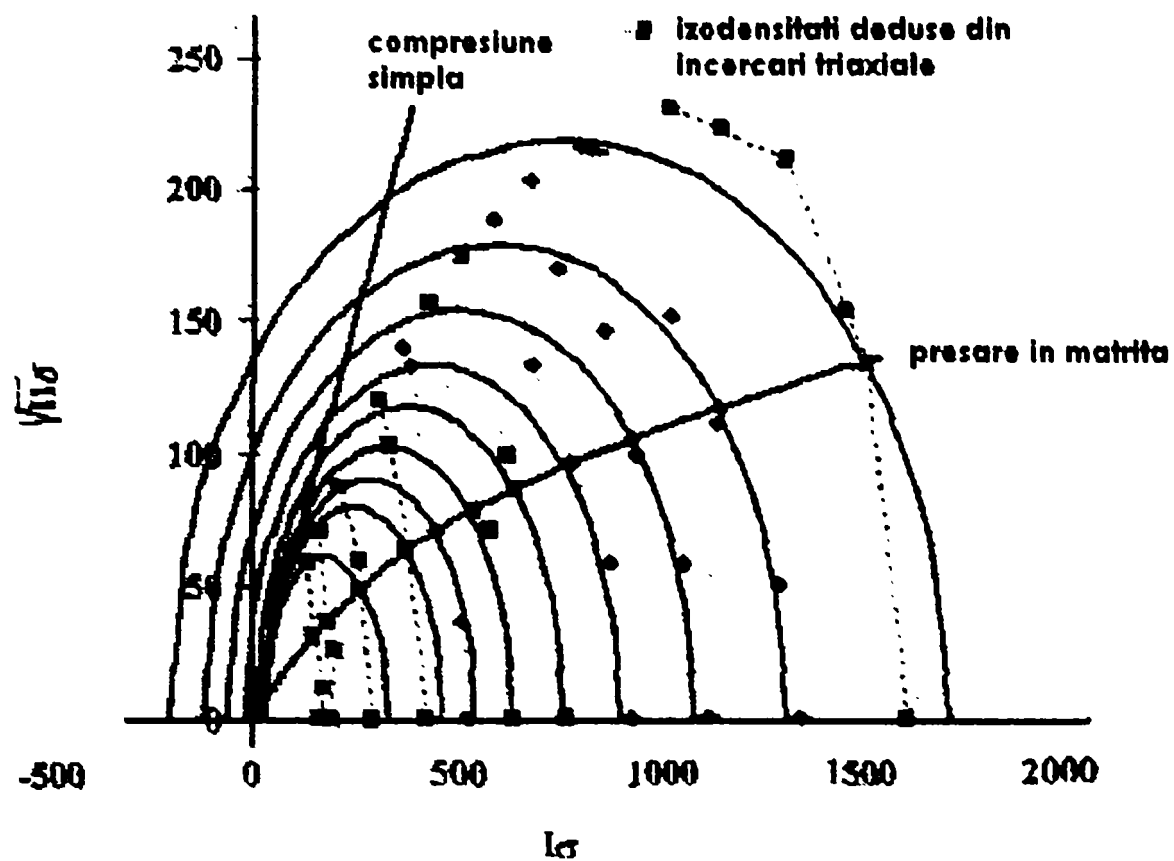


Fig. 1.23. Izodensități obținute cu modelul eliptic. ($I_{\sigma} = S_1$, $\sqrt{II_{\sigma}} = \bar{S}_2$).

1.3.3. Modelul bicap

Al doilea model elastoplastice cu ecrisare în densitate propus de Mosbah (numit bicap) prezintă o suprafață de încărcare separată în două părți, cu racordare printr-o tangentă orizontală comună celor două suprafețe în punctul lor de intersecție; cele două părți dau comportamentul compactant, respectiv dilatant.

Ecuția suprafeței compactante este dată de:

$$\frac{\bar{S}_2^2}{A_c} + \frac{(S_1 - C_c)^n}{B_c} - 1 = 0 \quad (1.50)$$

Suprafața dilatantă are ca ecuație :

$$\frac{\bar{S}_2^2}{A_d} + \frac{(S_1 - C_d)^p}{B_d} - 1 = 0 \quad (1.51)$$

Condiția de racordare se scrie:

$$A_c = A_d \text{ și } C_c = C_d;$$

Cu $A_c, A_d, B_c, B_d, C_c, C_d, n$ și p – parametri.

Suprafețele obținute cu aceste ecuații sunt prezentate în figura 1.24.

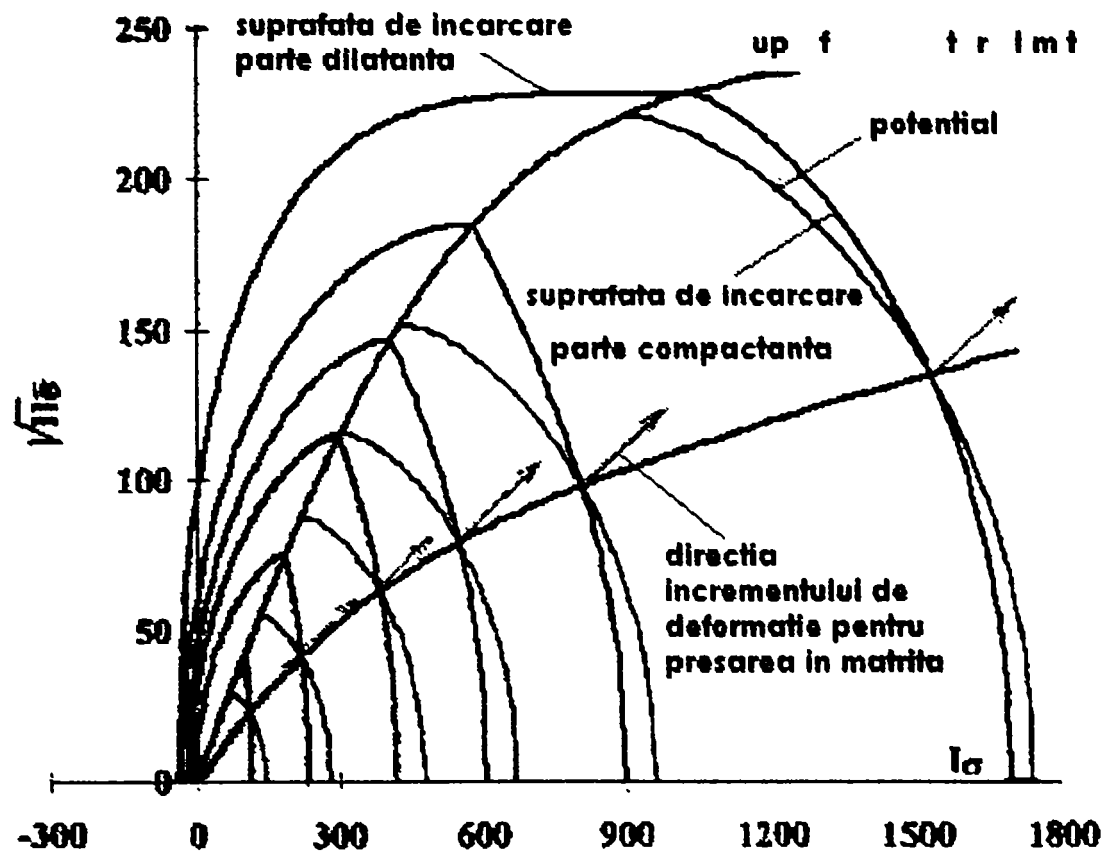


Fig.1.24. Model bicap ($I_\sigma = S_1, \sqrt{II_\sigma} = \bar{S}_2$).

Modelul este neasociat și potențialul are forma următoare:

$$g = \bar{S}_2^2 + (S_1 - C_g)^q - R \quad (1.52)$$

cu C_9 , q și R – parametri.

Modelul implică determinarea a 16 constante, dar obținerea lor este simplă; acest model este mai complicat decât cel prezentat anterior, dar modelează mai bine rezultatele încercărilor triaxiale.

1.3.4. Modelul lui Shtern

SHTERN (1997) propune un model eliptic pentru a descrie comportamentul pulberilor și al mediilor poroase. Suprafața de încărcare are forma următoare:

$$\frac{(S_1 - m \cdot \sigma_0)^2}{\psi} + \frac{\bar{S}_2^2}{\phi} = (1 - \theta) \cdot \lambda_0^2 \quad (1.53)$$

cu ϕ, ψ – funcții de densitatea relativă, legate de mecanismul de curgere a particulelor;

m – funcție de material, legată de coeziune;

λ_0 - parametru.

Modelul a fost integrat într-un cod de element finit pentru a obține distribuția densităților în secțiunea transversală a unei prisme și pentru a stabili presiunile de compactare care produc o variație minimă a densității probei.

1.3.5. Cap model adaptat pentru pulberi metalice

HAGGBLAD (1993) a modificat cap modelul lui Dimaggio și Sandler pentru a descrie comportamentul pulberilor metalice: modelul este reprezentat de o suprafață convexă și un vector viteză de deformare plastică normal la

suprafața de plasticitate în spațiul tensiunilor ; suprafața de ruptură f_1 este o combinație a suprafețelor Drucker – Prager și Von Mises (Fig.I.16), care are formularea următoare:

$$f_1 = \bar{S}_2 - [A - C \cdot \exp(B \cdot S_1)] \quad (I.37)$$

Suprafața ecruisabilă f_2 (capul) este de formă eliptică și este dată de ecuația:

$$f_2 = \bar{S}_2 - \frac{1}{R} \sqrt{(X-L)^2 - (S_1-L)^2} = 0 \quad (I.38)$$

L este presiunea medie la intersecția celor două mecanisme, și:

$$\begin{cases} L = k, & \text{daca } k < 0 \\ L = 0, & \text{daca } k > 0 \end{cases}$$

- k = variabilă internă de stare, măsură a ecruisării ;
- L și X – funcții care definesc poziția capului de-a lungul axei hidrostatice ;
- A, B, C și R – parametrii de material.

Parametrul A reprezintă limita lui \bar{S}_2 când S_1 tinde la infinit, adică limita lui Von Mises.

Egalând f_1 cu f_2 pentru $P = L$ (ecuațiile I.37 și I.38) obținem expresia următoare:

$$X = L - R \cdot [A - C \cdot \exp(B \cdot L)] \quad (I.39)$$

Capul reprezentat de ecuația (I.38) are o formă eliptică și în acest caz, parametrul R reprezintă valoarea raportului dintre axa mare și axa mică a elipsei.

$L = 0$ definește cel mai mic "cap";

Cea mai mică suprafață de încărcare este porțiunea din f_1 corespunzătoare capului :

$$f_2 = \bar{S}_2 - \frac{1}{R} \sqrt{(R(A-C))^2 - P^2} = 0$$

Domeniul elastic nu este deci niciodată nul.

I.3.6. Concluzie

Modelele pentru pulberi sunt în studiu și nu au atins încă complexitatea celor elaborate pentru metale dense și materiale geologice.

BORZTMEYER (1992) și HAGGBLAD(1994) par a fi reușit să modeleze și să simuleze compactarea pulberilor ceramice și metalice.

CAPITOLUL II

MODELAREA COMPORTAMENTULUI UNEI PULBERI DE FIER PRESATE LA TEMPERATURA AMBIANTA

II.1. Rezultate experimentale utilizate

Modelul care se propune în cele ce urmează (SAVA – 1994) a fost elaborat utilizând rezultatele experimentale pe care le-am obținut în laboratorul "Sols, Solides, Structures" al "Institut National Polytechnique" din Grenoble în colaborare cu colectivul laboratorului (a se vedea capitolul IV) ; s-au mai utilizat ulterior și rezultatele încercărilor experimentale efectuate de PAVIER (1998). Figura II.1 prezintă rezultatele încercărilor de compresiune izotropă și în matriță ale unei pulberi de fier industriale și rezultatele încercărilor de compresiune simplă a comprimatelor de diferite densități, obținute prin presare unidirecțională în matriță. Pe figură sunt indicate densitățile relative ale probelor calculate după descărcarea elastică. Modelul propus va fi calat pe rezultatele acestor încercări.

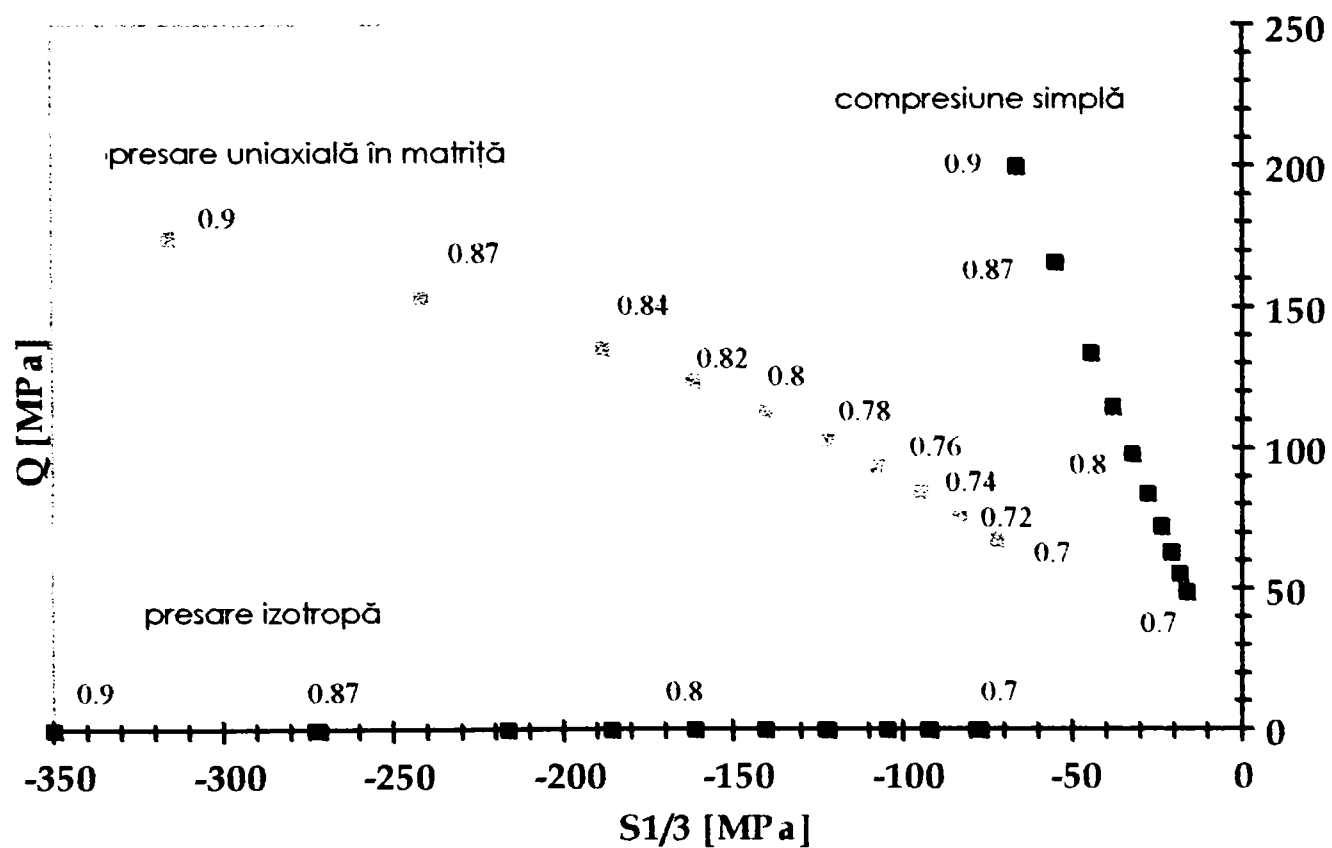


Fig. II.1. Rezultate experimentale.

II.2. Notatii

σ = tensorul tensiunilor (Cauchy);

σ_{ij} = componenta ij a tensorului tensiunilor;

$\sigma_{ij} > 0$ la tracțiune;

σ_z = tensiune axială;

σ_r = tensiune radială;

$S_1 = \sigma_{ij} \delta_{ij}$ = primul invariant al tensorului tensiunilor;

$\bar{S}_2 = \sqrt{\sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ = al doilea invariant al deviatorului tensorului tensiunilor;

$$Q = \sqrt{\frac{3}{2} \bar{S}_2};$$

I = primul invariant al tensorului tensiunilor in compresiune izotropă ($I < 0$);

ε_{ij} = componenta ij a tensorului deformațiilor;

$d\varepsilon_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}$ = componenta ij a tensorului viteză de deformație;

$\dot{\varepsilon}_z$ = viteza de deformație axială;

$\dot{\varepsilon}_r$ = viteza de deformație radială;

$\dot{\varepsilon}_v$ = viteza de deformație volumică;

δ_{ij} = componenta ij a tensorului unitate;

σ_c = rezistența la compresiune simplă;

x = rezistența la tracțiune izotropă ($x > 0$);

E = modulul de elasticitate;

ν = coeficientul lui Poisson;

V = volumul pulberii comprimate;

ρ = densitatea relativă a pulberii ($\rho = \frac{\text{densitatea pulberii comprimate}}{\text{densitatea materialului dens}}$).

II.3. Model propus

II.3.1. Suprafața de plasticitate

Modelul propus (SAVA 1997) este de tip elastoplastic cu ecrusare în deformație volumică plastică ε_v^p .

Suprafața de plasticitate propusă : $F(\sigma, \varepsilon_v^p) = 0$ are ecuația următoare:

$$F = \bar{S}_2 - k(x - S_1)^n (S_1 - I)^p = 0 \quad (II.1)$$

cu k, n, p, x, I : parametri dependenți de parametrul de ecrusare.

Relația (II.1) a fost stabilită pornind de la următoarele considerente:

- suprafața descrisă de (II.1) să fie asimetrică, deoarece comportamentul pulberii nu este același sub solicitări de compresiune și sub solicitarea de tracțiune;
- suprafața să fie convexă, și evoluția ei cu parametrul de ecrusare să fie limitată în tensiune medie de punctele de intersecție cu axa absciselor;
- să admită tangente verticale în punctele de intersecție cu axa absciselor;
- să permită limitarea în tensiune deviatoare a suprafețelor de încărcare ;
- să permită prezicerea comportamentului pulberii sub solicitarea de tracțiune.

Justificarea matematică a modului în care modelul corespunde acestor cerințe este prezentată în paragraful II.3.2, în care se analizează modelul propus.

Acceptăm o lege de curgere asociată (tensorul viteză de deformare plastică considerat ca vector în spațiul tensiunilor cu nouă dimensiuni are direcția normalei exterioare la suprafața de încărcare):

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = dM \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (II.2)$$

unde dM este multiplicatorul plastic.

Pentru a obține expresia multiplicatorului plastic se utilizează derivata în raport cu timpul a relației $F(\sigma, \varepsilon_V^p) = 0$, (II.3):

$$\dot{F}(\sigma_{ij}, \varepsilon_V^p) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \dot{\sigma}_{ij} + \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_V^p} \cdot \dot{\varepsilon}_{Vij}^p = 0 \quad (II.3)$$

În relația de mai sus se introduc expresia explicită a componentei σ_{ij} a tensorului tensiunilor și expresia componentei $\dot{\varepsilon}_{Vij}^p$ a tensorului viteză de deformare plastică; deformația volumică plastică se calculează conform relației (II.2) cu:

$$\dot{\varepsilon}_{Vij}^p = dM \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kk}} \delta_{ij} \quad (II.4)$$

Componenta tensorului viteză de deformare este dat de suma componentelor sale elastică și plastică:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (II.5)$$

Legea lui Hooke generalizată dă expresia componentei σ_{ij} a tensorului tensiunilor utilizată în relația (II.3):

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \varepsilon_{kk}^e \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ij}^e \quad (II.6)$$

cu λ și μ , coeficienții lui Lamé.

Se înlocuiește incrementul de deformare volumică plastică dat de relația (II.4) în relația (II.5) scrisă pentru deformații volumice, din care se calculează incrementul de deformare volumică elastică pe care îl introducem în (II.6). Pe baza expresiei componentei σ_{ij} a tensorului tensiunilor astfel obținute se

efectuează calculele conform relației (II.3) și se obține expresia multiplicatorului plastic:

$$dM = \frac{\lambda \cdot d\varepsilon_v \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{kk}} \cdot \delta_{ij} \right) + 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma} : d\varepsilon}{\lambda \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{kk}} \cdot \delta_{ij} \right)^2 + 2 \cdot \mu \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma} : \frac{\partial F}{\partial \sigma} - \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_v^p} \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma_{kk}} \cdot \delta_{ij} \right)} \quad (II.7)$$

II.3.2. Analiza modelului propus

Pentru $\bar{S}_2 = 0$, $S_1 = x$ și $l = S_1$;

Derivata relației (II.1) în raport cu S_1 are forma:

$$\frac{\partial \bar{S}_2}{\partial S_1} = k \cdot (x - S_1)^n \cdot (S_1 - l)^p \cdot \left[-\frac{n}{x - S_1} + \frac{p}{S_1 - l} \right] \quad (II.8)$$

Condiția de convexitate a suprafeței de încărcare se obține pentru:

$$0 < n \leq 1 \text{ și } 0 < p \leq 1.$$

Dacă $(x - S_1) \rightarrow 0$, ($k > 0$) și $(S_1 - l) > 0$, atunci: $\frac{\partial \bar{S}_2}{\partial S_1} \rightarrow -\infty$ și pentru $0 < n < 1$

și $0 < p < 1$, suprafața admite o tangentă verticală (în $S_1 = x$);

Dacă $(S_1 - l) \rightarrow 0$, ($k > 0$) și $(x - S_1) > 0$, atunci: $\frac{\partial \bar{S}_2}{\partial S_1} \rightarrow \infty$ și pentru $0 < n < 1$

și $0 < p < 1$, suprafața admite o tangentă verticală (în $S_1 = l$).

Condiția de maximum: $\frac{\partial \bar{S}_2}{\partial S_1} = 0$ (II.8), conduce la:

$$S_{1\max} = \frac{n \cdot l + p \cdot x}{n + p} \quad (II.9)$$

$$\bar{S}_{2\max} = k \cdot (S_{1\max} - x)^n \cdot (l - S_{1\max})^p = k \cdot n^n \cdot p^p \frac{(x - l)^{n+p}}{(n+p)^{n+p}} \quad (II.10)$$

Folosind relațiile (II.9) și (II.10) putem studia influența parametrilor asupra modelului propus:

- k nu influențează valoarea lui $S_{1\max}$; pentru x, n, p și l constante, curba $F = 0$ este crescătoare când k crește, (a se vedea (II.9) și (II.10));
- modificarea formei suprafeței de încărcare cu n și p ;
- modificarea maximumului lui S_1 cu n și p (când x și l sunt fixați);
- modificarea maximumului lui \bar{S}_2 cu k, n , și p ;
- pentru $p \rightarrow 1$, modificarea maximumului lui \bar{S}_2 cu k , pentru limitarea suprafeței de încărcare prin criteriul von Mises.

II.3.3. Parametrul de ecrusare

Pentru a explica alegerea parametrului de ecrusare, vom studia o suprafață de plasticitate $F(\sigma, \rho) = 0$, reprezentată în planul (S_1, \bar{S}_2) , densitatea fiind calculată la încărcare (Fig. II.2).

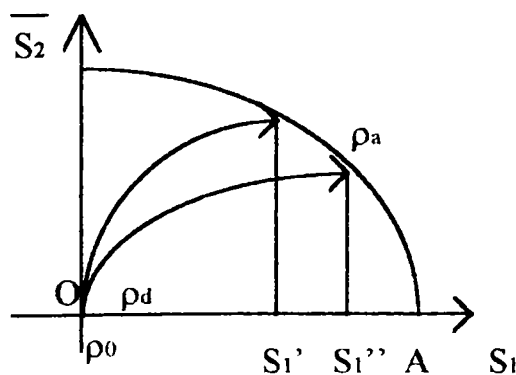


Fig.II.2. Suprafața de plasticitate $F(\sigma, \rho) = 0$

Să considerăm un traseu de încărcare izotropă OA a pulberii care are o densitate inițială ρ_0 până la o presiune medie S_1 ; densitatea relativă corespunzătoare este ρ_a și ne situăm pe suprafața de plasticitate $F(\sigma, p) = 0$. Descărcarea elastică completă conduce la $S_1 = 0$; fie $(\varepsilon_V^P, \rho_d)$ deformația volumică plastică și densitatea relativă, caracteristicile materialului după descărcare.

Diferite trasee de încărcare $F(\sigma, p) < 0$ conduc din nou pe suprafața de plasticitate care corespunde lui ρ_a ; fiecare traseu de încărcare conduce la un punct pe suprafața de plasticitate corespunzătoare diferitelor valori ale lui S_1 (S_1' , S_1''), care, la rândul lor, conduc la diferite densități relative. Deci, suprafața de plasticitate nu poate fi o izodensitate și densitatea relativă nu poate fi considerată parametru de ecrusare.

În schimb, fiecare încărcare elastică este legată de aceeași deformație volumică plastică ε_V^P corespunzătoare acestei suprafețe de plasticitate (oricare ar fi traseul de încărcare). Din aceste considerente de ordin fizic am ales deformația volumică plastică drept parametru de ecrusare.

Forma generală a suprafeței de plasticitate devine: $F(\sigma, \varepsilon_V^P) = 0$.

Considerând descompunerea incrementului de deformație $d\varepsilon$ în componentele sale elastică și plastică, incrementul de deformație plastică se exprimă:

$$d\varepsilon^P = d\varepsilon - d\varepsilon^e \quad (11.5)$$

$$\text{și } \varepsilon_V^P = \varepsilon_V - \varepsilon_V^e \quad (11.6)$$

Legea conservării masei, $dm = 0$, conduce la:

$$dm = \rho \cdot dV + V \cdot d\rho = 0 \Rightarrow \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (11.7)$$

Integrând ecuația (II.7) de la timpul $t = 0$ și $\rho = \rho_0$ la timpul t și la $\rho = \rho_a$, se obține deformația volumică totală:

$$\int_0^t \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} = - \int_0^t \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{\rho_a}{\rho_0} = - \ln \frac{V(t)}{V_0} = -\varepsilon_v(t) \quad (II.8)$$

și: $\varepsilon_v(t) = \ln \frac{\rho_0}{\rho_a}$ (II.9)

Legea lui Hooke generalizată :

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \quad (II.10)$$

unde $\sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}$ reprezintă primul invariant al tensorului tensiunilor; înmulțind relația (II.10) cu δ_{ij} se obține expresia deformației volumice plastice:

$$\delta_{ij} \cdot \varepsilon_{ij}^e = \varepsilon_v^e = \frac{1-2 \cdot \nu}{E} \cdot S_1 \quad (II.11)$$

cu $E = E_1 \exp(\rho / \rho_0)^\gamma$, unde E_1, γ, ρ_0 sunt constante (PAVIER 1997).

Utilizând ecuațiile (II.6) și (II.9) obținem:

$$\varepsilon_v^p = \ln \frac{\rho_0}{\rho_a} - \varepsilon_v^e = \ln \frac{\rho_0}{\rho_a} - \frac{1-2 \cdot \nu}{E} \cdot S_1 \quad (II.12)$$

unde S_1 este primul invariant al tensorului tensiunilor pentru densitate la încărcare ρ_a ;

și ρ_0 este densitatea inițială la presare unidirecțională, $\rho_0 = 0,47$.

În cele ce urmează s-a calculat ε_V^P utilizând densitatea relativă după descărcare elastică, ceea ce conduce la $\varepsilon_V^e = 0$ și deci, $\varepsilon_V^P = \varepsilon_v$ în (II.6), de unde:

$$\varepsilon_V^P = \ln \frac{\rho_0}{\rho_a} \quad (II.13)$$

Dacă $\rho_a = \rho_0$, $\Rightarrow \varepsilon_V^P = 0$;

Dacă $\rho_a \rightarrow 1$, $\Rightarrow \varepsilon_V^P \rightarrow \ln \rho_0$;

Înlocuind $\rho_0 = 0.47$, $\Rightarrow -0.75 < \varepsilon_V^P < 0$

PAVIER (1998) dovedește experimental că în cazul pulberilor, deformațiile elastice sunt neglijabile în raport cu deformațiile plastice și că deformațiile volumice totale pot deci fi asimilate deformațiilor volumice plastice. Ceea ce confirmă raționamentul de mai sus.

II.3.4. Funcționarea modelului

Pentru a ilustra funcționarea modelului propus (Fig.II.3), vom utiliza cele două tipuri de încercări triaxiale prezentate de Pavier (PAVIER 1998). Parametrul de ecrusare utilizat este deformația volumică plastică, dar, pentru a explica mai bine modelul, ne vom referi de asemenea la densitatea relativă.

II.3.4.1. Densificarea

Partea compactantă este descrisă pornind de la o probă normal consolidată, adică, pulberea este comprimată sub un câmp de tensiuni izotrope până la presiunea medie P_1 și atinge o deformație volumică plastică

ε_{V1}^P . Domeniul elastic este delimitat de suprafața de plasticitate de parametru ε_{V1}^P . Apoi, proba este comprimată axial și tensiunile cresc până în punctul A. Vectorul curgere plastică indică o densificare, deci densitatea crește, de asemenea și deformația volumică plastică care devine ε_{V3}^P . Pornind de la această stare de tensiune, proba se descarcă axial pe același drum de solicitare (până în punctul B). Tensiunile scad, dar densitatea și deformația volumică rămân aceleași; suprafața de plasticitate rămâne identică. O dată ce s-a atins din nou starea de tensiune a punctului A și dacă se continuă comprimarea, comportamentul pulberii comprimate redevine plastic, suprafața de plasticitate este din nou antrenată și deformația volumică plastică se schimbă. Densificarea se oprește atunci când este atins punctul corespunzător stării critice (punctul C, ε_{V4}^P).

În acest punct, vectorul curgere plastică este vertical și deformarea continuă la volum și tensiuni constante.

II.3.4.2. Dilatanța

Partea dilatantă a modelului este descrisă pornind de la o solicitare triaxială supraconsolidată.

Pulberea este comprimată întâi la presiune izotropă P_c (deformația volumică plastică corespunzătoare este ε_{V5}^P). Domeniul elastic este delimitat de către suprafața de plasticitate ce variază cu ε_{V5}^P . În continuare, presiunea izotropă scade până la valoarea P_2 ; în timpul acestei descărcări, comportamentul pulberii este elastic, deformația volumică plastică și suprafața de plasticitate nu se schimbă. Se solicită din nou proba, de această dată axial. Comportamentul materialului este elastic până ce câmpul de tensiuni va aparține suprafeței de plasticitate depinzând de ε_{V5}^P (punctul D).

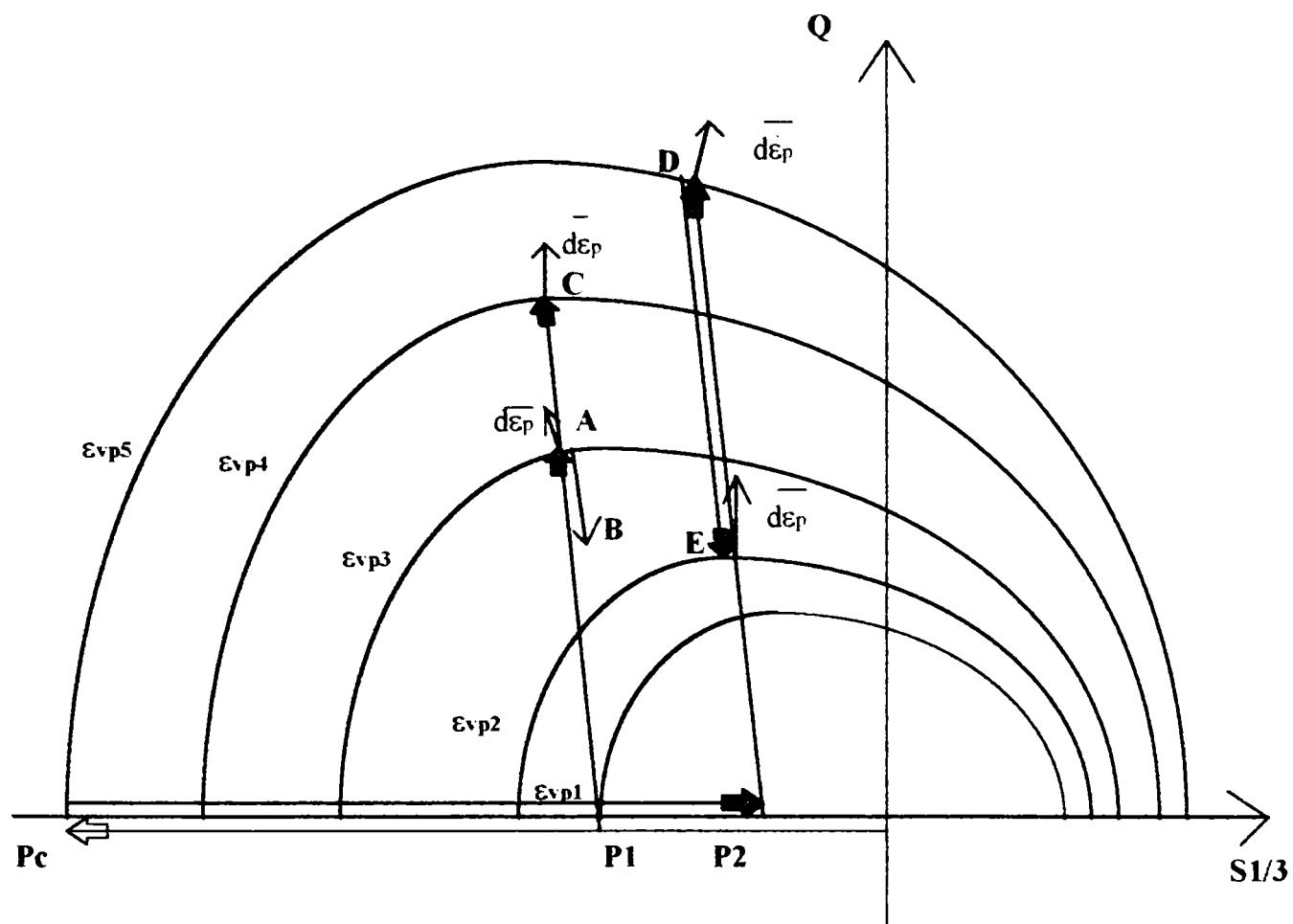


Fig.II.3. Funcționarea modelului propus.

Comportamentul materialului devine plastic. Vectorul curgere plastică indică o dilatanță; astfel, densitatea scade, la fel și deformația volumică plastică, și este atins un punct critic (punctul E) și materialul atinge deformația volumică plastică ε_{V2}^D .

Deformația se produce în continuare la volum și tensiuni constante.

II.3.5. Metoda de calare; identificarea parametrilor

S-a ales un criteriu depinzând de "n" parametri a_i considerați dependenți de parametrul de ecruisare:

$$F(\sigma, a_i) = 0;$$

Pentru solicitări axial simetrice și ținând cont de izotropie, criteriul devine:

$$F(S_1, \bar{S}_2, a_i) = 0.$$

In funcție de rezultatele experimentale (Fig.II.1), dispunem de următoarele date:

- un punct de presare unidirecțională în matriță;
- un punct de compresiune izotropă;
- un punct de compresiune simplă, corespunzând rezistenței la compresiune simplă a unui comprimat obținut prin presarea unidirecțională a pulberii.

Dacă se acceptă legea normalității (material standard), putem scrie, neglijând deformațiile elastice:

- legea normalității pentru presarea unidirecțională în matriță;
- legea normalității pentru compresiunea simplă.

Deci, dispunem de maximum 5 ecuații care vor permite identificarea unui model cu 5 parametri.

Cei 5 parametri ai modelului sunt: l, k, n, p, x.

Compresiunea izotropă dă imediat parametrul l;

Ecuațiile utilizate sunt:

- 1.- criteriul (II.1) utilizat pentru presarea unidirecțională în matriță;

$$\bar{S}_2 - k \cdot (S_1 - x)^n \cdot (l - S_1)^p = 0 \quad (II.14)$$

- 2.- criteriul (II.1) utilizat pentru compresiunea simplă;

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_c - k \cdot (\sigma_c - x)^n \cdot (l - \sigma_c)^p = 0 \quad (II.15)$$

cu: σ_c = rezistența la compresiune simplă;

$$\text{și } S_1 = \sigma_c, \quad \bar{S}_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \sigma_c$$

3.- legea normalității pentru presarea unidirecțională (II.17):

$$d\varepsilon_r = dM \frac{\partial F}{\partial \sigma_r} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \bar{S}_2}{\partial \sigma_{ij}} - k \cdot \frac{\partial S_1}{\partial \sigma_{ij}} \left[n \cdot (S_1 - x)^{n-1} \cdot (1 - S_1)^p - p \cdot (S_1 - x)^n \cdot (1 - S_1)^{p-1} \right] \Rightarrow$$

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \bar{S}_2}{\partial \sigma_{ij}} - \frac{\partial S_1}{\partial \sigma_{ij}} \cdot \bar{S}_2 \cdot \left[\frac{n}{S_1 - x} - \frac{p}{1 - S_1} \right] \quad (II.16)$$

Pentru presarea unidirecțională, $S_1 = \sigma_z + 2 \cdot \sigma_r$ și $\bar{S}_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (\sigma_z - \sigma_r)$, și

înlocuind $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$ cu $\frac{\partial F}{\partial \sigma_r}$ în expresia derivatei $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$ de mai sus, obținem legea

normalității pentru presarea unidirecțională:

$$\bar{S}_2 \cdot \left[\frac{p}{S_1 - 1} - \frac{n}{x - S_1} \right] = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (II.17)$$

4.- legea normalității pentru compresiunea simplă (II.18) .

La modul general, legea normalității se scrie:

$$d\varepsilon_{ij} = dM \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} ;$$

Folosind relația (II.16), se calculează $d\varepsilon_r$ și $d\varepsilon_z$:

$$d\varepsilon_r = \frac{dM}{\bar{S}_2} \cdot \left[-\frac{\sigma_c}{3} - \frac{2}{3} \cdot \sigma_c^2 \cdot \left(\frac{n}{\sigma_c - x} - \frac{p}{1 - \sigma_c} \right) \right]$$

$$d\varepsilon_z = \frac{dM}{S_2} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \sigma_c - \frac{2}{3} \cdot \sigma_c^2 \cdot \left(\frac{n}{\sigma_c - x} - \frac{p}{1 - \sigma_c} \right) \right]$$

Calculând $m = \frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_z}$ obținem relația (II.18) pentru compresiunea simplă:

$$\frac{1+2 \cdot m}{2 \cdot \sigma_c \cdot (m-1)} = \frac{n}{x - \sigma_c} - \frac{p}{\sigma_c - 1} \quad (II.18)$$

Parametrii k , n , p , x au fost obținuți calând aceste ecuații pe datele experimentale, pentru zece densități relative (0.7, 0.72, 0.74, 0.76, 0.78, 0.8, 0.82, 0.84, 0.87, 0.9).

Figurile II.4 și II.5 arată variația parametrilor k , n , p , x și l în funcție de deformația volumică plastică; se observă că $n \in [0.47, 0.88]$, $p \in [0.34, 0.38]$ și $k \in [0.27, 0.4]$. Pentru a utiliza un maximum de parametri constanți, s-au considerat: $n = 0.68$, $p = 0.366$ și $k = 0.3$.

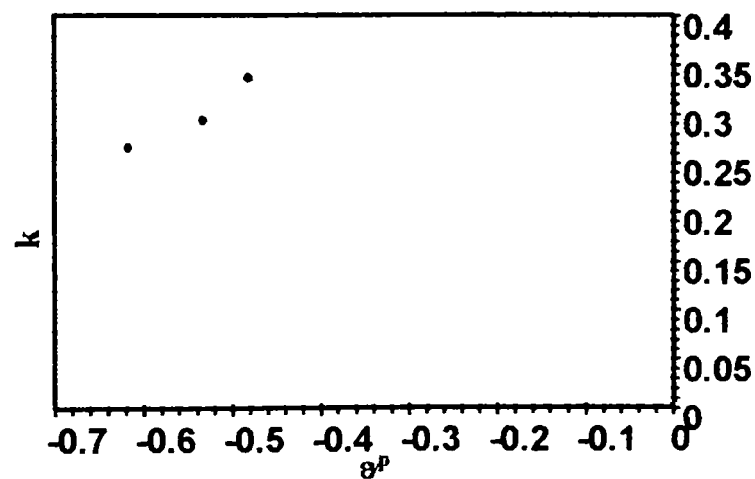


Fig. II.4. Variația parametrului k .

Parametrii x și l s-au exprimat în funcție de deformația volumică plastică utilizând funcțiile următoare:

$$x = A01 \cdot \frac{((-1) \cdot \varepsilon_V^p)^{A02}}{(0,75 + \varepsilon_V^p)^{A03}} \quad (II.16)$$

$$I = A11 \cdot \frac{\left((-1) \varepsilon_V^p\right)^{A12}}{\left(0,75 + \varepsilon_V^p\right)^{A13}} \quad (II.17)$$

unde $A01=298.017$, $A02=2.585$, $A03=0.00228$, $A11=-633.34$, $A12=1.776$, $A13=0.556$, (constante) .

Pentru $\varepsilon_V^p = 0$, $x = 0$ (rezistența la tracțiune izotropă este nulă) și $I = 0$ (primul invariant al tensorului tensiunilor la compresiune izotropă este nul).

Suprafețele de încărcare definite prin (II.1) cu parametrii de mai sus sunt prezentate în Fig.II.6, pentru deformațiile volumice plastice corespunzătoare densităților relative 0.76, 0.8, 0.87. Pe aceeași figură s-au reprezentat punctele experimentale corespunzătoare solicitărilor de presare unidirecțională, compresiune izotropă și compresiune simplă a probelor presate inițial unidirecțional în matriță.

Figurile II.7 și II.8 prezintă suprafețele de încărcare ale modelului propus și rezultatele solicitărilor triaxiale normal consolidate (Fig.II.7) respectiv rezultatele solicitărilor triaxiale supraconsolidate ale lui Pavier (Fig.II.8) (PAVIER 1998). Simbolurile grafice reprezintă rezultatele experimentale pentru densitățile relative 0.79, 0.82, 0.84 și 0.87 care corespund deformațiilor volumice plastice: -0.52, -0.554, -0.58 și -0.616. Alături de fiecare suprafață de încărcare este indicată deformația volumică plastică corespunzătoare. Rezultatele încercărilor supraconsolidate sunt mai apropiate de curbele teoretice.

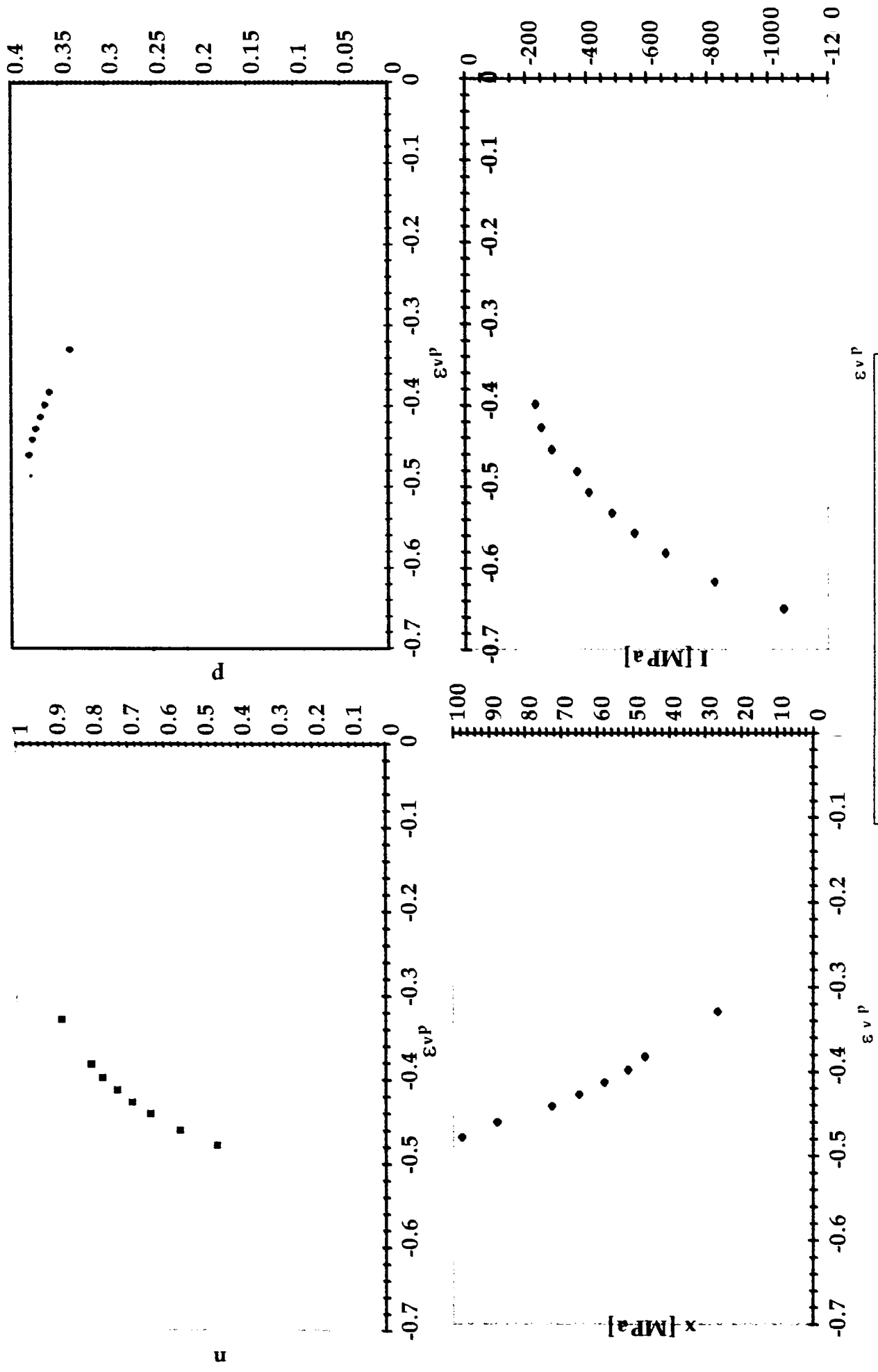


Fig.II.5. Variația parametrilor n, p, x, l .

II.4. Concluzie

Modelul propus aproximează bine încercările de compresiune simplă și izotropă și destul de bine încercările de compresiune în matriță.

Avantaje: este un model asimetric care:

- prezintă o bună flexibilitate în raport cu rezultatele experimentale;
- prezice comportamentul în tracțiune al pulberii;
- permite trecerea de la un material cu consistență slabă la un material foarte dens.

Suprafețele de încărcare sunt limitate în tensiune deviatoare prin criteriul von Mises.

Dezavantaj : se presupune un comportament izotrop al pulberii, ceea ce limitează modelul.

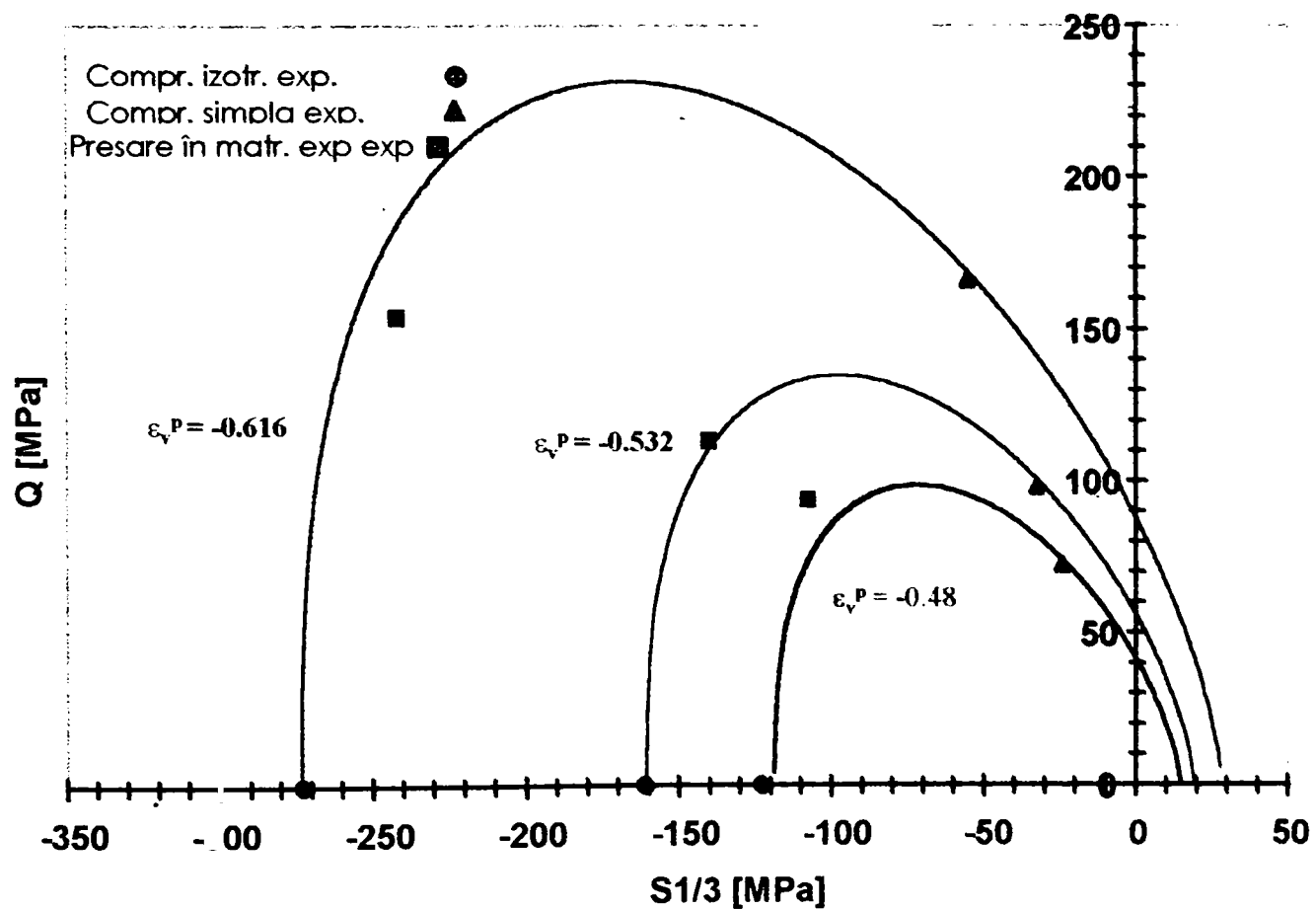


Fig.II.6. Suprafețe de încărcare și rezultatele experimentale.

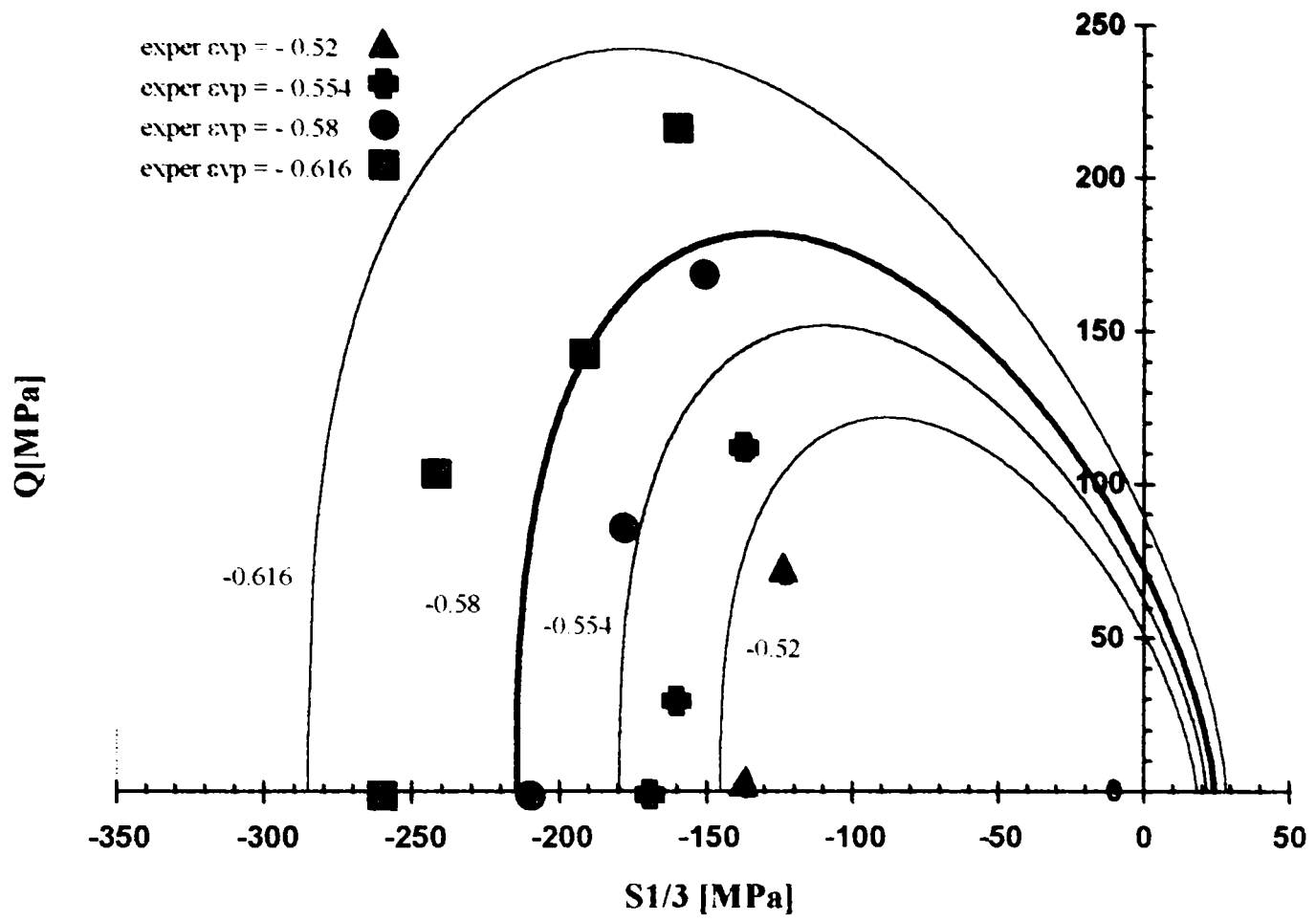


Fig.II.7. Suprafețe de încărcare și rezultatele încercărilor normal consolidate.

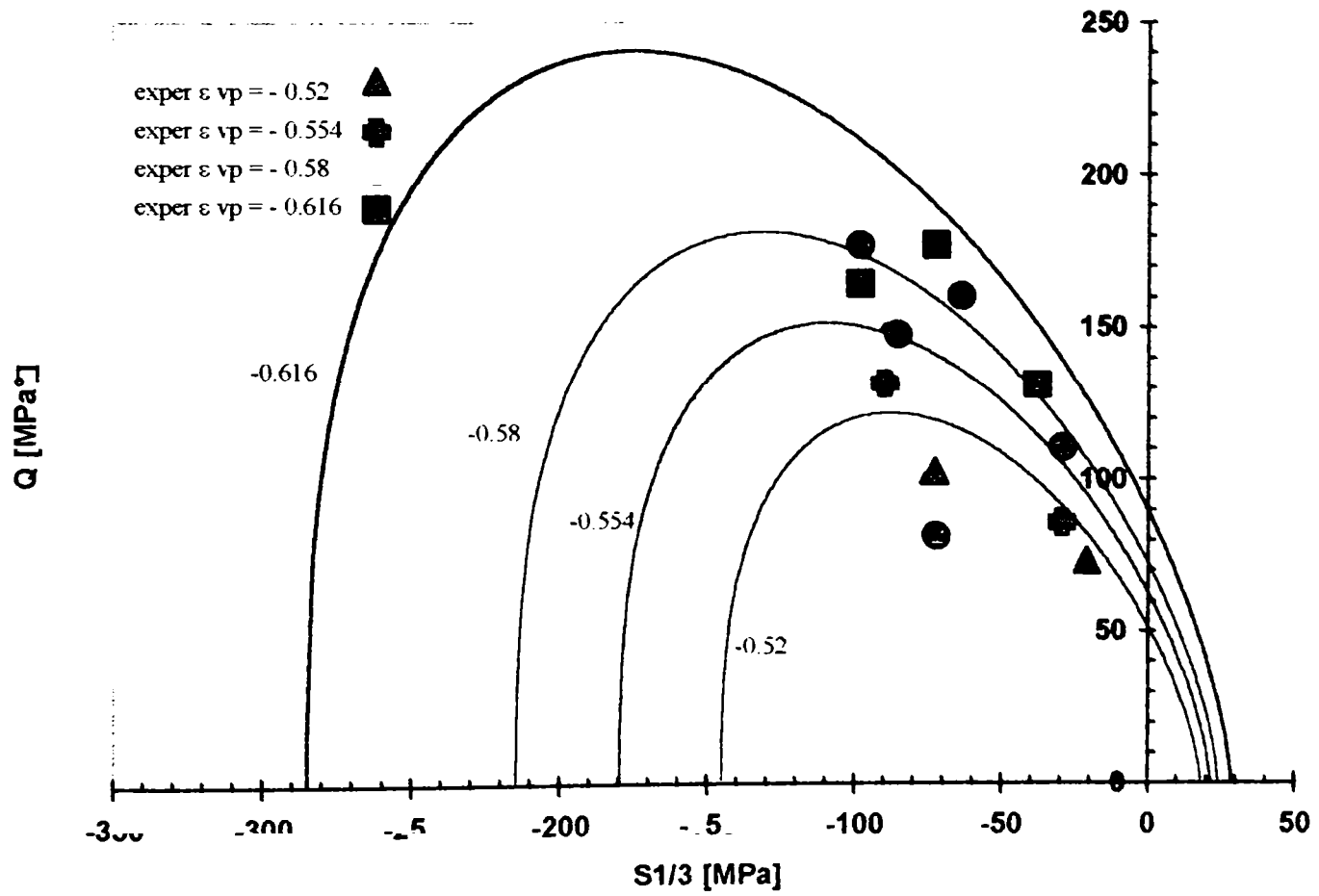


Fig. II.8. Suprafețe de încărcare și rezultatele încercărilor supraconsolidate.

COMPARATIE INTRE MODELUL PROPUȘ SI MODELELE CELE MAI UTILIZATE IN LITERATURA DE SPECIALITATE

III.1. Modelul propus

Modelul propus a fost prezentat detaliat în capitolul II și are forma:

$$F = \bar{S}_2 - k(x - S_1)^n(S_1 - l)^p = 0 \quad (III.1)$$

Performanțele programelor utilizate ne permitând reprezentarea modelelor și a datelor experimentale pe același grafic, în figura III.1 se reprezintă modelul propus și datele experimentale utilizate pentru pulberea de fier.

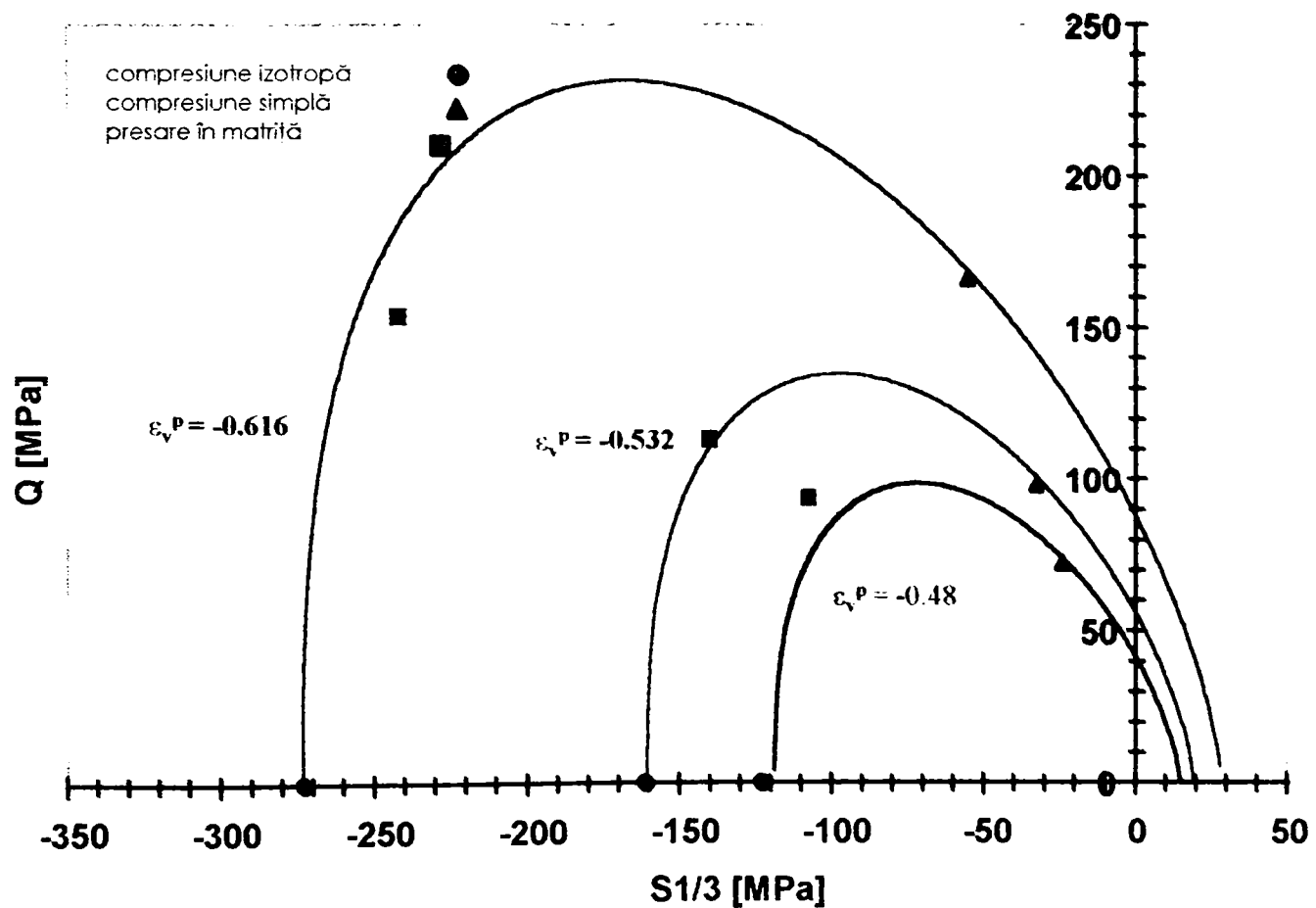


Fig. III.1. Modelul propus și rezultatele experimentale .

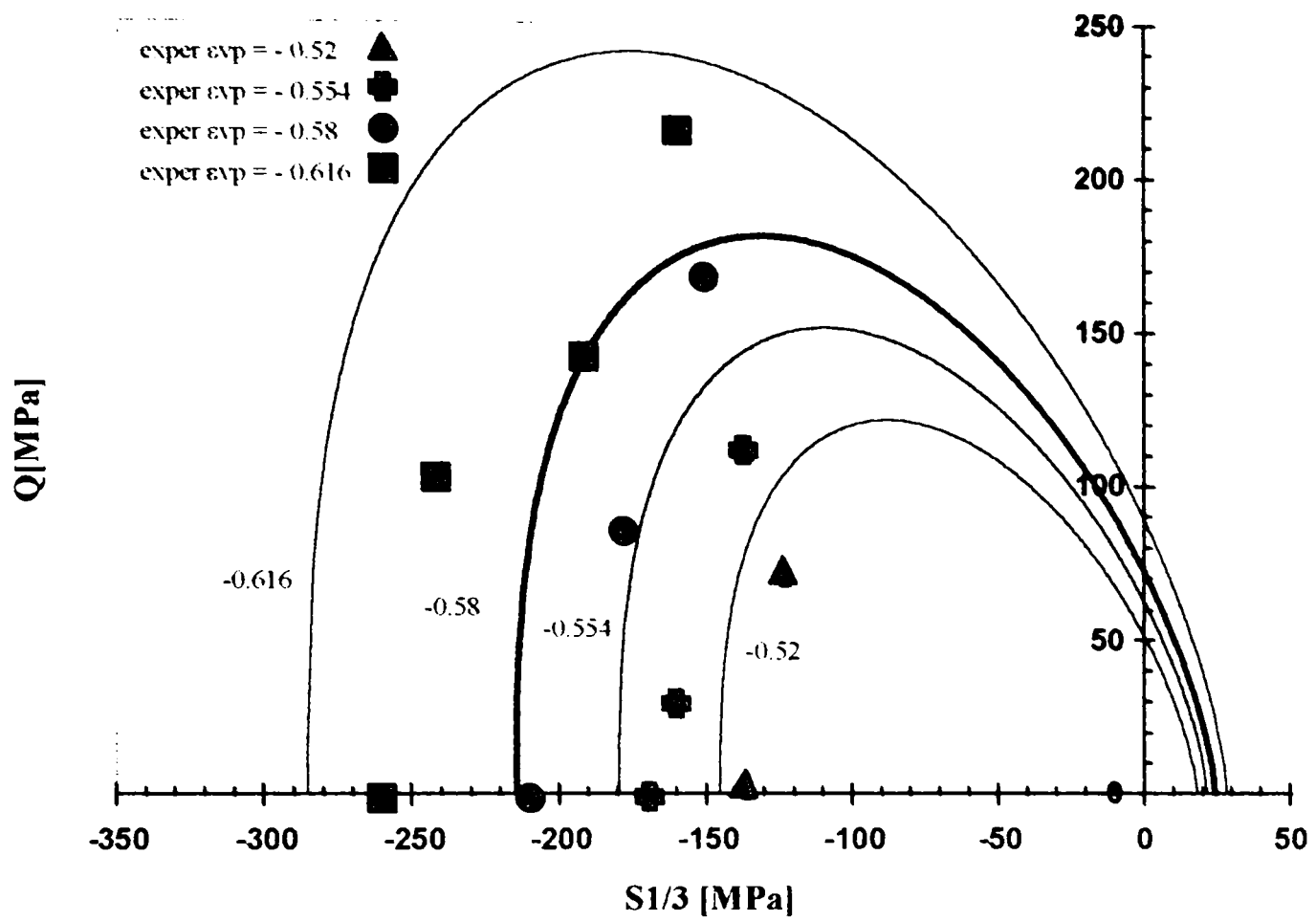


Fig.III.2. Model propus și încercările triaxiale normal consolidate.

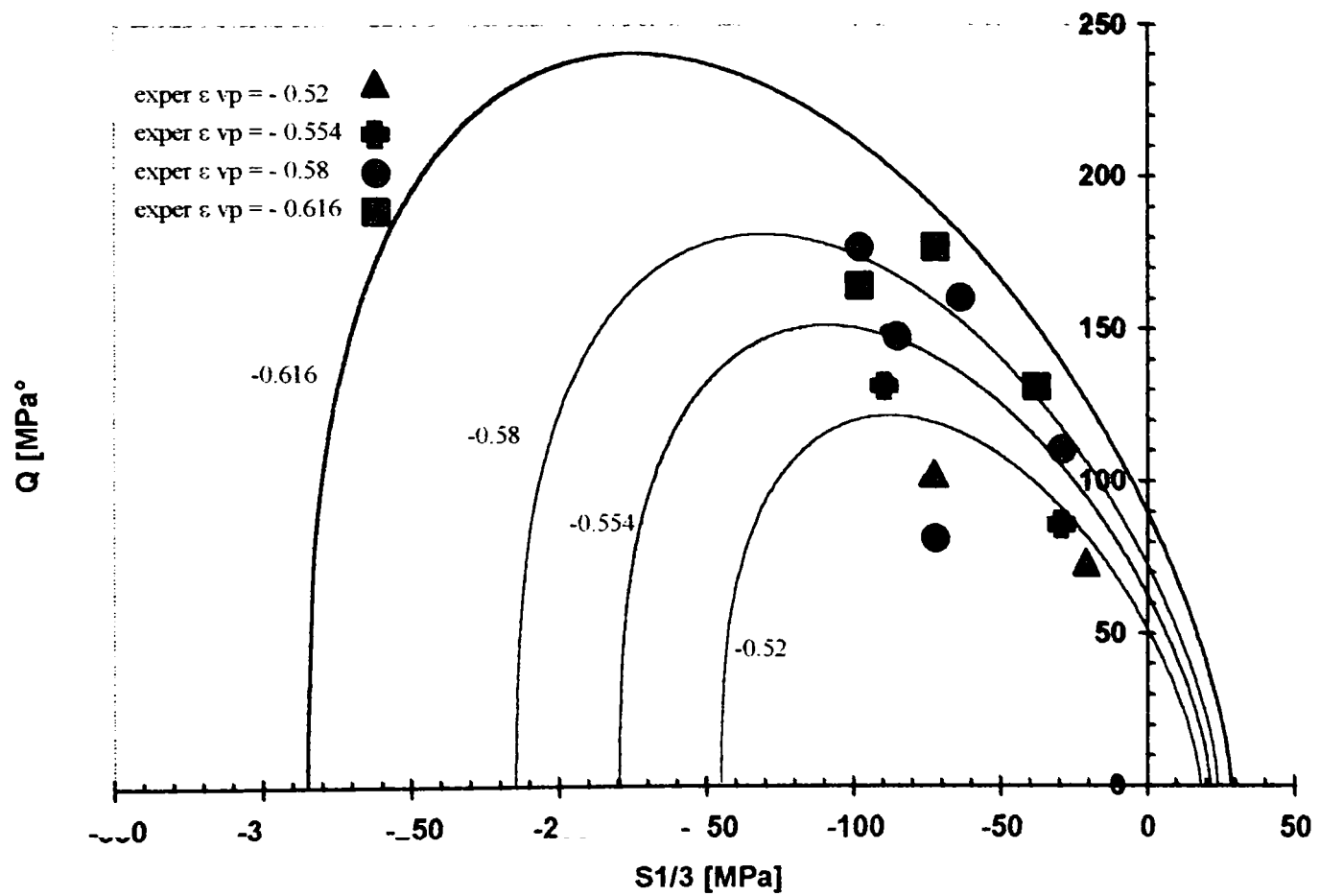


Fig.III.3. Model propus și încercările triaxiale supraconsolidate.

În figurile III.2 și III.3 sunt prezentate comparativ rezultatele experimentale ale lui Pavier (PAVIER 1998) și modelul propus în capitolul II.

III.2. Modelul Cam-clay modificat

Modelul Cam-clay modificat a fost prezentat succint în capitolul I (paragraful I.2.3) și are ca ecuație:

$$f = Q^2 + M^2 \cdot P \cdot (P - P_0) = 0 \quad (\text{III.2})$$

cu :

P_0 = parametru de ecrusare ;

$Q = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \bar{\sigma}_{ij} \cdot \bar{\sigma}_{ij}}$ invariantul deviatorului tensorului tensiunilor

și M = coeficient de frecare internă a materialului.

Suprafețele de plasticitate corespunzătoare sunt elipse trecând prin origine și centrate pe axa presiunilor hidrostactice.

Modelul este asociat și:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (\text{III.3})$$

cu $d\lambda$ = multiplicatorul plastic care se obține din relația de coerență (III.4);

parametrul de ecrusare este densitatea relativă.

$$\frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial Q} dQ + \frac{\partial f}{\partial \rho} d\rho = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{\partial f}{\partial \rho} d\rho = \rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dV}{V} = d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial P} \quad (\text{PAVIER 1998}), \text{ de unde:}$$

$$d\lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial Q} dQ}{\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \frac{\partial f}{\partial P}} \quad (\text{III.5})$$

$P_0(\rho)$ este funcție de variabila de ecruisare $\frac{dP_0}{P_0} = k \frac{d\rho}{\rho}$ (PAVIER 1998).

$$\frac{\partial f}{\partial P} = M^2 \cdot (2 \cdot P - P_0)$$

$$\frac{\partial f}{\partial Q} = 2 \cdot Q$$

$$\frac{\partial f}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} M^2 k \cdot P \cdot P_0(\rho)$$

De unde, utilizând (III.5) se obtine expresia multiplicatorului plastic:

$$d\lambda = \frac{M^2 \cdot (2P - P_0) dP + 2 \cdot Q \cdot dQ}{M^4 k \cdot P \cdot P_0 \cdot (2 \cdot P - P_0)} \quad (\text{III.6})$$

III.2.1. Funcționarea modelului

Figura III.4 va fi utilizată pentru a ilustra funcționarea modelului.

III.2.1.1. Densificarea

Considerăm o solicitare triaxială normal consolidată; pulberea se comprimă la presiune izotropă P_1 și atinge o densitate ρ_1 . În continuare, proba se

comprimă axial și tensiunile cresc până în punctul A. Vectorul curgere plastică indică o densificare, densitatea crește până la ρ_2 și suprafața de încărcare este antrenată. Comportamentul pulberii este plastic și densificarea continuă până când starea de tensiune aparține dreptei de stări critice (punctul B). Deformația continuă la volum și tensiuni constante.

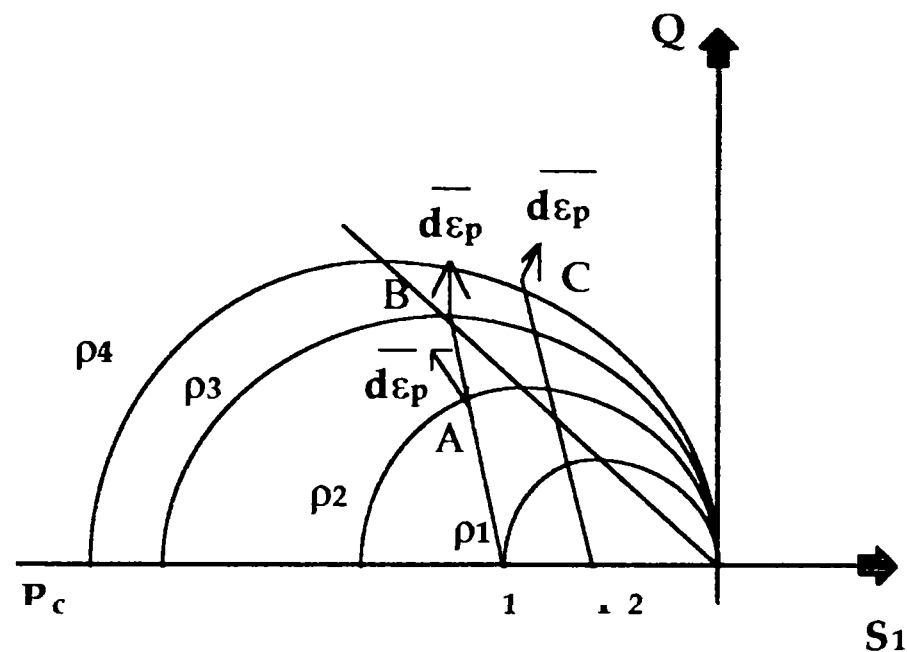


Fig.III.4. Funcționarea modelului Cam-clay.

III.2.1.2. Dilatanța

Considerăm o sollicitare triaxială supraconsolidată. Pulberea este comprimată la tensiune izotropă P_c până la densitatea ρ_4 . Domeniul elastic este delimitat de suprafața de încărcare de parametru ρ_4 . În continuare, presiunea izotropă scade până la valoarea P_2 ; comportamentul materialului este elastic, densitatea nu variază. Se încarcă axial proba care păstrează un comportament elastic până ce câmpul de tensiuni aparține suprafeței de încărcare de densitate ρ_4 (punctul B). Comportamentul materialului devine plastic și vectorul curgere plastică indică o dilatanță. Densitatea scade antrenând suprafața de încărcare. Dilatanța se încheie atunci când starea

de tensiune aparține dreptei de stare critică (punctul C). Deformarea se produce în continuare la densitate și tensiune constante.

III.2.2. Calarea modelului Cam-clay modificat pe rezultatele experimentale

Parametrii modelului sunt M și P_0 .

Compresiunea izotropă dă imediat parametrul P_0 ($P_0 = S_{1\text{ iso}}/3$).

Ecuția utilizată este criteriul scris pentru compresiunea în matriță.

Parametrii s-au obținut calând criteriul pe datele experimentale pentru densitățile relative: 0.7, 0.76, 0.8, 0.87.

Dupa optimizarea lui M și P_0 , obținem ecuația următoare, pentru suprafețele de plasticitate parametrare în densitate relativă:

$$f = Q^2 + 1.868^2 \cdot P \cdot \left(P - \left(-0.315 \cdot e^{7.81P} \right) \right) \quad (\text{III.7})$$

În figura III.5 sunt trasate elipsele Cam-clay, rezultatele optimizării parametrilor și datele experimentale; figurile III.6 și III.7 indică elipsele Cam-clay și rezultatele încercărilor triaxiale.

III.2.3 Comparație între modelul propus și modelul Cam-clay modificat

Comparația va avea ca obiect reproductibilitatea rezultatelor experimentale și prezicerea comportamentului pulberii la solicitarea de tracțiune izotropă.

Cele două modele au fost calate pe încercările experimentale efectuate pe pulberea de fier, numărul de solicitări utilizate depinzând de numărul parametrilor modelelor. Astfel, identificarea parametrilor modelului propus a fost făcută folosind rezultatele încercărilor de compresiune simplă, izotropă și

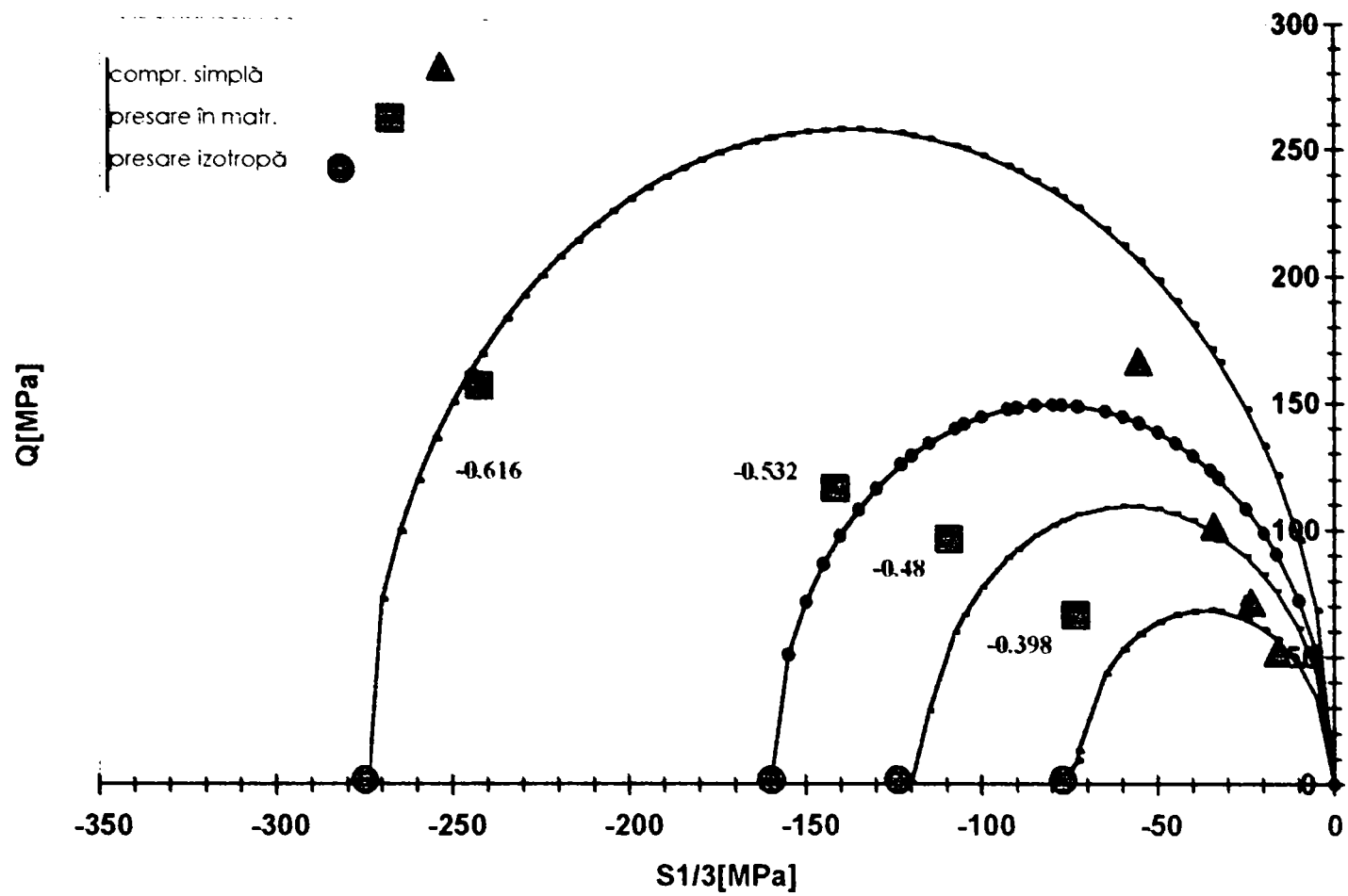


Fig.III.5. Suprafețe de încărcare Cam-clay modificat și rezultate experimentale .

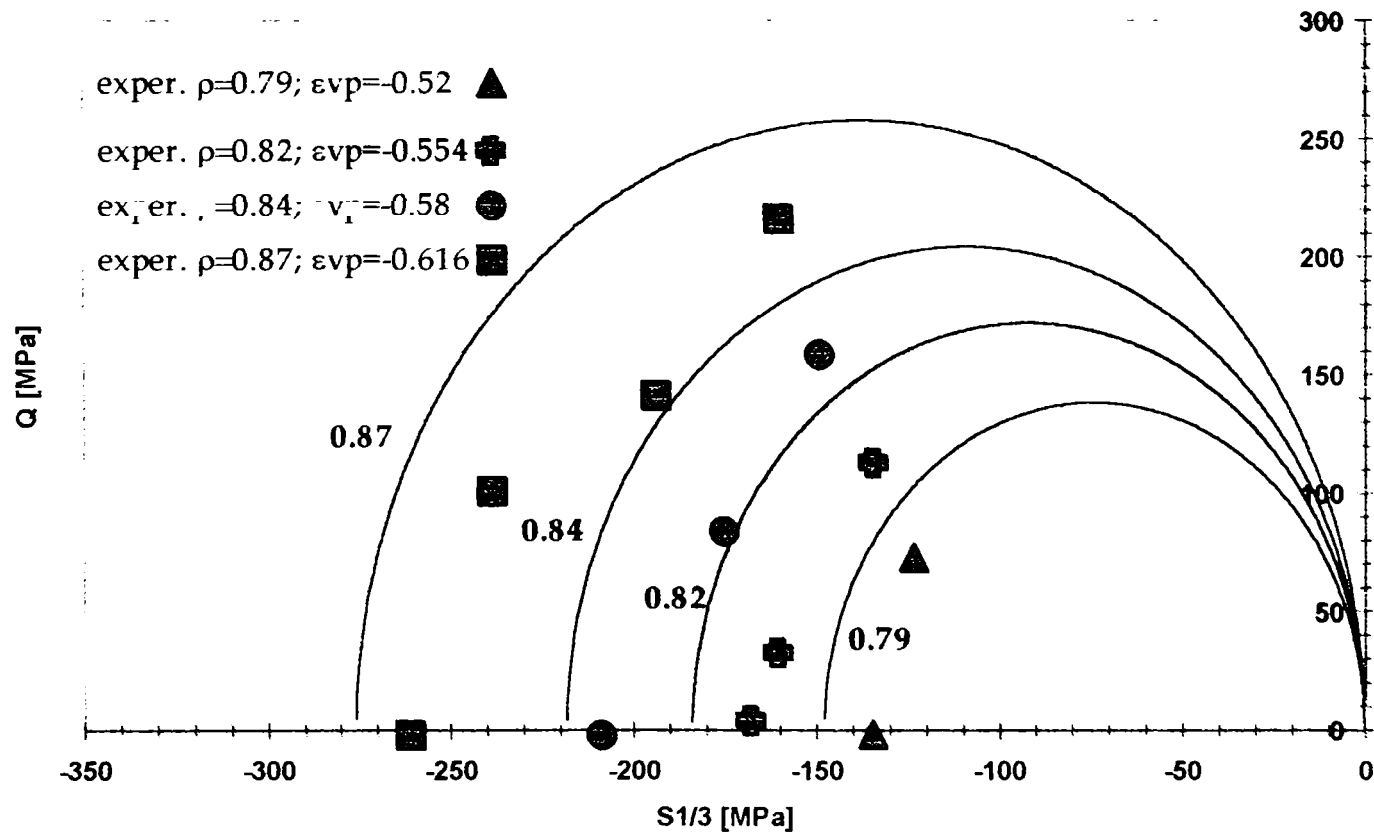


Fig.III.6. Suprafețe de încărcare Cam-clay și încercările triaxiale normal consolidate .

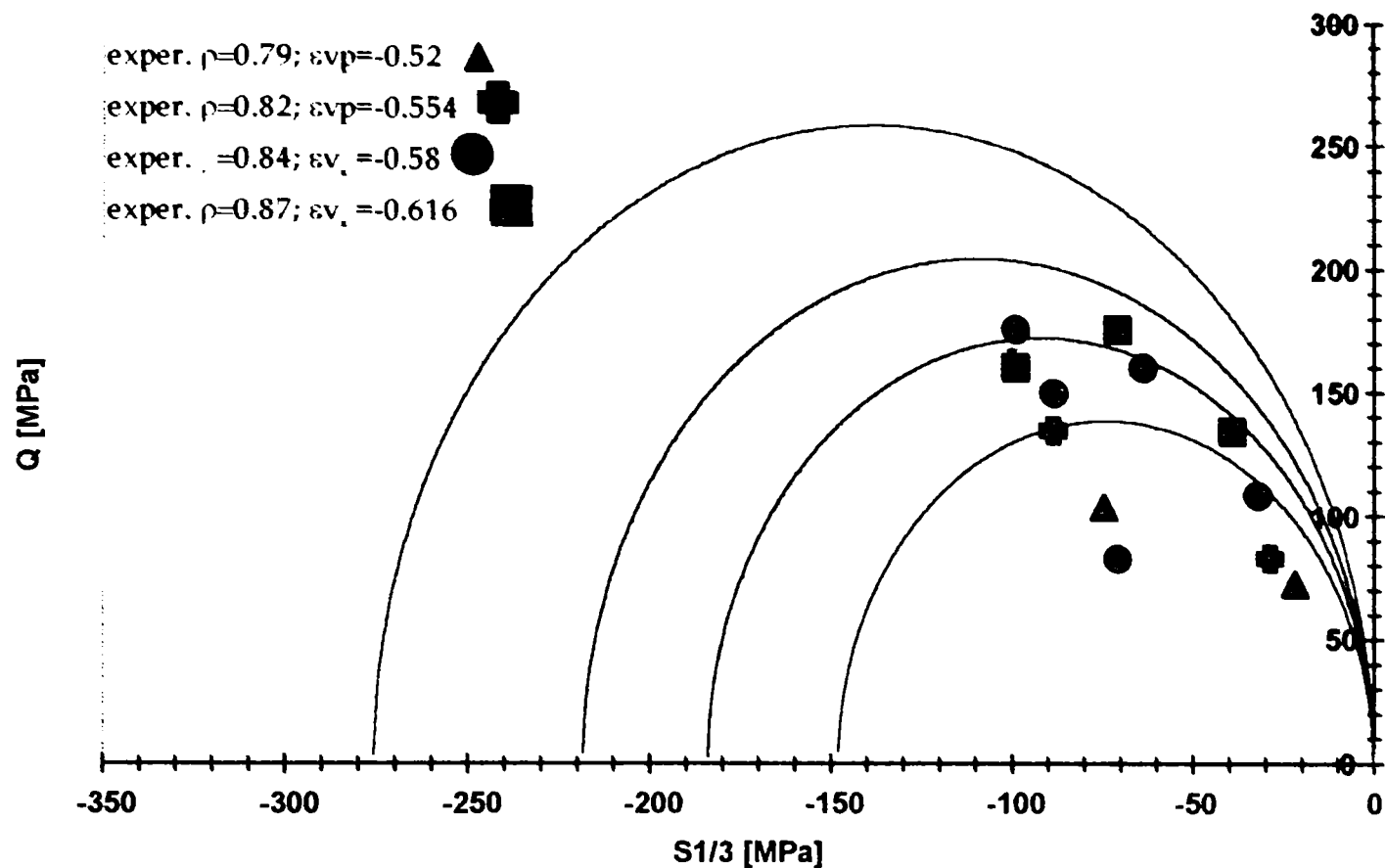


Fig.III.7. Suprafețe de încărcare Cam-clay și încercări triaxiale supraconsolidate .

în matrită; parametrii modelului Cam-clay s-au obținut pornind de la încercările de compresiune izotropă și în matrită.

În figurile III.1 și III.5 se remarcă faptul că modelul propus descrie foarte bine rezultatele încercărilor de compresiune simplă, pe care modelul Cam-clay nu poate să le descrie în mod corect.

Suprafețele de plasticitate ale modelului propus trec exact prin punctele corespunzătoare încercărilor izotrope; elipsele modelului Cam-clay trec suficient de aproape de punctele izotrope.

Punctele corespunzătoare compresiunii în matrită sunt reproduse mai bine de către suprafețele de încărcare ale modelului propus.

Figurile III.2. și III.6. prezintă suprafețele de plasticitate ale celor două modele și rezultatele încercărilor triaxiale normal consolidate. Cele două categorii de suprafețe de plasticitate sunt relativ îndepărtate de punctele experimentale.

Figurile III.3. și III.7. prezintă cele două modele și rezultatele încercărilor triaxiale supraconsolidate. Suprafețele de plasticitate ale modelului propus sunt mai apropiate de datele experimentale decât cele ale modelului Cam-clay.

Modelul propus prevede comportamentul pulberii în tracțiune izotropă; în schimb, modelul Cam-clay nu prevede un astfel de comportament.

III.3. Cap model

Cap modelul lui DiMaggio și Sandler, modificat de către Häggblad a fost prezentat succint în capitolul I (paragraful 1.2.6) ; cap modelul este compus dintr-o suprafață de ruptură f_1 (o combinație a suprafețelor Drucker – Prager și Von Mises) de ecuație:

$$f_1 = \bar{S}_2 - [A - C \cdot \exp(B \cdot S_1)] \quad (III.7)$$

și dintr-o suprafață ecrusabilă f_2 (capul) de forma eliptică, care are formularea următoare :

$$f_2 = \bar{S}_2 - \frac{1}{R} \sqrt{(X-L)^2 - (S_1-L)^2} = 0 \quad (III.8)$$

cu : S_1 – primul invariant al tensorului tensiunilor;

\bar{S}_2 - al doilea invariant al deviatorului tensorului tensiunilor;

L și X – funcții care definesc poziția capului de-a lungul axei hidrostatice ;

A, B, C și R – parametrii de material .

III.3.1. Funcționarea modelului

III.3.1.1. Densificarea: funcția f_2

Figura III.8 va fi utilizată pentru a ilustra funcționarea modelului.

Mecanismul de densificare este modelat cu ajutorul unei suprafețe de plasticitate ecrusabilă, f_2 , de formă eliptică. Parametrul de ecrusare este deformația volumică plastică sau densitatea ; acest mecanism va fi descris în cele ce urmează pe baza unei sollicitări triaxiale normal consolidate :

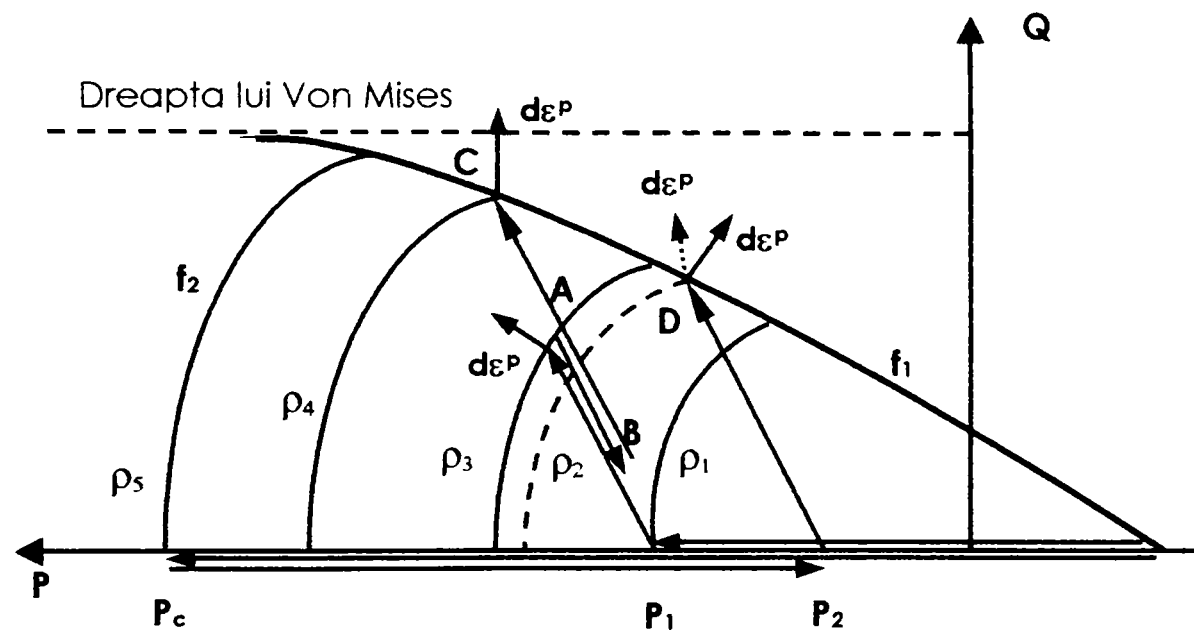


Fig.III.8. Funcționarea Cap modelului.

Pulberea se presează inițial la presiunea izotropă P_1 și ajunge la densitatea relativă ρ_1 . Câmpul de tensiuni este delimitat de Capul corespunzător acestei densități ; domeniul elastic este delimitat de acest Cap și de porțiunea din curba f_1 corespunzătoare.

În continuare comprimatul se solicită axial și tensiunile cresc până în punctul A. Modelul fiind asociat, densitatea crește până la valoarea ρ_3 odată cu creșterea tensiunii și antrenează suprafața de încărcare (funcția Cap). Se diminuează tensiunea axială care solicită comprimatul dar densitatea acestuia rămâne constantă. Descărcarea este elastică și suprafața de

încărcare nu se schimbă. La reîncărcarea axială, comportamentul materialului rămâne elastic până când starea de tensiune corespunde din nou punctului A. Dacă se continuă compresiunea, comportamentul materialului redevine plastic și Capul se "deplasează" cu creșterea densității. Acest mecanism se desfășoară până când starea de tensiune va corespunde punctului C, de tranziție dintre Cap (f_2) și suprafața de rupătură (f_1). În acest punct, vectorul curgere plastică (aparținând de f_2) este vertical, starea critică este atinsă și deformarea continuă la volum și tensiuni constante.

III.3.1.2. Dilatanța : funcția f_1

Mecanismul de dilatanță este descris cu ajutorul unei suprafețe de plasticitate perfectă f_1 , independentă de variabila de ecrusare, cu ajutorul unei încercări triaxiale supraconsolidate :

Pulberea se presează izotrop până la presiunea P_c , când va avea densitatea ρ_s . Suprafața de plasticitate este definită de Capul corespunzător acestei densități și de porțiunea aferentă din f_1 . Se diminuează presiunea până la P_2 , densitatea și suprafața de plasticitate rămân constante și are loc o descărcare elastică. Se solicită apoi axial comprimatul ; comportamentul materialului este elastic până când starea de tensiune corespunde punctului D de pe suprafața de rupătură. În acest punct, vectorul curgere plastică asociat suprafeței f_1 indică diminuarea densității comprimatului. Si suprafața Cap se va diminua cu scăderea densității ; fenomenul continuă până ce materialul atinge densitatea ρ_2 corespunzătoare Capului care trece prin D.

Mecanismul de dilatanță este definit de o funcție care nu depinde de densitatea pulberii, ci doar de starea de tensiune, ceea ce înseamnă că pentru o stare de solicitare dată, limita de elasticitate este atinsă în același punct, oricare ar fi densitatea materialului.

III.3.2. Cap model modificat

Cap modelul prezentat anterior a fost modificat astfel ca suprafața de rupură să poată evolua cu densitatea, astfel (Fig.III.9) :

$$f_1 = Q - P \cdot \operatorname{tg} \beta - d \quad (\text{III.9})$$

$$f_2 = \sqrt{(P - P_a)^2 + (R \cdot Q)^2} - R \cdot (d + P_a \cdot \operatorname{tg} \beta) \quad (\text{III.10})$$

cu : $P = S_1/3$;

P_a = presiunea medie corespunzătoare punctului de tranziție dintre cele două mecanisme ;

d = coeziunea materialului, definită prin limita de rupere la forfecare a comprimatului ;

β = unghiul de frecare internă ;

Parametrii d și β depind de densitatea materialului.

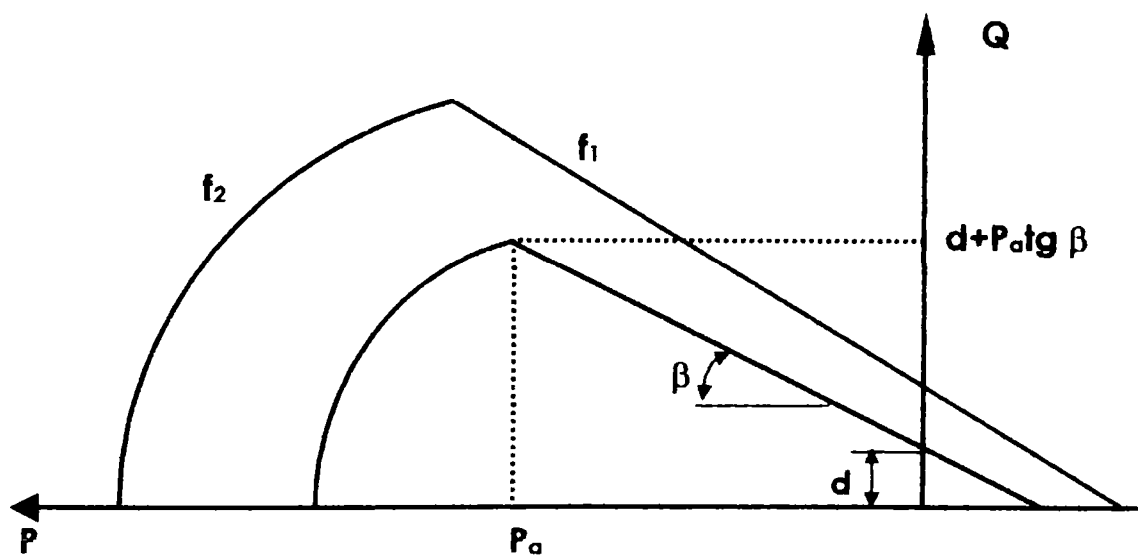


Fig.III.9. Cap model modificat - suprafețe de încărcare .

Legea de curgere corespunzătoare acestui model are două părți, o parte asociată $g_2 = f_2$, pentru a descrie mecanismul de densificare și o parte

neasociată, $g_1 \neq f_1$ pentru mecanismul dilatant. Ecuațiile acestor funcții au forma următoare :

$$g_1 = \sqrt{[(P - P_a) \cdot \operatorname{tg} \beta]^2 + Q^2} - (d + P_a \cdot \operatorname{tg} \beta) \quad (\text{III.11})$$

$$g_2 = f_2 = \sqrt{(P - P_a)^2 + (R \cdot Q)^2} - R \cdot (d + P_a \cdot \operatorname{tg} \beta) \quad (\text{III.12})$$

g = potențialul plastic.

Pentru fiecare mecanism se poate determina multiplicatorul plastic $d\lambda$, făcând demersul următor :

Dacă suprafața de încărcare are ecuația : $f(\sigma, \varepsilon_v^p) = 0$, atunci derivata ei în raport cu timpul este :

$$df(\sigma_{ij}, \rho) = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$\text{și : } d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g(\sigma_{ij}, \rho)}{\partial \sigma_{ij}} .$$

cu $d\lambda$ = multiplicatorul plastic.

Relația (III.13) se scrie explicit :

$$\frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial Q} dQ + \frac{\partial f}{\partial \rho} d\rho = 0 \quad (\text{III.14})$$

Tinând cont de expresia deformației volumice și de concluzia lui Pavier (PAVIER 1998) că deformațiile elastice sunt neglijabile față de deformațiile plastice :

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} = -d\varepsilon_v^p = -d\lambda \frac{\partial g}{\partial P} \quad (\text{III.15})$$

-înmulțind și împărțind cu ρ ultimul termen al relației (III.14) și înlocuind $d\rho/\rho$

din (III.15) în (III.14), se obține expresia generală a multiplicatorului plastic :

$$d\lambda = - \frac{\frac{\partial f}{\partial P} dP + \frac{\partial f}{\partial Q} dQ}{\rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \frac{\partial g}{\partial P}} \quad (III.16)$$

Pentru mecanismul dilatant ($g_1 \neq f_1$):

$$\frac{\partial f_1}{\partial P} = -\operatorname{tg}\beta \quad (III.17)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial Q} = 1 \quad (III.18)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \rho} = -P \cdot (1 + \operatorname{tg}^2\beta) \cdot \frac{\partial \beta}{\partial \rho} - \frac{\partial d}{\partial \rho} \quad (III.19)$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial P} = \frac{(P - P_a) \cdot \operatorname{tg}^2\beta}{\sqrt{[(P - P_a) \cdot \operatorname{tg}\beta]^2 + Q^2}} \quad (III.20)$$

Înlocuind (III.17), (III.18), (III.19) și (III.20) în relația (III.16), obținem expresia multiplicatorului plastic pentru mecanismul de dilatare :

$$d\lambda_1 = \frac{-\operatorname{tg}\beta \cdot dP + dQ}{\rho \left[P \cdot (1 + \operatorname{tg}^2\beta) \frac{d\beta}{d\rho} \right] \cdot \frac{(P - P_a) \cdot \operatorname{tg}^2\beta}{\sqrt{[(P - P_a) \cdot \operatorname{tg}\beta]^2 + Q^2}}} \quad (III.21)$$

Pentru mecanismul de densificare :

$$\frac{\partial f_2}{\partial P} = \frac{P - P_a}{\sqrt{(P - P_a)^2 + (R \cdot Q)^2}} \quad (III.22)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial Q} = \frac{R^2 \cdot Q}{(P - P_a)^2 + (R \cdot Q)^2} \quad (III.23)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \rho} = \frac{-(P-P_a) \cdot \frac{dP_a}{d\rho} + R \cdot Q^2 \frac{dR}{d\rho}}{\sqrt{(P-P_a)^2 + (R \cdot Q)^2}} - (d+P_a \operatorname{tg}\beta) \cdot \frac{dR}{d\rho} - R \left(\frac{dd}{d\rho} + \frac{dP_a}{d\rho} \operatorname{tg}\beta + (1 + \operatorname{tg}^2\beta) \cdot P_a \frac{d\beta}{d\rho} \right)$$

(III.24)

Înlocuind (III.22), (III.23) și (III.24) în relația (III.16), obținem expresia multiplicatorului plastic pentru mecanismul de densificare:

$$d\lambda_2 = \frac{(P-P_a)dP + R^2 \cdot QdQ}{\rho(P-P_a) \left[\frac{(P-P_a) \frac{dP_a}{d\rho} + R \cdot Q^2 \frac{dR}{d\rho}}{\sqrt{(P-P_a)^2 + (R \cdot Q)^2}} + (d+P_a \operatorname{tg}\beta) \frac{dR}{d\rho} + R \left[\frac{dd}{d\rho} + \frac{dP_a}{d\rho} \operatorname{tg}\beta + (1 + \operatorname{tg}^2\beta) \frac{d\beta}{d\rho} \right] \right]}$$

(III.25)

III.3.3. Calarea Cap modelului modificat pe rezultatele experimentale

Parametrii modelului sunt d , $\operatorname{tg}\beta$, P_a și R .

Încercarea la forfecare a comprimatelor obținute prin presare unidirecțională în matriță a pulberii de fier (PAVIER 1998) dă imediat parametrul d (limita de rupere la forfecare a comprimatelor).

Condiția ca suprafața de ruptură (f_1) să treacă prin punctele de compresiune simplă conduce la calculul parametrului $\operatorname{tg}\beta$ (relația III.26); în acest scop, în relația (III.9) se înlocuiesc P și Q cu valorile presiunii medii, respectiv tensiunii deviatoare obținute în urma solicitării de compresiune simplă a comprimatelor din pulbere de fier (a se vedea Fig. V.30).

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{Q-d}{P} \quad (\text{III.26})$$

Pentru a determina ceilalți doi parametri, P_a și R , se pun două condiții :

1. funcția Cap să treacă prin punctele de presare izostatică (în relația (III.27), P se înlocuiește cu presiunea medie – P_{izo} - obținută prin presarea izostatică a pulberii de fier – Fig. V.27).
2. funcția Cap să treacă prin punctele de presare unidirecțională în matriță (în relația (III.27), P și Q se înlocuiesc cu presiunea medie, - P_{matr} - respectiv tensiunea deviatoare - Q_{matr} - obținute prin presarea unidirecțională în matriță a pulberii de fier – Fig. V.18).

Cele două condiții formează un sistem de două ecuații cu două necunoscute a cărui rezolvare conduce la o ecuație de gradul 3 cu necunoscuta P_a , de forma :

$$a \cdot P_a^3 + b \cdot P_a^2 + c \cdot P_a + e = 0 \quad (\text{III.27})$$

în care coeficienții a , b , c și e sunt dați de relațiile (III.28) :

$$\begin{aligned} a &= 2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (P_{izo} - P_{matr}) \\ b &= Q_{matr}^2 + \operatorname{tg}^2\beta \cdot (P_{matr}^2 - P_{izo}^2) + 4 \cdot d \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (P_{izo} - P_{matr}) \\ c &= 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (P_{matr}^2 - P_{izo}^2) + 2 \cdot d^2 \cdot (P_{izo} - P_{matr}) - 2 \cdot P_{izo} \cdot Q_{matr}^2 \\ e &= d^2 \cdot (P_{matr}^2 - P_{izo}^2) + P_{izo}^2 \cdot Q_{matr}^2 \end{aligned} \quad (\text{III.28})$$

Pentru rezolvarea ecuației de gradul 3 s-a folosit programul Mathcad.

Parametrii d , $\operatorname{tg}\beta$, P_a și R au fost obținuți utilizând datele experimentale pentru densitățile relative : 0.75, 0.8 și 0.87.

In figura III.10 s-au reprezentat suprafețele de încărcare corespunzătoare cap-modelului și datele experimentale pentru presare în matriță, presare izostatică și compresiune simplă.

In figurile III.11 și III.12 s-au reprezentat suprafețele de plasticitate corespunzătoare cap-modelului și respectiv rezultatele încercărilor triaxiale normal consolidate și supraconsolidate efectuate pentru pulbera de fier.

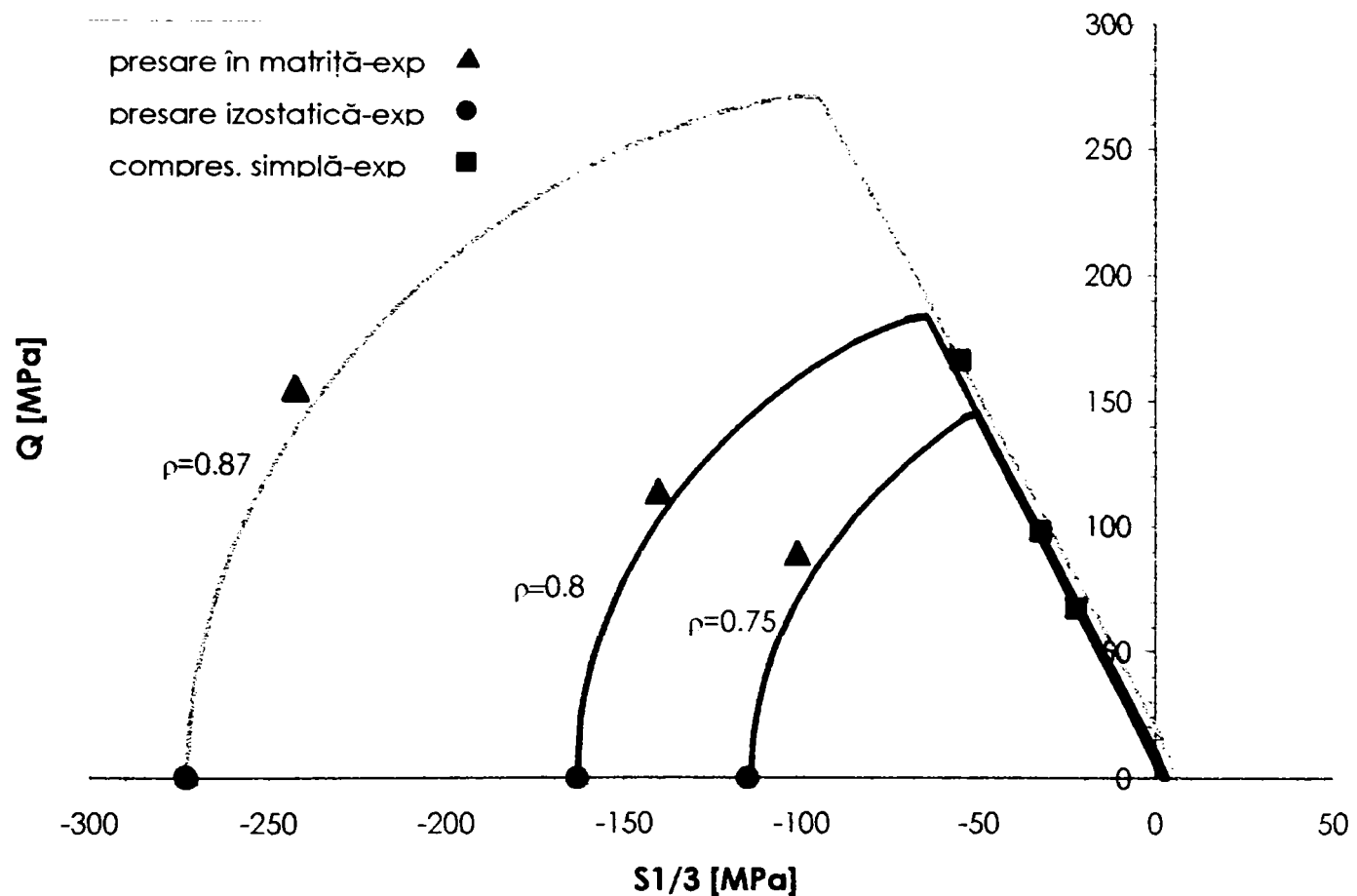


Fig.III.10.Suprafețele de încărcare Cap model și rezultate experimentale.

III.3.4. Comparație între modelul propus și modelul Cam-clay modificat

Comparația are ca obiect reproductibilitatea rezultatelor experimentale și prezicerea comportamentului pulberii la sollicitarea de tracțiune izotropă.

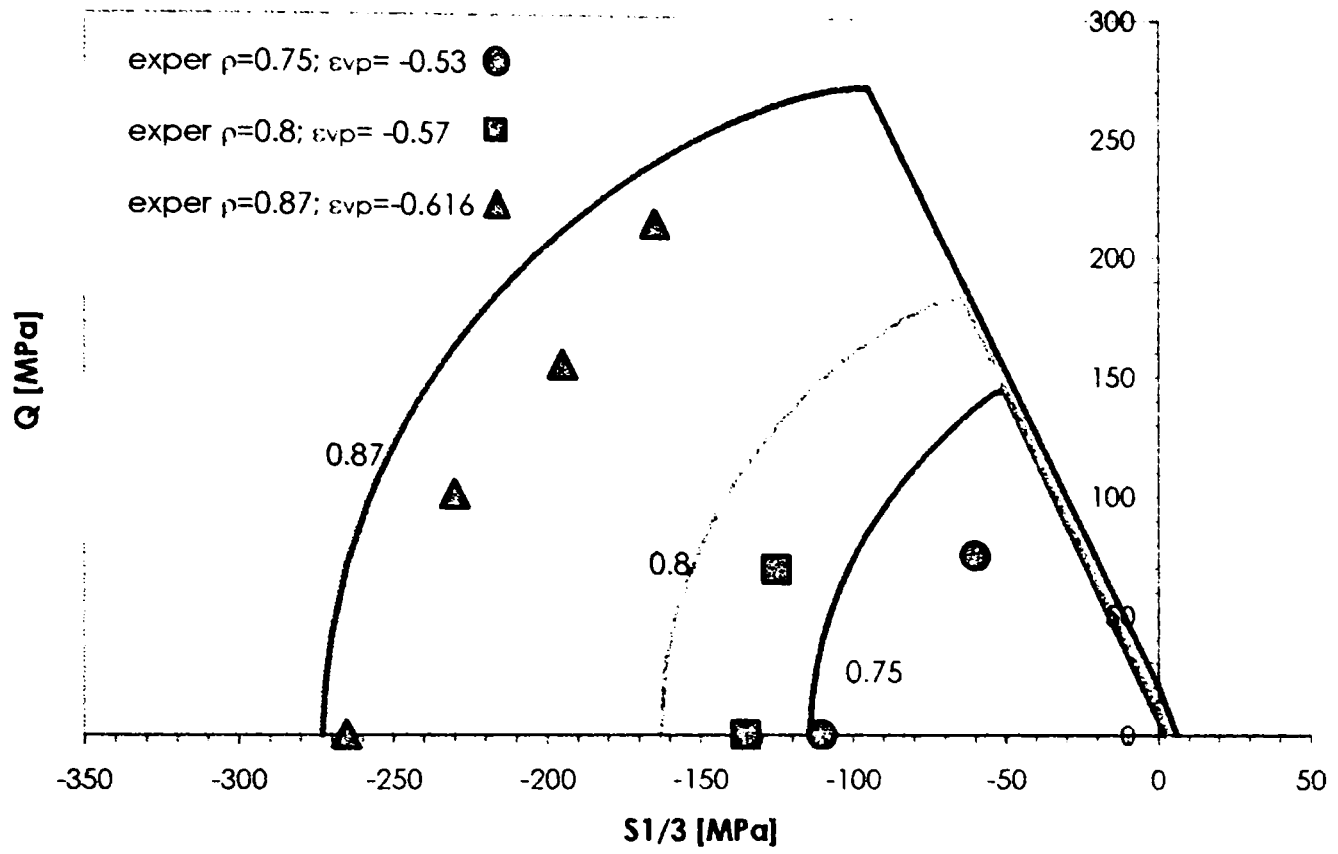


Fig.III.11. Suprafețele Cap model și încercările triaxiale normal consolidate .

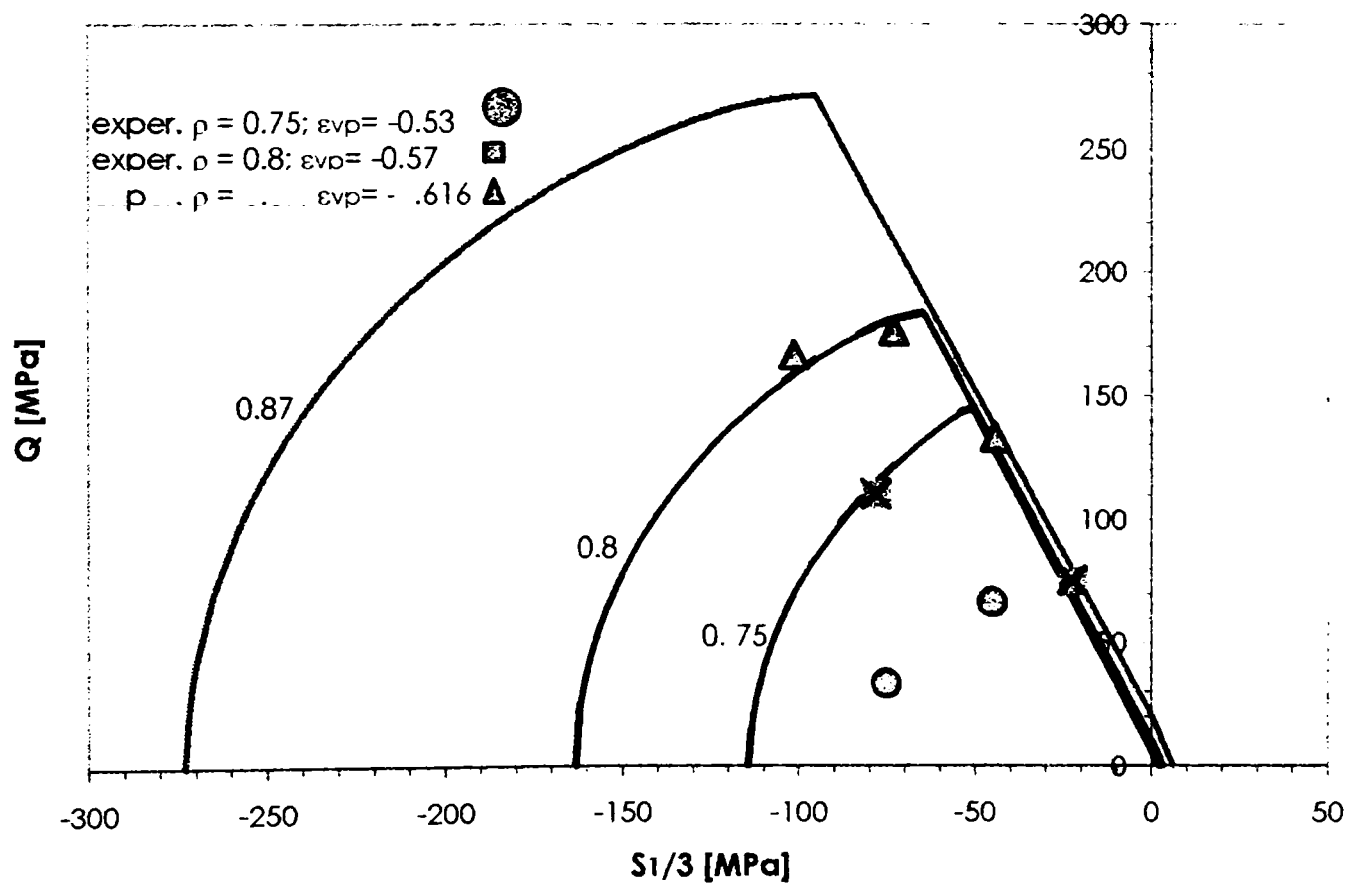


Fig.III.12. Suprafețele de încărcare Cap model și încercările triaxiale supra-

consolidate.

Cele două modele au fost calate pe încercările experimentale efectuate pe pulberea de fier, numărul de solicitari utilizate depinzând de numărul parametrilor modelelor ; și anume, identificarea parametrilor pentru ambele modele s-a făcut folosind rezultatele încercărilor de compresiune simplă, izotropă și în matriță. În figurile III.1 și III.10 se remarcă faptul că atât modelul propus, cât și Cap modelul descriu foarte bine rezultatele încercărilor experimentale.

Figurile III.2. și III.11. prezintă suprafețele de plasticitate ale celor două modele și rezultatele încercărilor triaxiale normal consolidate. Cele două categorii de suprafețe de încărcare sunt relativ îndepărtate de punctele experimentale.

Figurile III.3. și III.12. prezintă cele două modele și rezultatele încercărilor triaxiale supraconsolidate. Suprafețele de încărcare ale modelului propus sunt mai apropiate de datele experimentale decât cele ale Cap modelului.

Ambele modele prevăd comportamentul pulberii în tracțiune izotropă.

III.4.Concluzie

În urma studiului efectuat în acest capitol se constată că modelul propus este adecvat descrierii comportamentului pulberii de fier utilizate ; modelul propus descrie mult mai bine rezultatele încercărilor de compresiune simplă, izotropă, și cele ale încercărilor de compresiune în matriță, decât modelul Cam-clay modificat.

Modelul propus și Cap modelul modificat descriu cam în același mod rezultatele încercărilor sus numite.

În ceea ce privește reproducerea rezultatelor încercărilor triaxiale normal consolidate și a celor supraconsolidate, se remarcă modelele propus și Cap modelul modificat.

Modelul propus prevede comportamentul pulberii în tracțiune izotropă, spre deosebire de modelul Cam-clay modificat.

IV. STUDIU EXPERIMENTAL

IV.1. Realizarea pieselor din pulberi metalice prin presare la temperatura ambiantă

Formarea pieselor din pulberi metalice este procedeul cel mai des utilizat în industrie deoarece are o productivitate mare datorită mecanizării și automatizării, necesită puține prelucrări ulterioare, determină economie de material și se poate adapta la schimbările de profil ale producției.

Presarea la temperatura ambiantă are ca scop obținerea unui obiect de formă și dimensiuni determinate numit "comprimat" care are o coeziune suficientă pentru ca să poată fi manipulat și să poată fi supus operației ulterioare de sinterizare. Densitatea comprimatului trebuie să aibă o anumită valoare pentru a obține dimensiunile și proprietățile mecanice și fizice dorite pentru piesa finală. În figura IV.1 este prezentată schema de principiu a presării la temperatura ambiantă (Italian Metal Powder Industries Association).

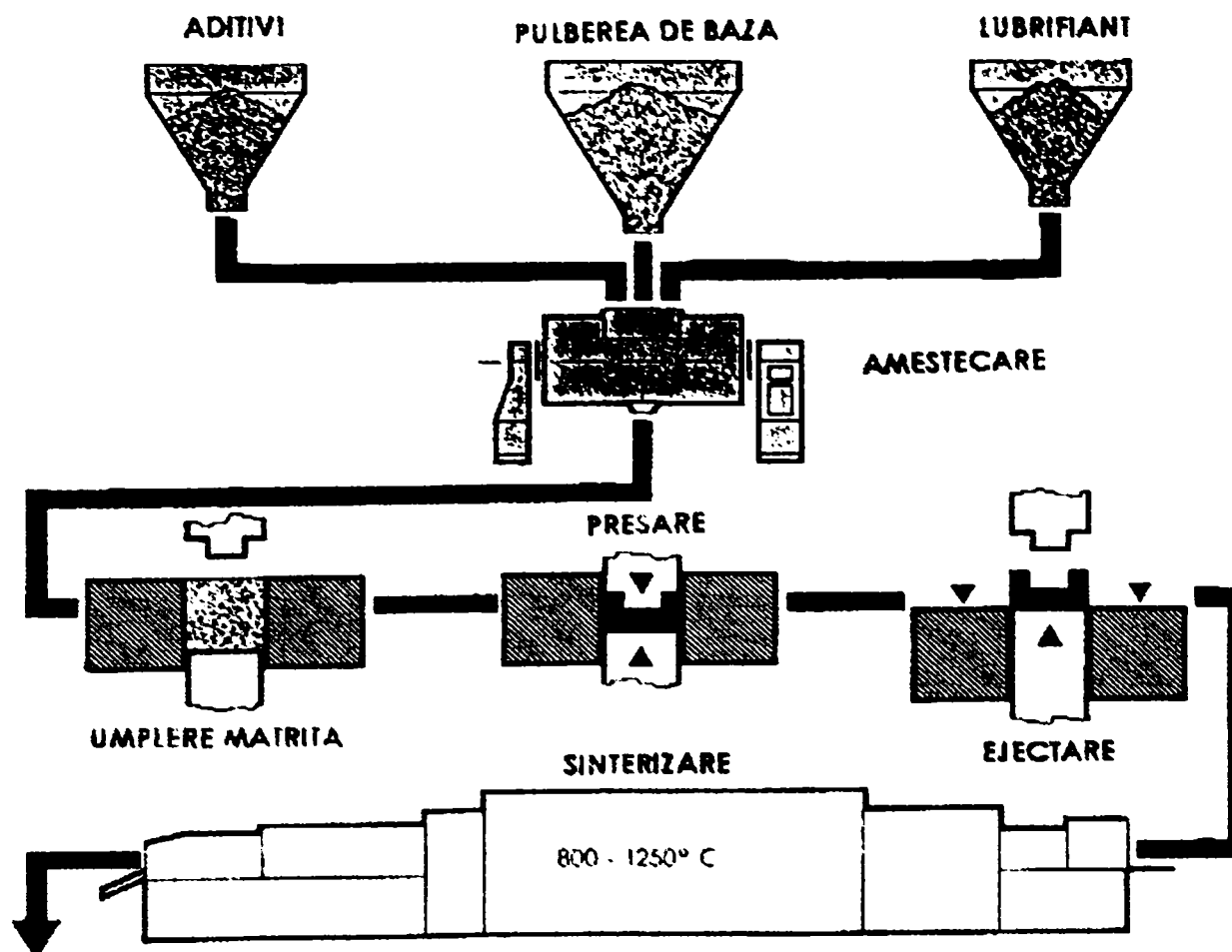


Fig.IV.1 Schema de principiu a presării la temperatura ambiantă.

Metodele pentru formarea la temperatura ambiantă a pieselor din pulberi metalice se clasifică în **metode de formare cu aplicarea presiunii**:

- presarea unidirecțională (în matriță),
- presarea izostatică,
- presarea triaxială,
- extrudarea,
- laminarea pulberilor ,
- presarea continuă,
- compactarea prin vibrații;

și **metode de formare fără aplicarea presiunii**.

IV.1.1.Consolidarea pulberilor metalice în timpul presării la temperatura ambiantă

Compactizarea și consolidarea amestecurilor de pulberi în cursul operațiilor de presare se realizează prin următoarele procese care se produc în structura pulberii (PETRESCU, 1981):

a) reorientarea particulelor, alunecarea lor reciprocă și umplerea golurilor; acestea sunt procese care tind să asigure amestecului de pulberi împachetarea cea mai densă posibilă la dimensiunile și forma dată a particulelor; în această etapă a presării, particulele pulberii își păstrează individualitatea, dar volumul specific și porozitatea amestecului scad, iar densitatea crește.

b) deformarea plastică a particulelor individuale și sudarea lor prin presiune (Fig.IV.2); sub acțiunea forței de compresiune se produce apropierea atomilor mărginași ai particulelor aflate în contact; între atomi apar forțe de atracție interatomice care variază conform curbei din figura IV.3. Prin sudarea sub presiune a particulelor de pulbere se realizează nu numai creșterea densității comprimatului, ci și consolidarea sa propriu-zisă, întrucât zonele de legătură dintre particule (realizate prin sudare) sunt stabile și au rezistență mecanică.

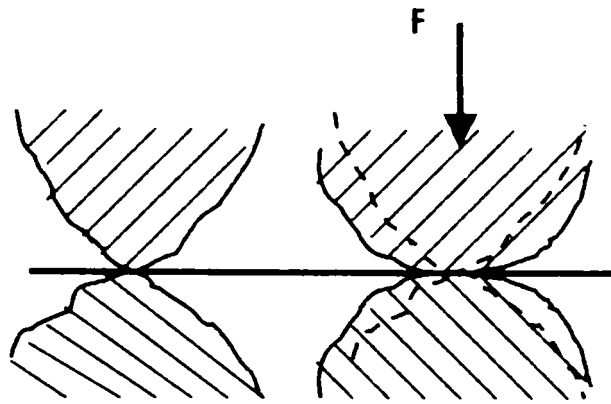


Fig.IV.2. Sudarea prin presiune a particulelor .

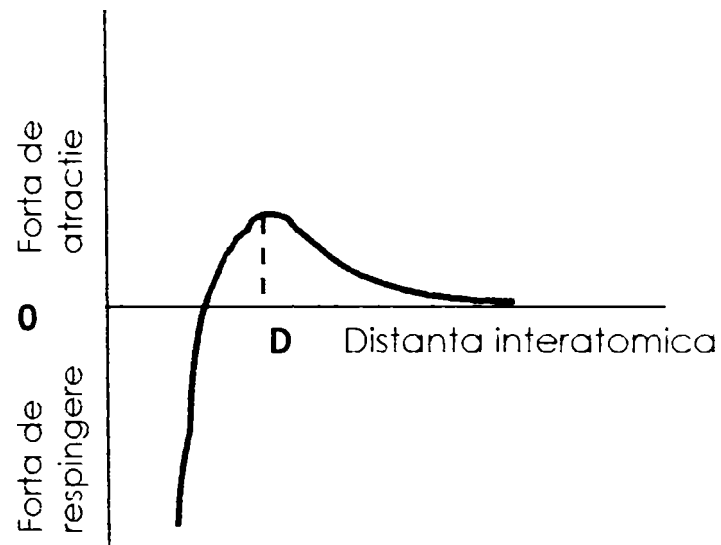


Fig.IV.3.Curba de variație a forțelor interatomice (Meyer).

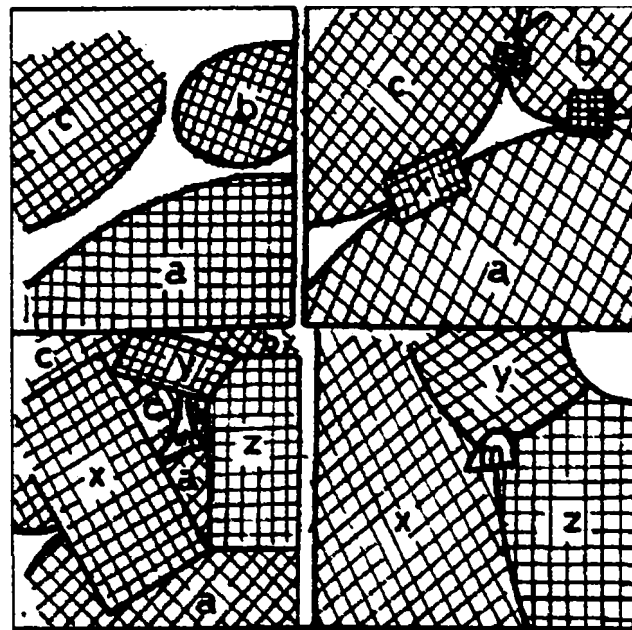


Fig.IV.4. Sinterizarea la rece a particulelor de pulbere metalică.

În această etapă a presării, în structura comprimatului se produce un început de pierdere a individualității particulelor de pulbere prin legarea lor în zonele de sudură.

O altă teorie (DOMSA, 1966) consideră că are loc o sinterizare la temperatura ambiantă, datorită deformărilor locale la "rece" – Fig.IV.4; conform acestei figuri, toate legăturile dintre cristalele pulberii presate sunt reduse la fenomenul de difuzie cauzat de deformări locale la rece; ca urmare, apar tensiuni și centre de recristalizare în punctele de contact ale granulelor de pulbere. Punctele de contact ale cristalelor sunt puncte de pornire pentru recristalizare, prin care rețelele noi, stabile, consumă rețelele vechi, instabile, până când se ajunge la o recristalizare totală.

IV.1.2. Presarea unidirecțională

Presarea unidirecțională (Fig.IV.5, BOUVARD, 1994) este metoda de formare cea mai utilizată, prin care pulberea care umple cavitatea matriței este comprimată în direcție verticală. Se efectuează în matrițe confecționate din oțel sau carbură de tungsten, cu o bună calitate a suprafeței, montate pe prese mecanice sau hidraulice; presiunea este transmisă pulberii prin intermediul unuia sau mai multor poansoane din oțel care prezintă un joc de ordinul 5 – 25 μm față de matriță, joc care permite evacuarea aerului închis între granulele de pulbere. Presiunea utilizată variază de la 100 la 1000 MPa, în funcție de plasticitatea materialului și de densitatea dorită pentru produsul final. Coeziunea comprimatului este obținută prin contactul direct dintre particulele de pulbere. Se utilizează un lubrifiant sub formă de pulbere (de exemplu, stearat de zinc), care reduce frecarea pulbere–matriță, ameliorează compresibilitatea pulberii și micșorează de 3 până la 5 ori presiunea necesară pentru ejectarea comprimatului.

La nivel industrial se folosesc mai multe procedee pentru a realiza presarea unidirecțională:

- presarea unidirecțională cu simplă acțiune, caracterizată prin aceea că atât matrița cât și poansonul inferior sunt fixe, presiunea aplicându-se prin intermediul poansonului superior care pătrunde în matriță;
- presarea unidirecțională cu dublă acțiune, caracterizată prin deplasarea celor două poansoane, inferior și superior, față de matrită, în timpul comprimării; se obțin distribuții de densități relativ uniforme.
- presarea unidirecțională cu matriță mobilă, folosită pentru obținerea de comprimate de grosime mare și cu densitate relativ constantă;
- presarea unidirecțională cu poansoane multiple, caracterizată prin aceea că se folosesc atâtea poansoane cu mișcare independentă câte secțiuni cu înălțime diferită are viitoarea piesă.

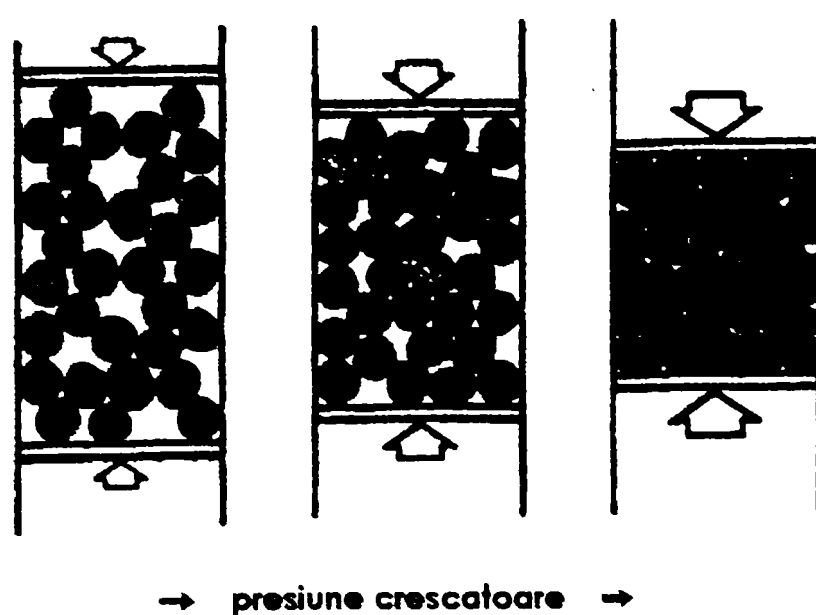


Fig.IV.5. Principiul presării unidirecționale.

La scoaterea comprimatului din matriță se manifestă un fenomen de relaxare elastică ce determină o mărire a dimensiunilor comprimatului atât în direcția presării cât și perpendicular pe aceasta și apare pericolul fisurării acestuia la ejectare (Fig.IV.6, DOWSON, 1990).

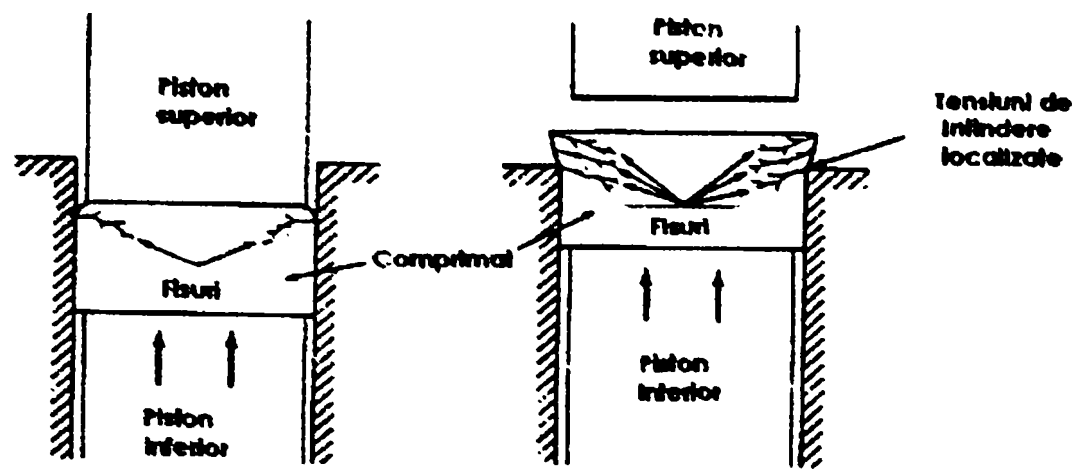


Fig.IV.6. Fisurarea comprimatului la ejectare.

IV.1.2.1. Studiul mijloacelor de laborator utilizate pentru presarea unidirecțională

Încercarea cea mai rudimentară constă în măsurarea forței axiale de compresiune și a densității comprimatului după ejectare. În acest caz se determină variația densității medii în funcție de tensiunea axială aplicată (HECKEL 1961, HEWIT & al 1965, HIRSCHORN 1969, LUKASIEWICZ 1978, HARVEY 1980). Această reprezentare provenea din interesul de a cunoaște densitatea medie obținută pentru o presiune de presare dată. Plecând de la aceste încercări, autorii au stabilit modele așa zise "empirice", pentru a lega tensiunea axială de densitate.

Cu aparate mai elaborate se poate măsura continuu forța de compresiune axială în funcție de densitatea pulberii în matrită (MESSING 1982, AURET 1986). Experimentatorii remarcă fenomenul de relaxare elastică datorită diferenței de densitate în matrită și după ejectare.

Unii autori au măsurat tensiunea radială în mai multe puncte de pe conturul comprimatului.

STRIJBOS & al (1977) măsoară tensiunea radială pe pereții matriței la diverse înălțimi și tensiunile axiale la contactul piston-pulbere pentru diferite raze (Fig.IV.7).

În sens radial, captorii măsoară forța exercitată pe bare aflate în contact cu pulberea. Principiul este același pentru măsurătorile axiale, barele fiind înlocuite cu inele concentrice. La fiecare încercare se măsoară tensiunea axială într-un singur punct al probei și tensiunea axială pe un singur inel.

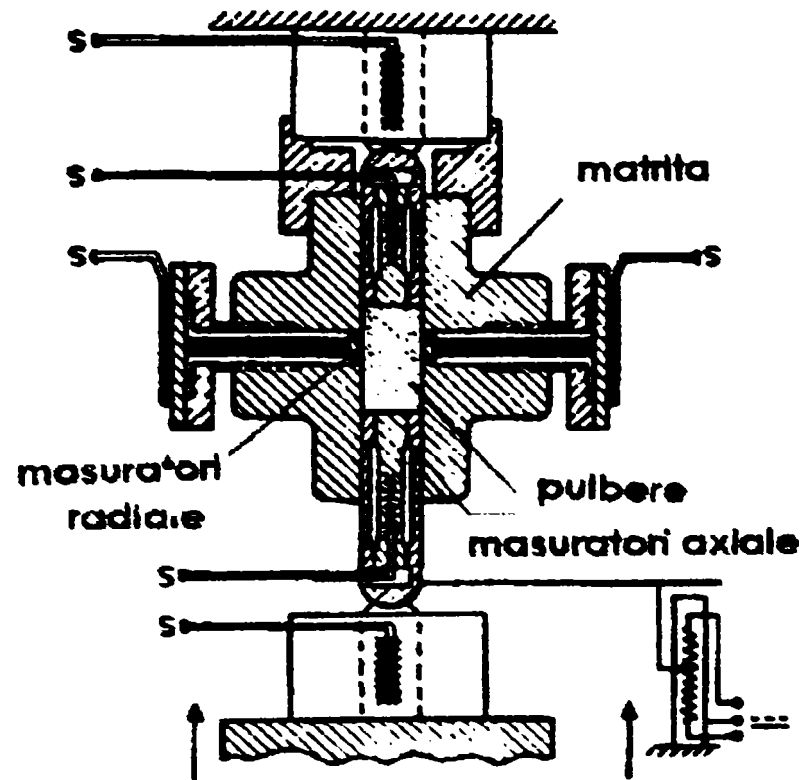


Fig.IV.7. Aparatul pentru presare uniaxială al lui Strijbos.

BROWN & al utilizează un aparat pentru presare biaxială, cu care măsoară presiunile axială și radială prin intermediul unui captor de presiune etalonat în prealabil (Fig.IV.8.).

DIMILLIA & al (1983) utilizează un aparat cu ajutorul căruia studiază transmisia presiunii între tensiunile axiale din partea de sus și de jos ale comprimatului și matriță, pentru presarea unidirecțională cu simplă acțiune (Fig.IV.9). Tensiunea radială se calculează utilizând deformațiile exterioare ale matriței măsurate cu

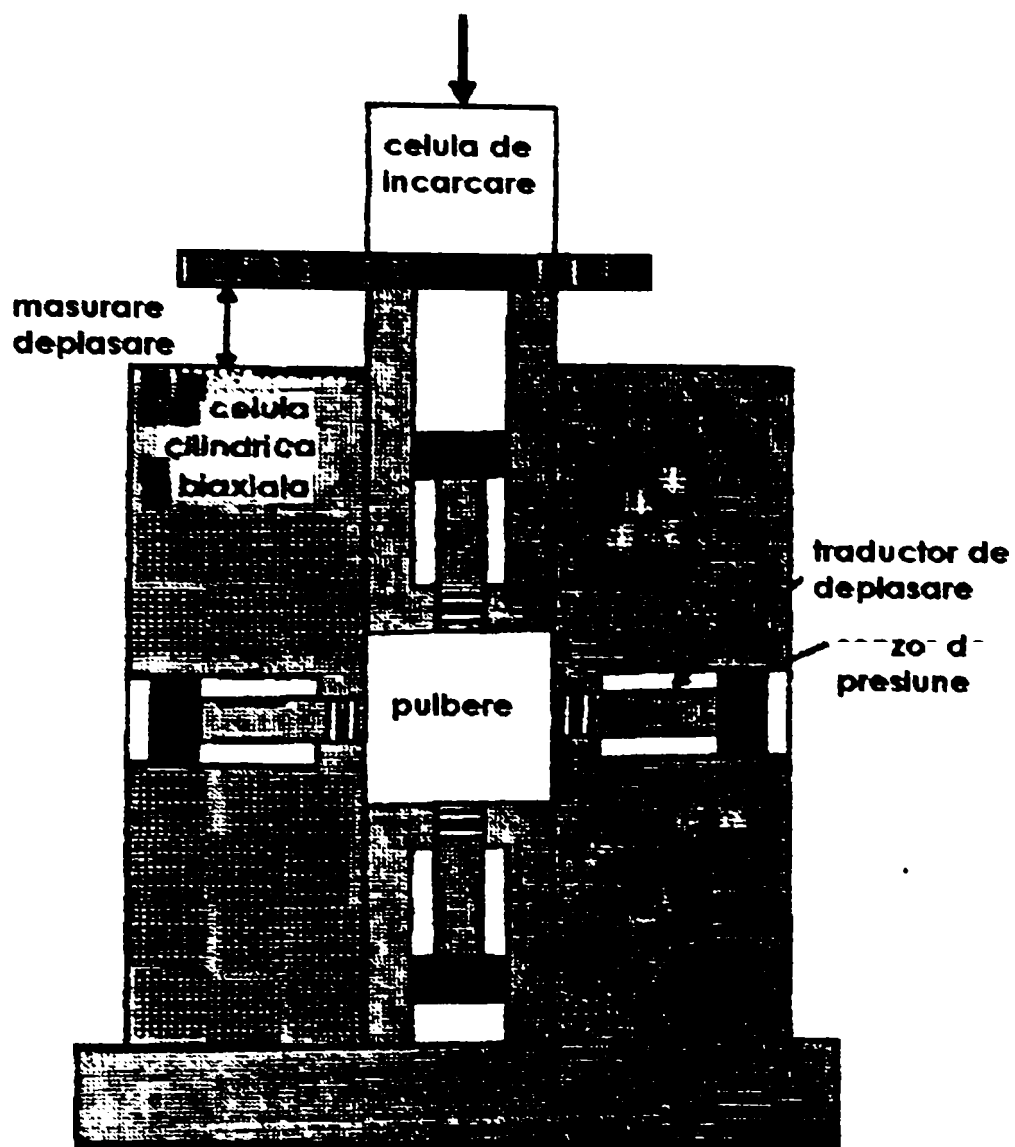


Fig.IV.8. Dispozitivul de presare biaxială al lui Brown.

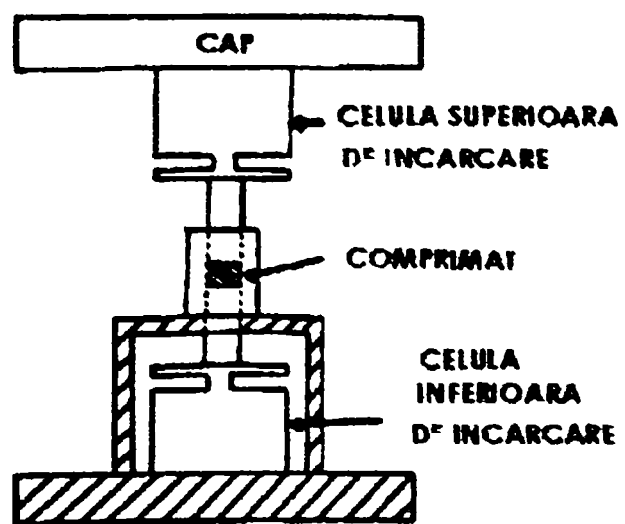


Fig.IV.9. Aparatul lui Dimillia & al.

ajutorul traductorilor rezistivi de pe conturul matriței. DIMILLIA & ai etalonează în prealabil aparatul, presând un eșantion de cauciuc (incompresibil) și măsurând apoi deformația matriței.

BORZMEYER utilizează același principiu pentru determinarea tensiunii radiale, pentru comprimate obținute în matriță mobilă (Fig.IV.10). El utilizează un sistem de cale care nu este prezentat explicit, pentru a asigura în permanență

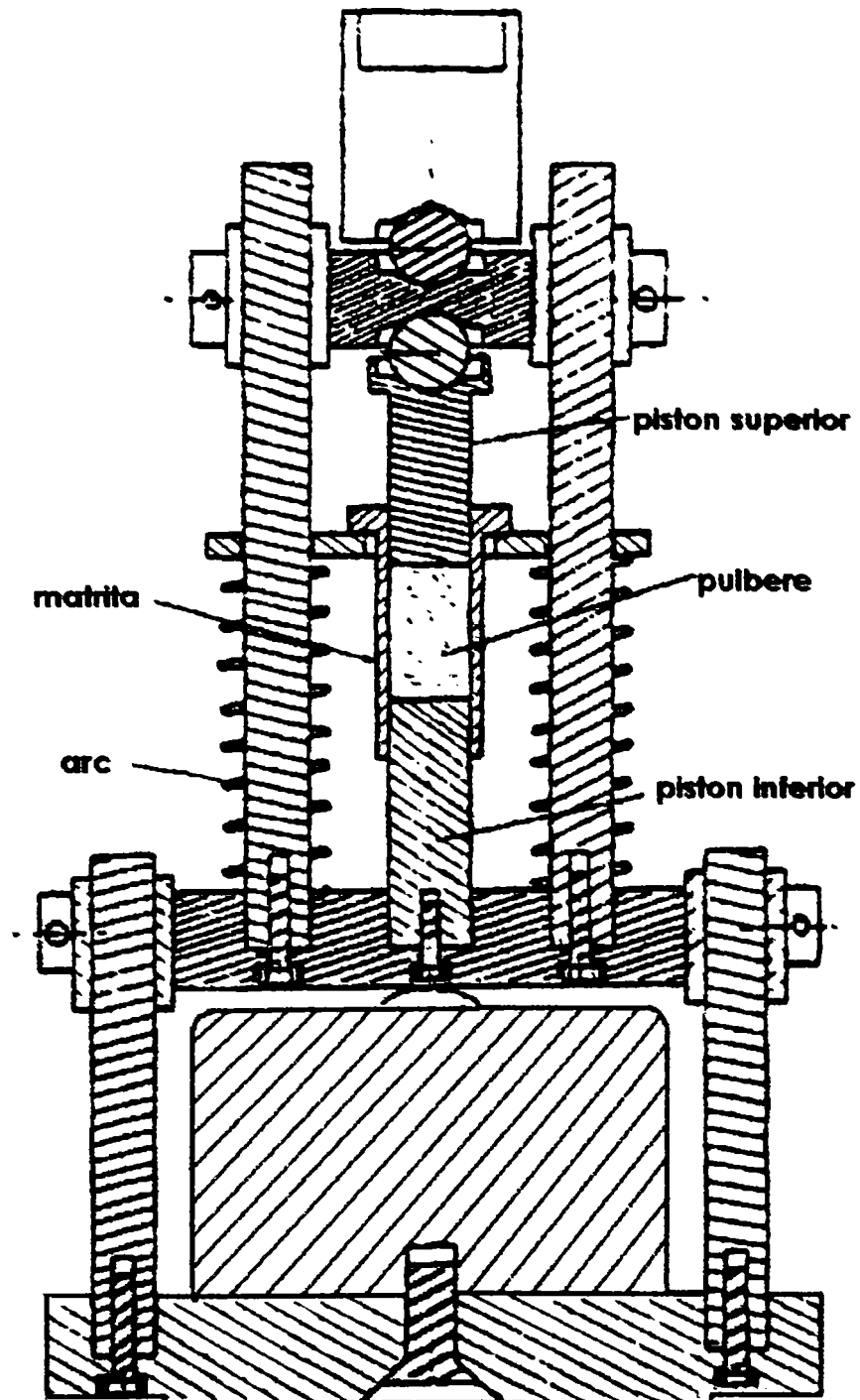


Fig.IV.10. Aparatul utilizat de Borzmeyer.

aceeași poziție a matriței față de pistonul inferior, la sfârșitul încercării. Dispozitivul nu permite efectuarea de măsurători în mod continuu.

În concluzie, numărul mic de dispozitive prezentat arată că măsurarea tensiunilor radiale este puțin utilizată, deși este indispensabilă pentru analiza comportamentului pulberii în timpul presării.

IV.1.3. Presarea izostatică

În cazul presării izostatice, pulberea este conținută într-o matriță flexibilă și etanșă, din cauciuc sau material plastic; ansamblul pulbere-matriță este imersat într-un fluid (apă, gaz) și supus unei presiuni izostatice. Presiunea fluidului este de 200-300 MPa (pană la 500 MPa).

Se folosesc două procedee pentru realizarea presării izostatice:

- presarea izostatică cu pungă umedă, realizată cu presiune de lichid, care se aplică pieselor mari cu formă complexă;
- presarea izostatică cu pungă uscată, care se realizează prin aplicarea presiunii în jurul unei matrițe flexibile confecționată din cauciuc rigid.

În laborator, încercările de compresiune izotropă se pot realiza utilizând celula triaxială.

IV.1.4. Presarea triaxială

Presarea triaxială este o variantă a presării hidrostatice cu pungă uscată, constând în aplicarea unei presiuni axiale (ulei sub presiune) cu ajutorul pistonului, atâta timp cât este menținută presiunea izostatică. Pulberea se introduce într-o matriță de cauciuc închisă ermetic. Presarea triaxială permite obținerea unor piese de densități relativ mari la presiuni joase.

IV.1.4.1. Studiul mijloacelor de laborator utilizate pentru presarea triaxială

Pentru a măsura deformația volumică în timpul solicitării triaxiale se utilizează captori de deplasare aflați în contact direct cu pulberea comprimată (HEHENBERGER & al 1982, BROWN & ABOU-CHEDID 1992) sau se măsoară variația volumului de ulei sau aer conținut în camera de presare (KOERNER 1971, BROESE van GROENOU 1978, DOREMUS & al 1994).

Hehenberger & al măsoară deformațiile comprimatului (precompactat în prealabil la presiune hidrostatică) utilizând plăcile metalice 2 (Fig IV.11) aflate în contact cu pulberea introdusă într-o membrană de cauciuc. Deformațiile axiale se determină pe baza încovoierii brațelor 6 fixate pe plăcile 2. Deformațiile radiale sunt furnizate de traductorii rezistivi montați pe plăcile în U (7). Dispozitivul se folosește pe o mașină universală de 450 tone forță.

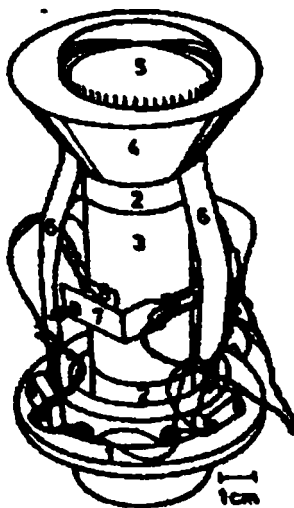


Fig.IV.11. Dispozitiv de compresiune triaxial (Hehenberger & al).

Abou-Chedi & Brown utilizează un dispozitiv original de compresiune triaxială (Fig.IV.12) pentru pulberi metalice, care constă din șase plăci rigide, paralele două câte două, care pot culisa astfel încât din eșantionul inițial cubic să se obțină un comprimat paralelipipedic. Măsurarea dimensiunilor pulberii introduse

În membrana de cauciuc permite calculul deformațiilor specifice, respectiv determinarea variației volumului. Tensiunile pe trei fețe ale paralelipipedului sunt înregistrate de către captorii de presiune.

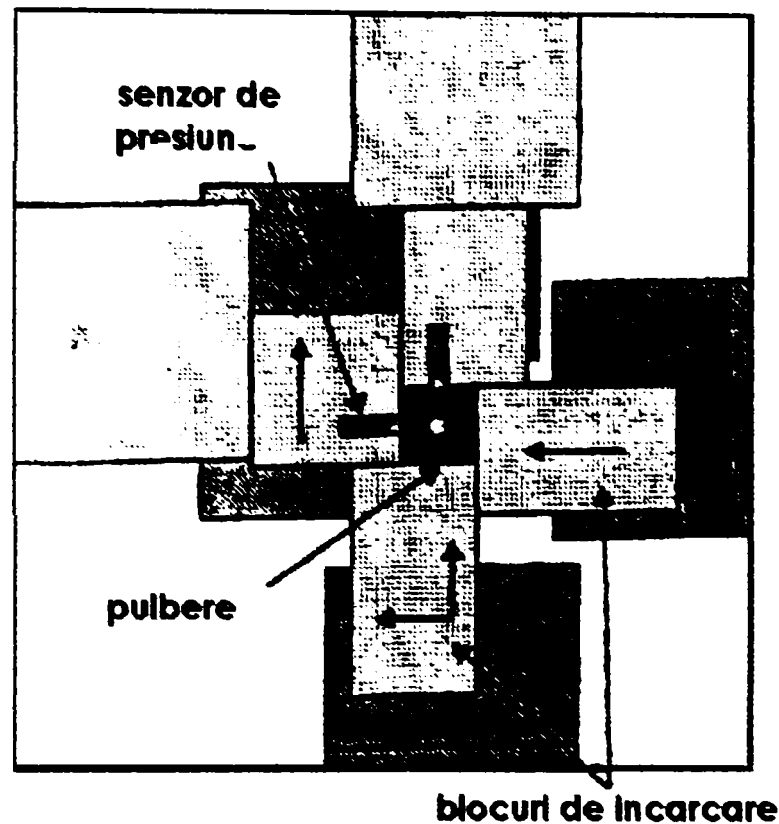


Fig.IV.12. Dispozitiv experimental pentru solicitări triaxiale (Abou-Chedid).

Un dezavantaj al acestui tip de dispozitiv îl reprezintă frecarea dintre plăci, care conduce la crearea de eterogenități în interiorul comprimatului (zone cu densitate mai scăzută în centrul probei). Autorii utilizează un strat de pulbere de teflon pentru diminuarea frecării.

Koerner utilizează un dispozitiv de compresiune triaxială (Fig.IV.13) cu ajutorul căruia măsoară deformațiile pulberii presate doar după descărcarea completă. Presiunea axială este aplicată prin intermediul pistonului de încărcare iar presiunea izostatică este asigurată prin presiunea fluidului introdus prin supapa de alimentare.

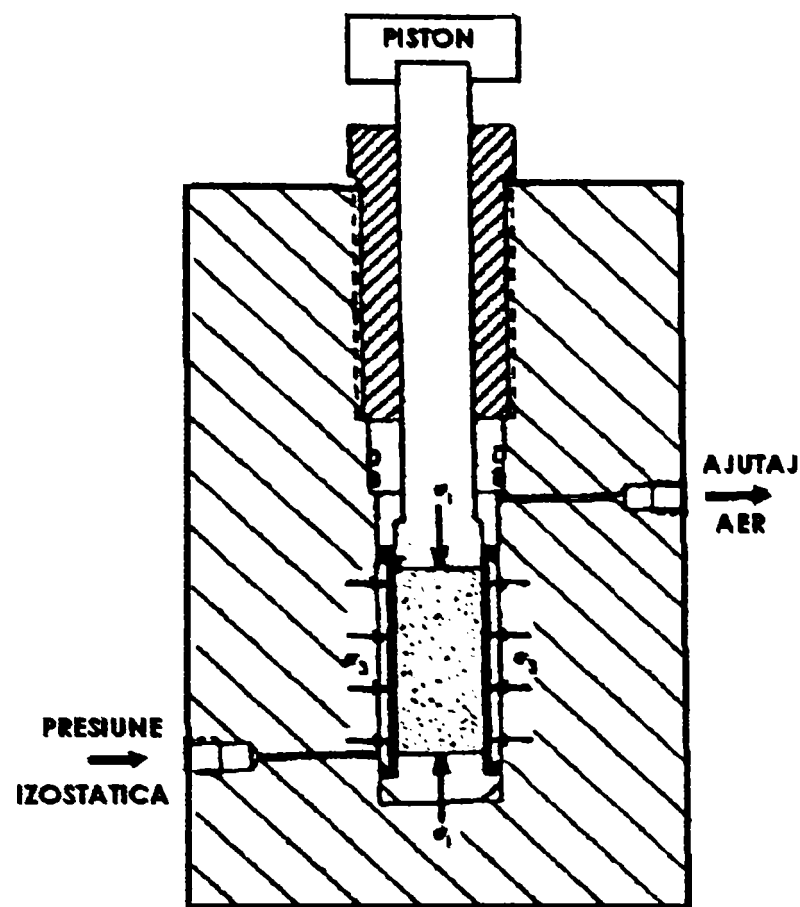
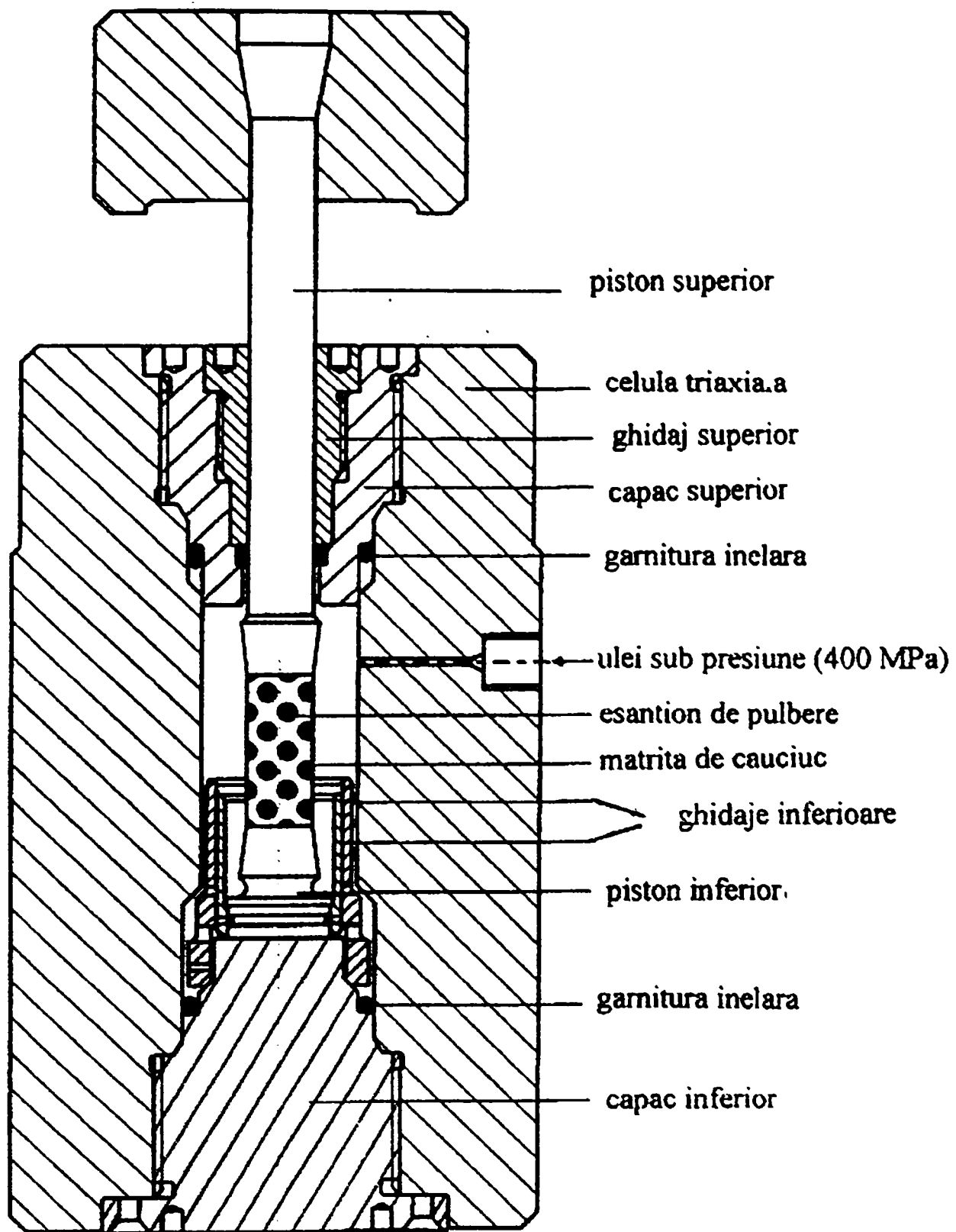


Fig.IV.13. Dispozitivul de compresiune triaxială al lui Koerner.

Doremus și colectivul realizează celula de compresiune triaxială prezentată în figura IV.14, montată pe o presă de 400kN. Deplasarea axială se măsoară cu ajutorul unui captor optic foarte precis iar presa este dotată cu captori de forță și deplasare. Presiunea izostatică este asigurată de ulei sub presiune.

Aparatele triaxiale prezentate sunt puține la număr, datorită domeniului de cercetare relativ nou și datorită dificultăților de construcție; soluțiile tehnologice utilizate pentru măsurarea deformațiilor volumice sunt diferite.



FigIV.14. Celula de compresiune triaxială realizată de Doremus & al.

IV.2. Incercări experimentale

Pentru a realiza un studiu experimental cât mai complet în scopul determinării comportamentului mecanic al pulberilor metalice, există variate tipuri de dispozitive experimentale. La metodele și aparatura de presare la temperatura ambiantă a pulberilor metalice prezentate anterior se adaugă solicitarea comprimatelor la compresiune simplă și forfecare. Evoluția tensiunilor în timpul încercărilor, în coordonate tensiune medie, tensiune deviatoare, este prezentată în figura IV.15 .

Tensiunile se consideră negative în cazul compresiunii.

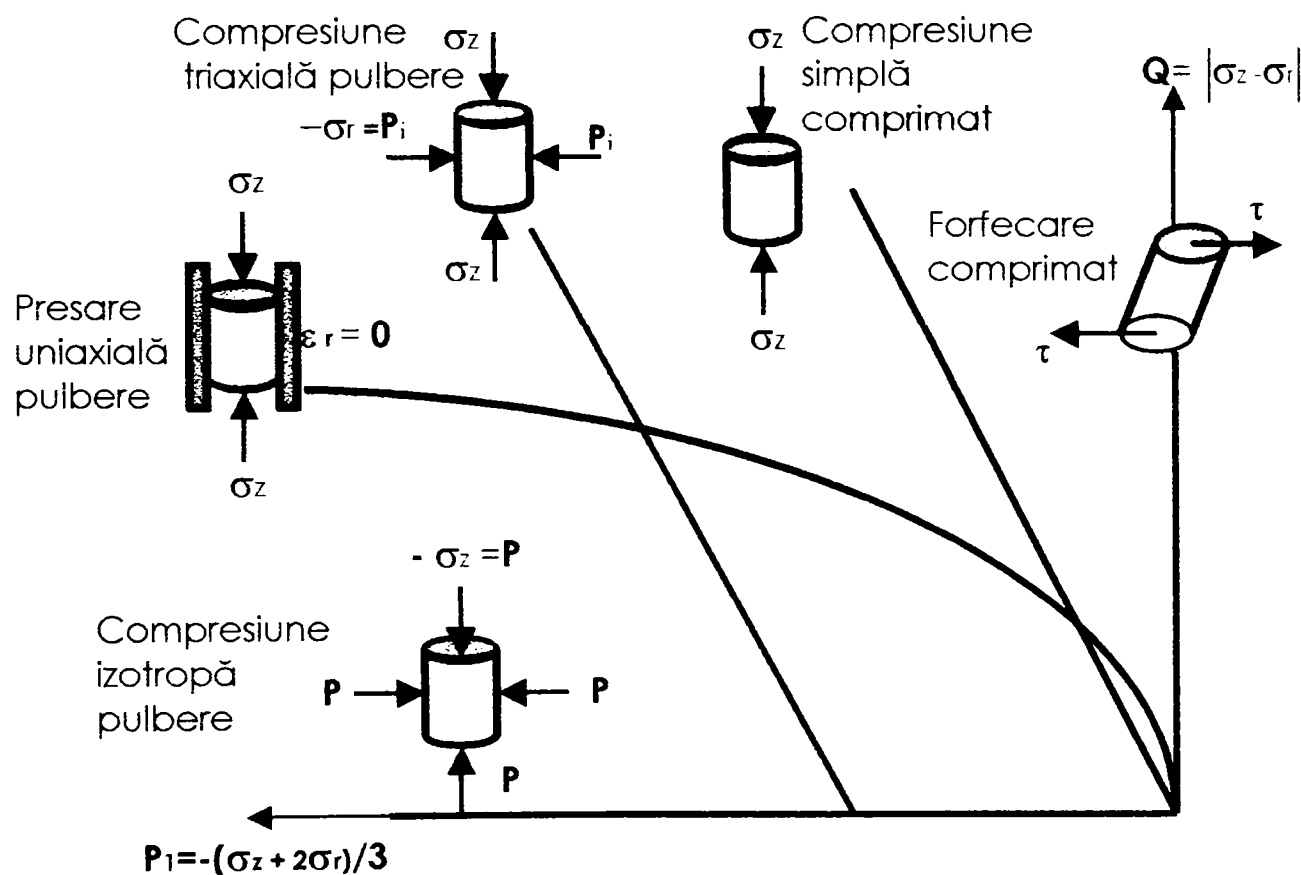


Fig.IV.15. Evoluția tensiunilor în timpul încercărilor.

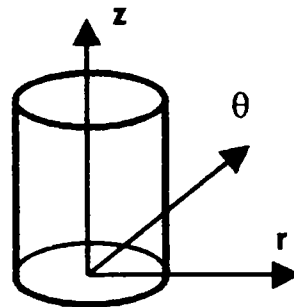
Incercările experimentale efectuate pe pulbere de fier industrial au fost realizate în laboratorul Sols, Solides, Structures al Institut National Polytechnique din Grenoble.

IV.2.1. Presarea uniaxială a pulberii de fier

Presarea uniaxială este procedeul cel mai reprezentativ de formare a pieselor la nivel industrial. Incercarea este relativ ușor de realizat în laborator, necesitând minimum de echipament; cu o presă universală, o matriță, traductori de forță și deplasare, se poate obține o diagramă de evoluție a densității comprimatului în funcție de tensiunea axială aplicată de pistonul superior. Posibilitatea de a obține aceste rezultate experimentale a permis cercetătorilor să propună diferite legi de evoluție, așa cum se va vedea în paragraful IV.2.1.3.

Punerea în practică a presării uniaxiale nu corespunde condițiilor ideale, reprezentate de matrița indeformabilă și absența frecării între pulbere și matriță. În cazul încercării uniaxiale ideale, tensorul tensiunilor și tensorul deformațiilor au forma următoare:

$$\underline{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{Bmatrix} \quad \text{și} \quad \underline{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{Bmatrix}$$



Din cauza frecării dintre pulbere și matriță apar tensiuni de forfecare τ , iar comprimatele obținute sunt neomogene atât în direcție axială cât și radială. Din acest motiv, pentru studiul comportamentului pulberii sunt necesare ipoteze simplificatoare.

Incercarea propriu-zisă constă în solicitarea la compresiune uniaxială a unei cantități de pulbere, impunând o deplasare radială nulă (determinată de

matrița considerată rigidă).

IV.2.1.1. Dispozitiv experimental

Dispozitivul experimental utilizat pentru presarea uniaxială a pulberilor metalice (MOSBAH 1995), prezentat în figura IV.16 a fost plasat în bacurile preseii universale de tracțiune-compresiune de 10 tone.

Matrița cilindrică, cu o înălțime de 70 mm este confecționată din oțel aliat și are diametrul interior de 14 mm și cel exterior de 42 mm.

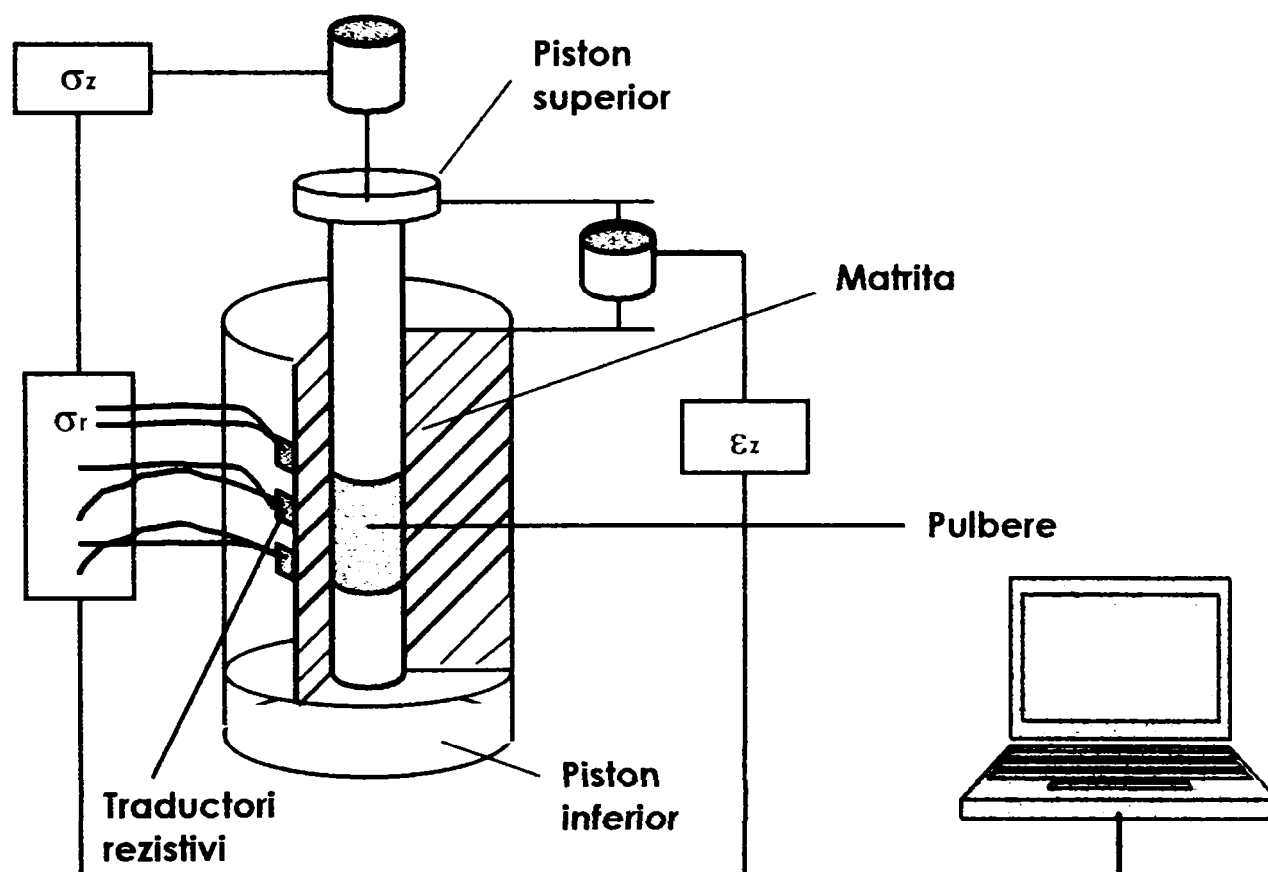


Fig.IV.16. Dispozitivul pentru presare uniaxială.

Forța axială aplicată de pistonul superior se măsoară cu captorul de forță al preseii, iar forța preluată la baza matriței se determină prin intermediul a doi

traductori rezistivi lipiți pe pistonul inferior. Deplasarea axială se înregistrează în mod continuu de către captorul de deplasare al presei.

Densitatea comprimatului în timpul presării se determină în mod continuu prin măsurarea înălțimii pulberii, calculându-se cu relația $\rho = \frac{m}{V}$, m fiind masa comprimatului, determinată la sfârșitul încercării.

Densitatea relativă se calculează ca raport dintre densitatea comprimatului și densitatea materialului dens (care pentru fier este $\approx 7,7 \text{ g/cm}^3$). În timpul presării s-a obținut o bună reproductibilitate a măsurătorilor, chiar în cazul în care au apărut diferențe între densitățile inițiale. În diagramele următoare, densitatea inițială a pulberii, corespunzătoare momentului în care pistonul superior intră în contact cu pulberea este $\rho_0 = 0,47$.

Determinarea tensiunilor radiale s-a făcut prin deducerea lor din deformațiile exterioare ale matriței, măsurate de 9 traductori rezistivi lipiți la diverse înălțimi pe suprafața exterioară a matriței. În acest scop s-au folosit formulele din rezistența materialelor utilizate la calculul tuburilor cu pereți groși, după cum urmează:

Se consideră tubul cilindric de rază exterioară R_1 și rază interioară R_2 supus numai unei presiuni interioare p_i . Legea de variație a tensiunilor radială și circumferențială este dată de relațiile (IV.1) (BUZDUGAN 1964).

$$\sigma_r = \frac{R_1^2 \cdot p_i}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \quad (IV.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{R_1^2 \cdot p_i}{R_2^2 - R_1^2} \left(1 + \frac{R_2^2}{r^2} \right)$$

unde r este raza corespunzătoare punctului din secțiunea transversală în care se face calculul.

Legea lui Hooke generalizată (cu E = modulul de elasticitate longitudinal și μ = coeficientul lui Poisson) este dată de relația (IV.2):

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\sigma_{\theta}}{E} - \mu \frac{\sigma_r}{E} \quad (IV.2)$$

Calculăm tensiunile circumferențiale pe exteriorul tubului cu pereți groși (pentru $r=R_2$, unde $\sigma_r=0$) (relația IV.3), și le înlocuim în (IV.2) pentru a obține expresia presiunii interioare în funcție de măsurătorile furnizate de traductorii rezistivi (ε_{θ}). Cunoscând presiunea interioară la care este supusă matrița (relația (IV.4)), se determină formula cunoscută (IV.5), pentru calculul tensiunii radiale interioare (în pulberea comprimată), folosind (IV.4) și $r = R_1$ în relația (IV.1).

$$\sigma_{\theta} = \frac{R_1^2 \cdot p_i}{R_2^2 - R_1^2} \quad \text{și} \quad \sigma_r = 0 \quad (IV.3)$$

$$E \cdot \varepsilon_{\theta} = \frac{R_1^2 \cdot p_i}{R_2^2 - R_1^2}$$

$$\Rightarrow p_i = \frac{E \varepsilon_{\theta} (R_2^2 - R_1^2)}{R_1^2} \quad (IV.4)$$

$$\sigma_r = -p_i \quad (IV.5)$$

Tensiunea axială de compresiune (σ_z) se determină în funcție de forța axială F și de aria secțiunii transversale a matriței A , cu relația:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \quad (IV.6)$$

Prin comprimarea unui material incompresibil (plastelină) se poate determina pentru fiecare traductor rezistiv un coeficient de "etalonare" G , care conduce la calculul tensiunii radiale corecte, utilizând relația $G = \frac{\sigma_{r \text{ tub cu pereți groși}}}{\sigma_{r \text{ real}}}$.

Tensiunea radială reprezentată în diagramele următoare este media aritmetică a celor trei tensiuni care se determină utilizând măsurătorile experimentale.

IV. 2.1.2. Rezultatele încercărilor pentru pulberea de fier

S-a efectuat presarea unidirecțională cu simplă acțiune a mai multor probe de pulbere de fier aplicând static diferite forțe axiale. Rezultatele încercărilor sunt prezentate tabelar în anexa 1.1. Figura IV.17 prezintă variația tensiunilor axiale superioară (aplicată de pistonul superior) și inferioară (măsurată la baza matriței) și radială medie în funcție de densitatea relativă a comprimatului, calculată în timpul încercării.

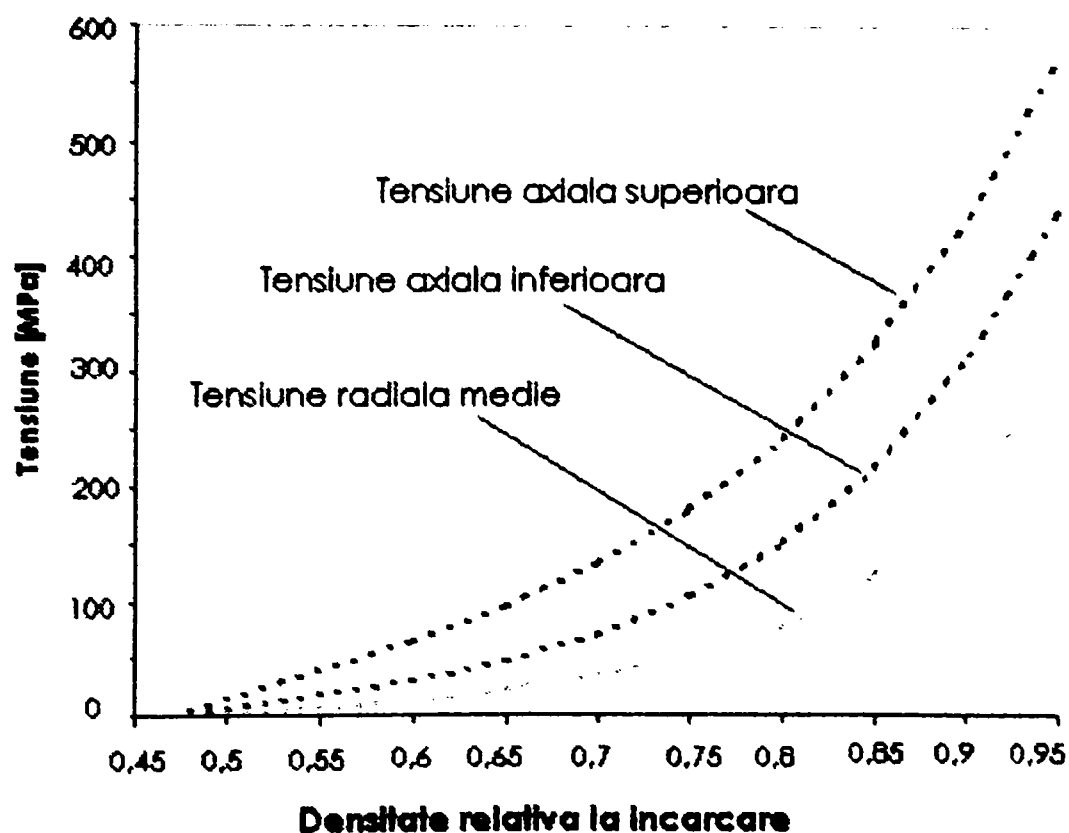


Fig.IV.17. Rezultatele presării unidirecționale a pulberii de fier.

În Fig.IV.18 este prezentată evoluția tensiunilor axiale și radiale medii, în funcție de densitatea relativă a comprimatului (determinată în timpul încercării).

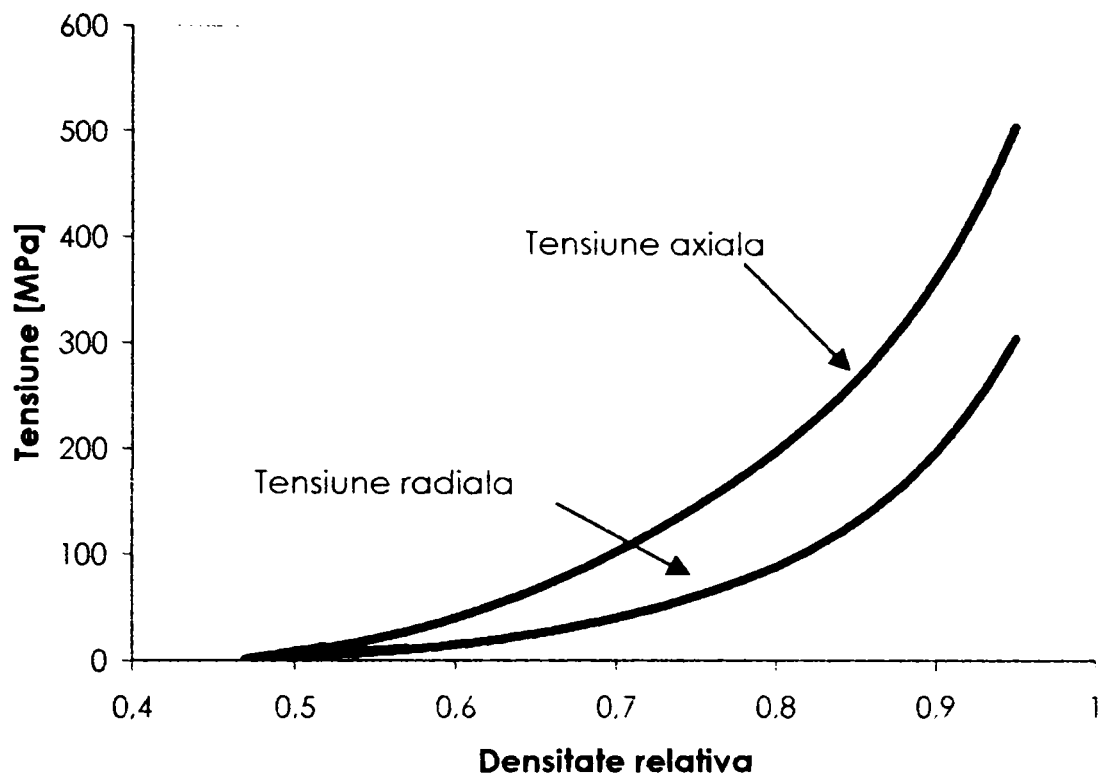
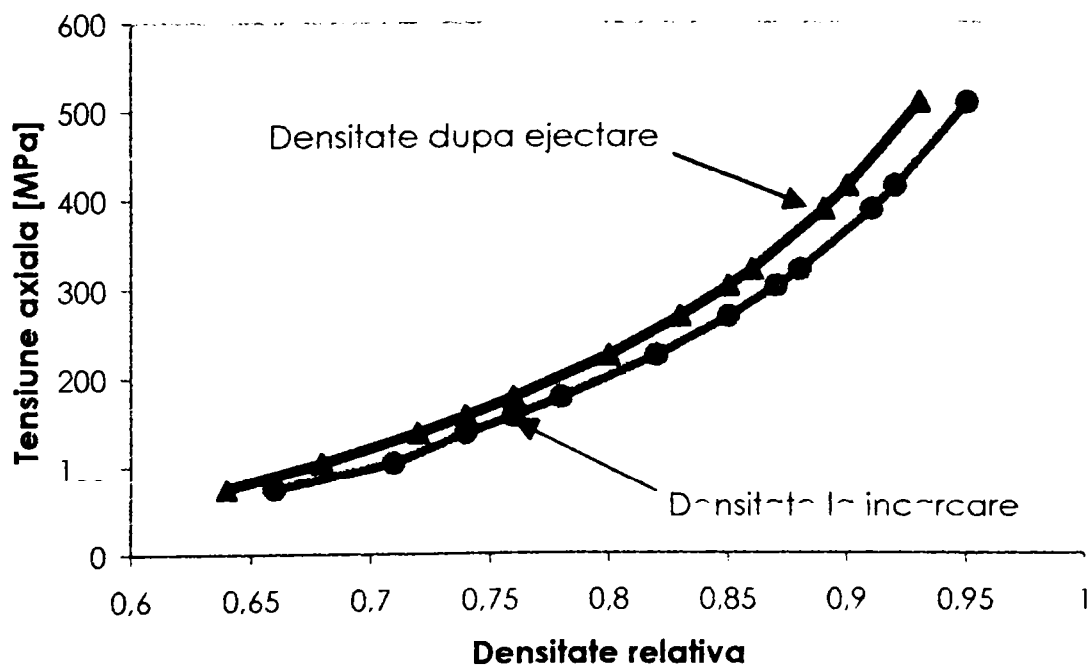


Fig.IV.18. Variația tensiunilor medii în timpul presării în matriță.

Pentru a putea măsura densitatea comprimatului după ejectare, pulberea a fost presată până la tensiuni axiale maxime variind de la 80 MPa la 510 MPa (Fig.IV.19). Se observă că densitatea în timpul presării este mai mare



IV.19. Rezultatele presării pulberii de fier în matriță, la diferite tensiuni axiale.

decât densitatea obținută după scoaterea comprimatului din matriță, datorită fenomenului de relaxare elastică prezentat în paragraful IV.1.2.

Reprezentarea rezultatelor încercărilor în planul deviator este prezentată în Fig.IV.20, în coordonate S_1, \bar{S}_2 , unde :

$$S_1 = \sigma_z + 2 \cdot \sigma_r \quad \bar{S}_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} (\sigma_z - \sigma_r) \quad (IV.7)$$

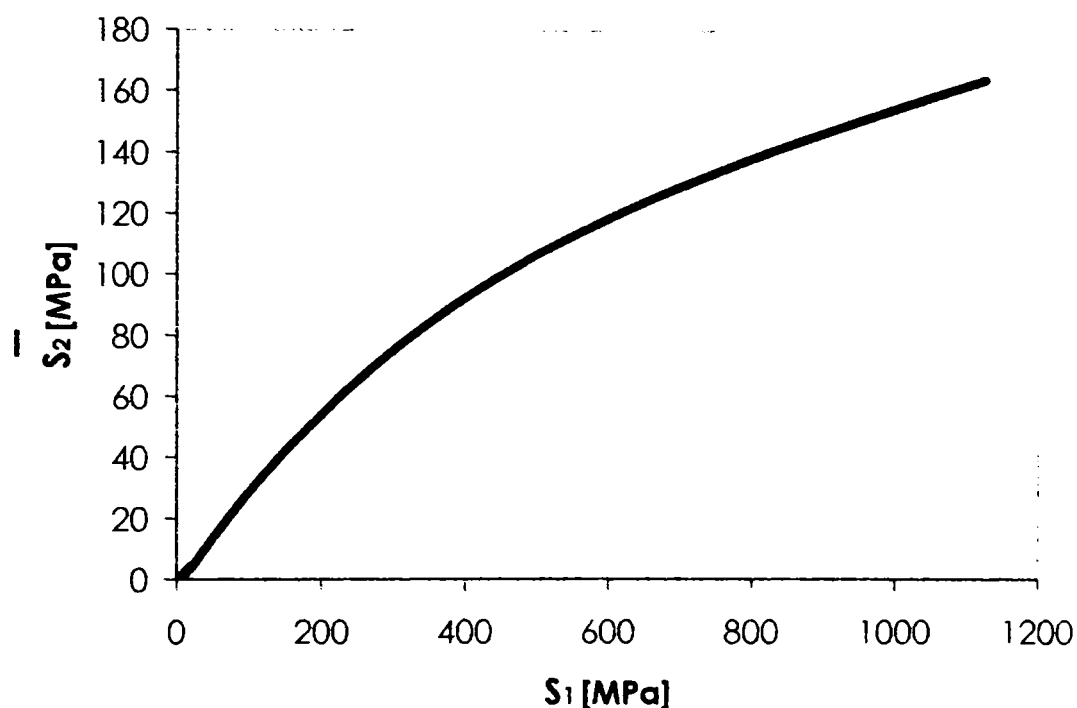


Fig.IV.20.Presarea în matriță a pulberii de fier; reprezentare în planul deviator.

IV.2.1.3. Evoluția densității în timpul încercării

Pentru a analiza densitățile comprimatelor și tensiunile axiale corespunzătoare, se vor compara previziunile unor criterii propuse în literatura de specialitate cu rezultatele încercărilor.

HECKEL (1961) propune descompunerea compactării pulberilor în matriță în trei etape succesive:

- umplerea matricei cu obținerea unei densități relative depinzând de forma particulelor și de tehnica de umplere;
- rearanjarea particulelor și creșterea densității la o presiune relativ scăzută;
- deformarea plastică a particulelor aflate în imposibilitate de a se mișca.

Modelul lui Heckel propune o relație între densitate și presiunea aplicată de forma:

$$\ln\left(\frac{1}{1-\rho}\right) = KP + A \quad (IV.8)$$

unde P = presiunea axială, ρ = densitatea relativă, iar K și A constante.

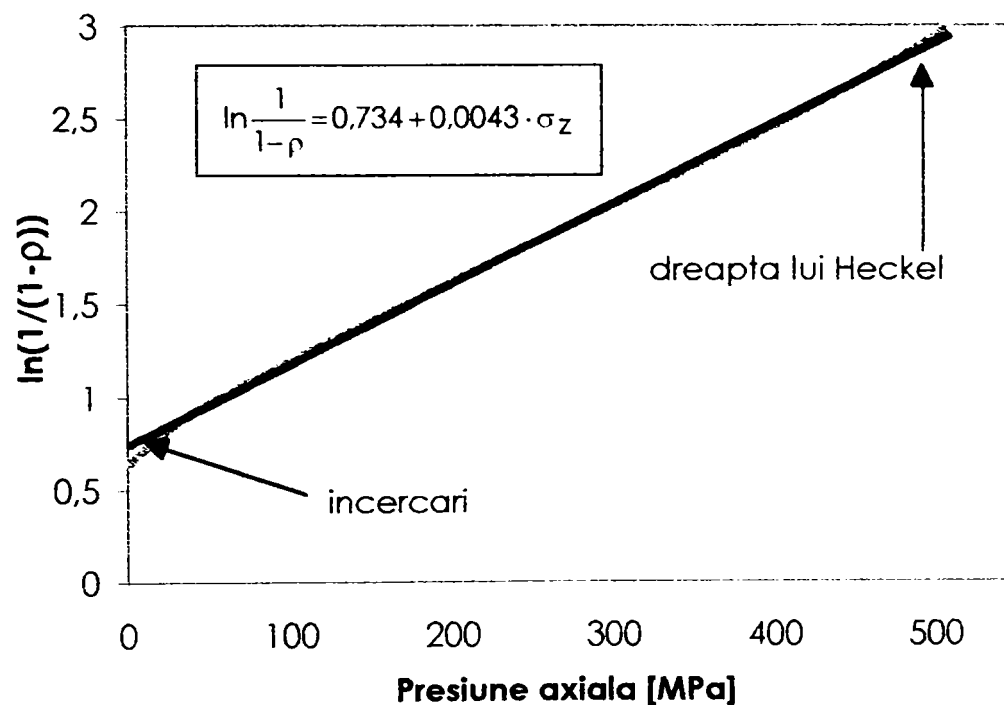


Fig.IV.20. Modelul lui Heckel și rezultate experimentale.

În fig.IV.20 se observă o schimbare de pantă a curbei $\ln\left(\frac{1}{1-\rho}\right)$ în funcție de presiunea axială, care ar putea corespunde tranziției între două dintre mecanismele de densificare propuse de Heckel, și anume, rearanjarea particulelor și deformarea lor plastică.

KAWAKITA (1970) propune un model într-o singură etapă utilizând o ecuație de legătură între gradul de reducere a volumului și presiunea axială:

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{abP}{1 + bP} \quad (IV.9)$$

unde: V_0 = volum inițial al pulberii; V = volum la presiunea P ;

a, b – constante de material.

Pentru studiul evoluției densității în timpul presării uniaxiale în matriță este mai convenabilă utilizarea acestui model sub forma:

$$\frac{\rho}{\rho - \rho_0} = \frac{1 + bP}{abP} \quad (IV.10)$$

cu ρ = densitatea relativă la presiunea P și ρ_0 densitatea relativă inițială.

În Fig.IV.21. sunt prezentate datele experimentale prin prisma modelului lui Kawakita. Se remarcă faptul că modelul lui Heckel descrie mai bine evoluția densității pulberii în timpul presării.

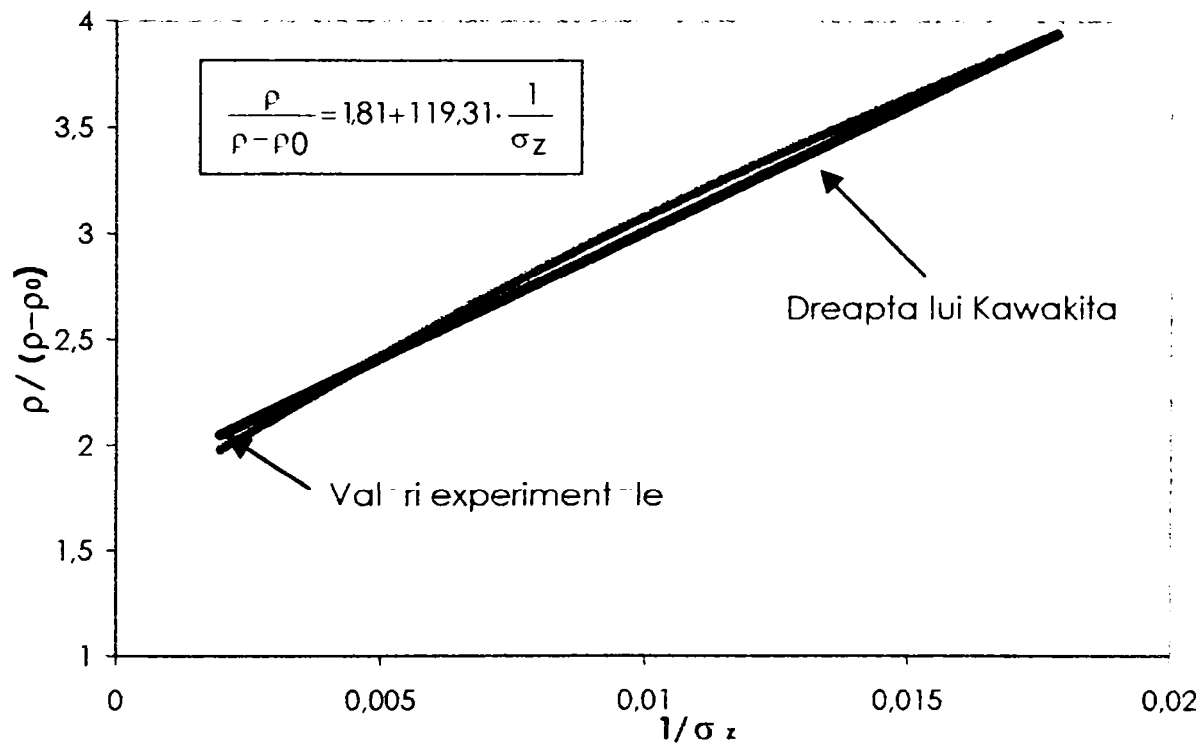


Fig.IV.21. Modelul de densificare al lui Kawakita.

Aceste criterii indică, la modul general, ordinul de mărime al presiunii necesare pentru a obține densitatea dorită. Criteriul lui Heckel descrie mai bine comportamentul pulberii de fier.

IV.2.1.4. Interpretarea rezultatelor experimentale

a. Evoluția coeficientului de transmitere a tensiunilor pentru pulberea de fier

Raportul dintre tensiunea radială medie și tensiunea axială medie β se numește coeficientul de transmisie a tensiunilor;

$$\beta = \frac{\sigma_r}{\sigma_z} \quad (IV.11)$$

Evoluția coeficientului β în funcție de densitatea relativă a comprimatului este prezentată în Fig.IV.22.

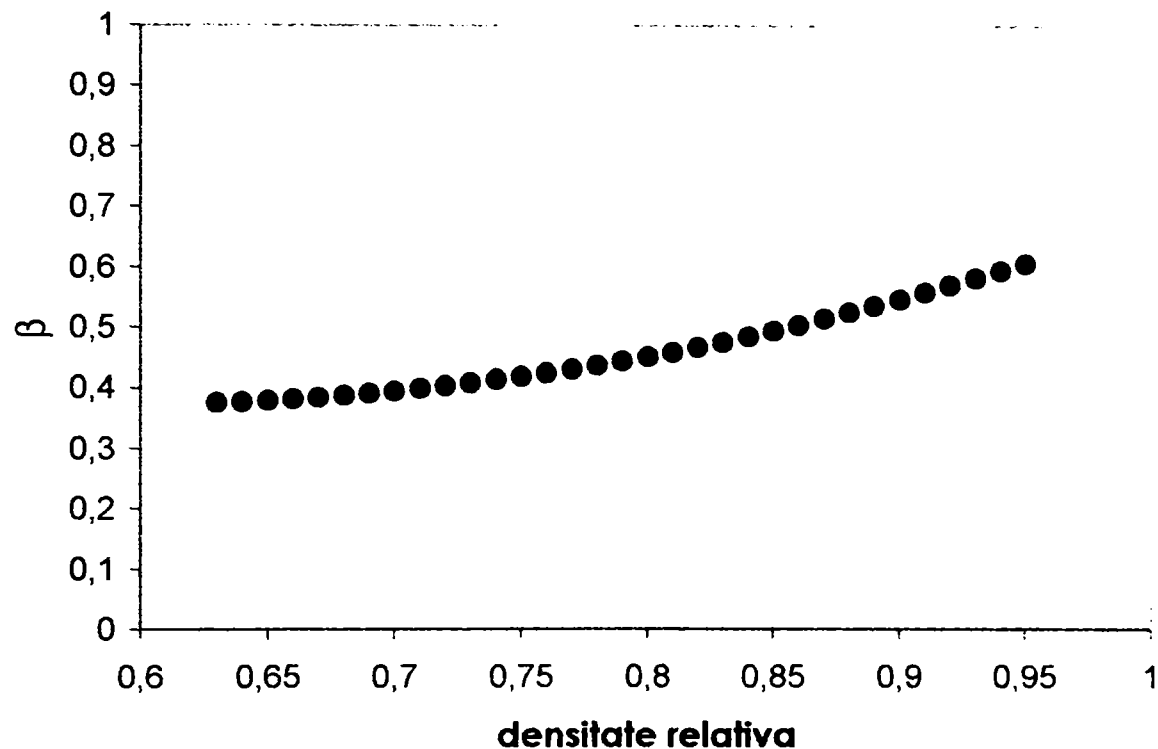


Fig.IV.22. Evoluția coeficientului de transmitere a tensiunilor.

Coeficientul β nu este constant ca în cazul pulberilor ceramice (BORZMEYER 1990); începând cu o densitate relativă de circa 0,6, valoarea lui β crește de la 0,37 la 0,6. La modul general, la începutul presării coeficientul β este nul datorită modului diferit de variație a tensiunilor axială și radială: în timp ce tensiunea axială crește simțitor, tensiunea radială crește foarte puțin, ceea ce poate conduce la concluzia că la începutul presării tensiunea axială determină

rearanjarea particulelor de pulbere. Pe măsură ce densitatea comprimatului crește, β crește, deci presiunea se transmite tot mai mult pereților matritei. $\beta = 1$ corespunde comprimării unui material incompresibil.

b. Calculul coeficientului de frecare în timpul presării uniaxiale a pulberii de fier

Pentru a calcula coeficientul de frecare în timpul presării uniaxiale se consideră un element de înălțime infinitezimală dz , decupat din comprimat, solicitat ca în Fig.IV.23, și se fac următoarele ipoteze simplificatoare:

- stare de tensiune omogenă;
- existența unei tensiuni tangențiale τ pe pereții comprimatului;
- coeficient de frecare μ constant la fiecare pas de presare.

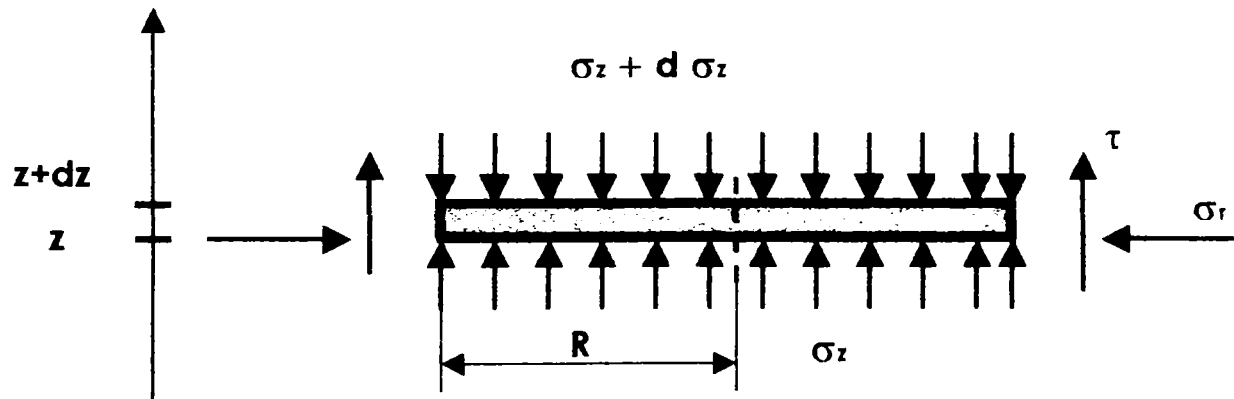


Fig.IV.23. Repartiția tensiunilor pe o secțiune decupată din comprimat.

Ecuția de echilibru pentru elementul din figură este:

$$2 \cdot \pi \cdot R \cdot dz \cdot \tau + \sigma_z \cdot \pi \cdot R^2 - (\sigma_z + d\sigma_z) \cdot \pi \cdot R^2 = 0 \quad (IV.12)$$

unde:

μ = coeficient de frecare;

$$\tau = \mu \cdot \sigma_r$$

(IV.13)

$$\beta = \frac{\sigma_r}{\sigma_z}$$

Înlocuind τ din relația (IV.12) cu relațiile (IV.13) și integrând pe toată înălțimea comprimatului obținem:

$$\int_0^H \frac{d\sigma_z}{\sigma_z} = 2 \cdot \mu \cdot \beta \int_0^H dz \quad (IV.14)$$

Integrând și ținând cont că la baza comprimatului ($z = 0$) tensiunea axială are valoarea $\sigma_{z\text{inf}}$ și în zona superioară ($z = H$) tensiunea axială este $\sigma_{z\text{sup}}$, obținem:

$$R \cdot \ln \frac{\sigma_{z\text{sup}}}{\sigma_{z\text{inf}}} = 2 \cdot \mu \cdot \beta \cdot H \quad (IV.15)$$

și ținând cont de expresia coeficientului de transmitere a tensiunilor, β și de expresia tensiunii axiale medii σ_{zm} (conform PAVIER 1998) (IV.16), se determină relația (IV.17) pentru calculul coeficientului de frecare dintre pulbere și matriță:

$$\sigma_{zm} = \frac{1}{H} \int_0^H \sigma_z dz = \frac{\sigma_{z\text{sup}} - \sigma_{z\text{inf}}}{\ln \left(\frac{\sigma_{z\text{sup}}}{\sigma_{z\text{inf}}} \right)} \quad (IV.16)$$

$$\mu = \frac{1}{\sigma_r} \cdot \frac{R}{2 \cdot H} \cdot (\sigma_{z\text{sup}} - \sigma_{z\text{inf}}) \quad (IV.17)$$

σ_r corespunde tensiunii radiale medii experimentale, iar $\sigma_{z\text{sup}}$, $\sigma_{z\text{inf}}$ sunt tensiunile axiale experimentale.

Coeficientul de frecare dintre matriță și pulberea de fier a fost determinat conform relației (IV.17) și este reprezentat în figura IV.24 în funcție de tensiunea radială care este de fapt tensiunea normală la peretele matriței. μ scade pe măsură ce tensiunea normală crește. De asemenea, coeficientul de frecare scade cu creșterea densității relative (Fig.IV.25).

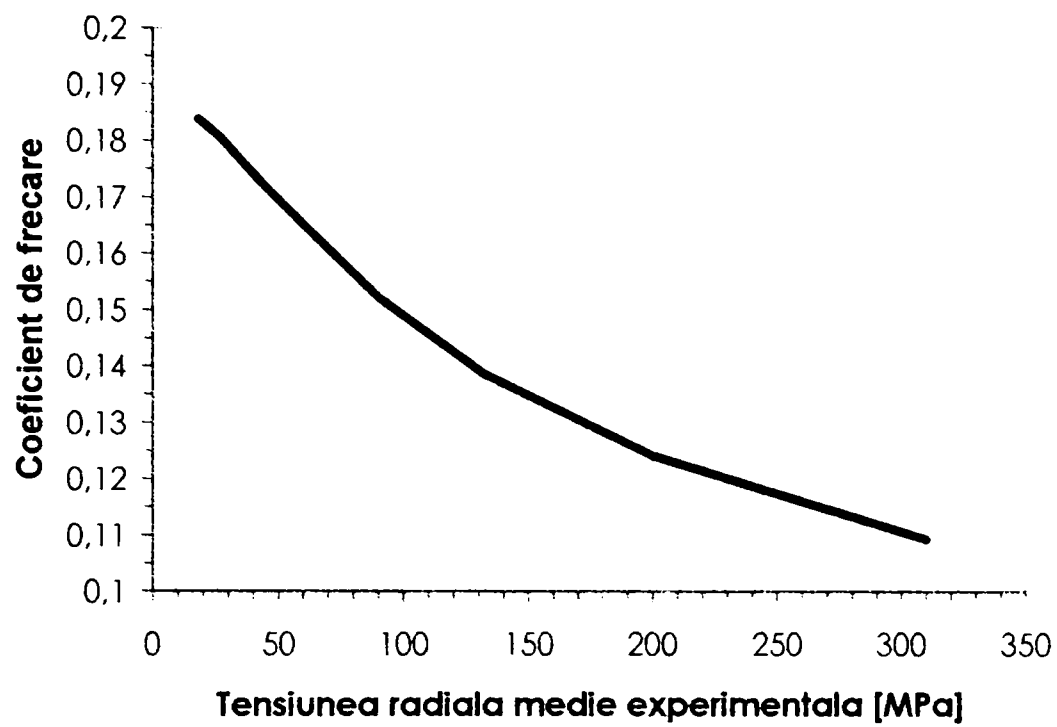


Fig.IV.24. Evoluția coeficientului de frecare în funcție de tensiunea radială.

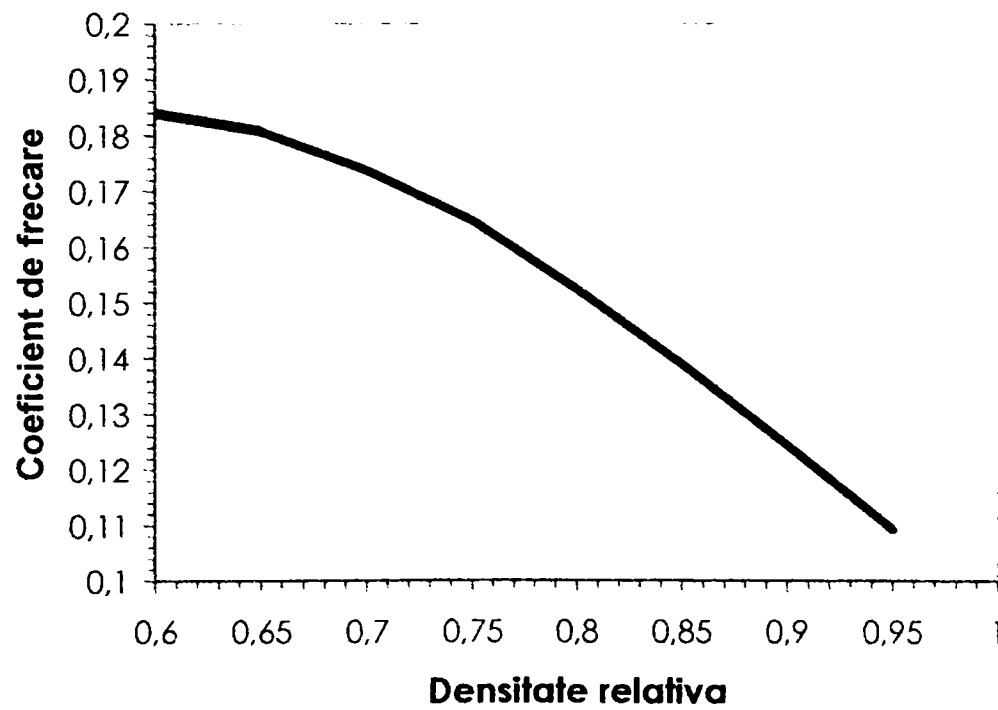


Fig.IV.25. Evoluția coeficientului de frecare în funcție de densitatea relativă.

IV.2.2. Presarea izostatică a pulberii de fier

IV.2.2.1. Dispozitivul experimental

Presarea izostatică a pulberii de fier s-a realizat cu ajutorul celulei triaxiale din Fig. IV.26.

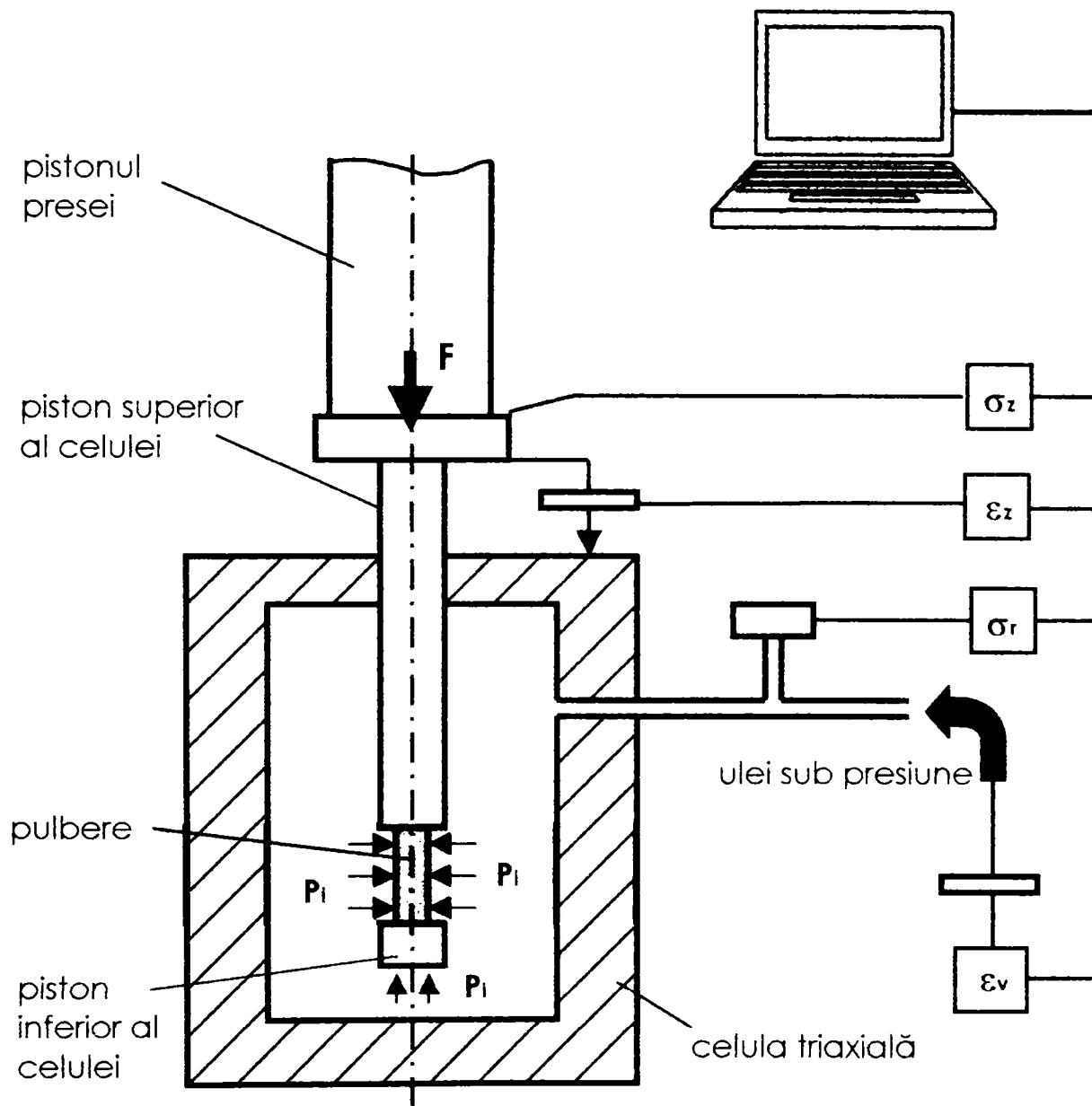


Fig.IV.26. Dispozitivul pentru presarea izostatică .

Celula triaxială folosită pentru realizarea presării izostatice a fost plasată pe presa de 400 kN; deplasarea pistonului superior al celulei este dată de un captor optic, iar forța axială aplicată (F) este înregistrată de un captor de forță. Presiunea izostatică este asigurată de ulei sub presiune comprimat de un

multiplicator de presiune; un captor de deplasare aflat în legătură cu pistonul multiplicatorului de presiune permite calculul variației volumului de ulei din celulă și implicit, calculul deformației volumice a comprimatului (ε_v). Un captor de presiune înregistrează valoarea presiunii izostatice (P_i) în interiorul celulei. Pulberea s-a introdus într-o membrană de cauciuc fixată etanș de cele două pistoane ale celulei.

Presarea izostatică se realizează prin mărirea presiunii uleiului din celulă, pistonul preseii rămânând imobil în acest timp.

Tensiunile care apar în timpul presării izostatice sunt:

$$\sigma_z = \sigma_r = P_i \quad (IV.18)$$

Presiunea medie se calculează cu relația:

$$P = \frac{S_1}{3} = \frac{\sigma_z + 2 \cdot \sigma_r}{3} = P_i \quad (IV.19)$$

iar deformația volumică specifică:

$$\varepsilon_v = \int_{V_0}^V \frac{dV}{V} = \ln \frac{V}{V_0} \quad (IV.20)$$

4.2.2.2. Rezultatele încercărilor izostatice

Instalația utilizată nepermițând măsurarea variației volumului comprimatului în timpul încercării, s-au realizat mai multe încercări folosind presiuni izotrope diferite.

Rezultatele presării izostatice sunt prezentate în Fig. IV.27 (diagrama presiune medie în funcție de densitatea relativă a pulberii după descărcare) (Anexa 1.2)

Pentru a studia variația deformației radiale specifice în funcție de deformația axială specifică, s-a efectuat următoarea încercare: pulberea a fost presată

izostatic până la o presiune P_1 ; după măsurarea înălțimii și diametrului comprimatului, acesta a fost introdus din nou în matrița de cauciuc și supus unei presiuni izotrope $P_2 > P_1$. După măsurarea dimensiunilor comprimatului, acesta a fost din nou presat, operațiile repetându-se până la atingerea presiunii izotrope

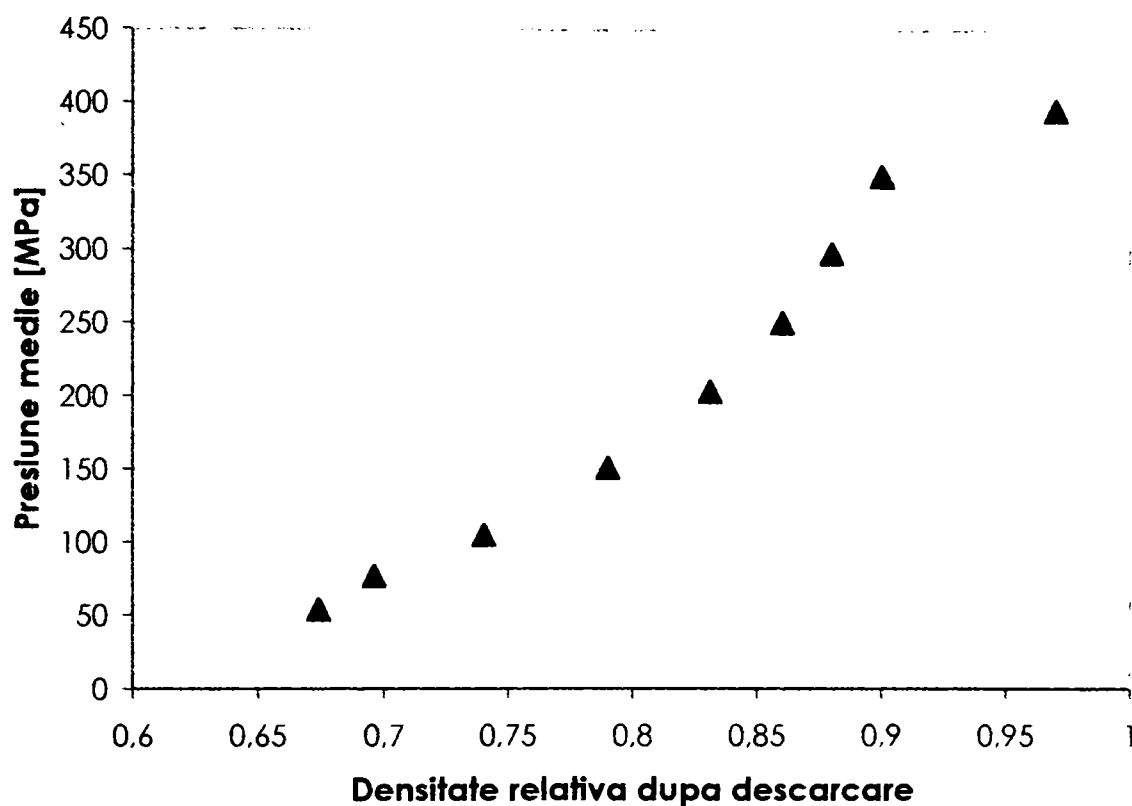


Fig.IV.27. Rezultatele presării izostatice a pulberii de fier.

$P_i = 400$ MPa . Pe baza măsurătorilor efectuate s-au calculat deformațiile axiale și radiale specifice ale comprimatului solicitat la compresiune izotropă.

În figura IV.28 este reprezentată evoluția deformației radiale specifice în funcție de deformația axială specifică a pulberii de fier solicitate la compresiune izotropă. Panta dreptei pe care se aliniază punctele experimentale fiind $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_z} = 1$,

concluzia care se impune este că deformațiile comprimatului sunt izotrope și că acesta se deformează în mod omogen.

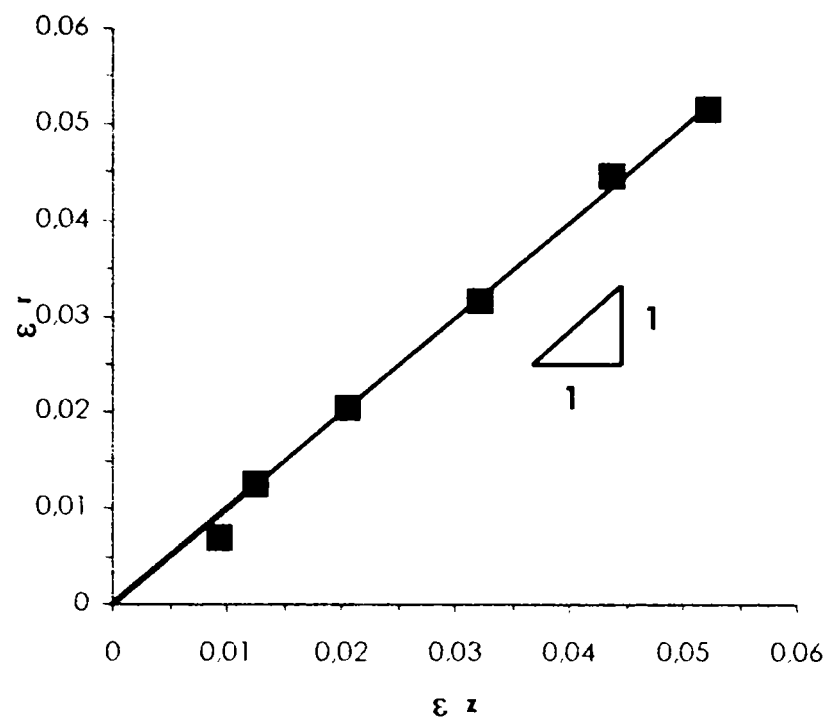


Fig. IV.28. Evoluția deformațiilor specifice în timpul presării izostatice.

IV.2.3. Incercarea la compresiune a comprimatelor din pulbere de fier

IV.2.3.1. Principiul încercării

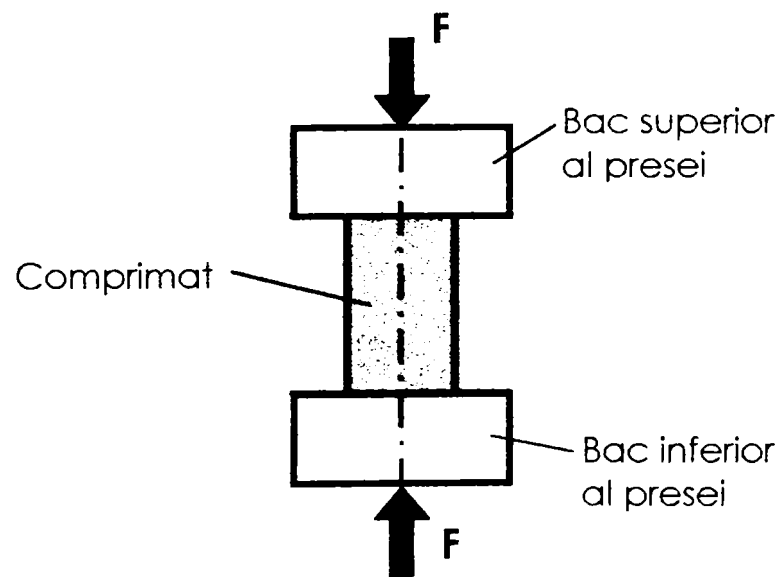


Fig.IV.29. Compresiunea simplă a comprimatelor din pulbere de fier.

Inercarea la compresiune simplă este ușor de pus în practică, dar efectuarea ei este delicată, deoarece necesită un comprimat cu suprafețele superioară și inferioară paralele. Comprimatelor folosite au diametrul de 14 mm și diferite densități, fiind obținute prin presarea uniaxială a pulberii de fier. În vederea solicitării la compresiune simplă, comprimatele se plasează între bacurile preseii de tracțiune-compresiune (Fig.IV.29) și se comprimă. În timpul încercării se înregistrează forța axială (F).

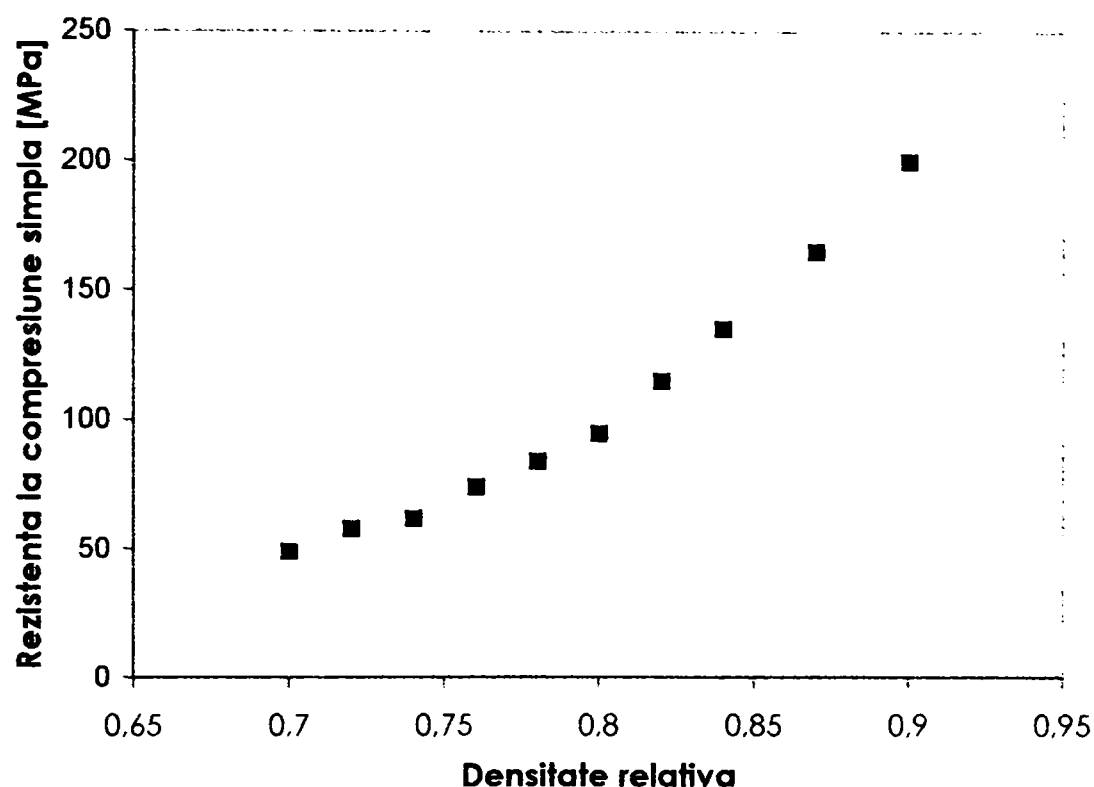


Fig.IV.30. Evoluția rezistenței la compresiune simplă în funcție de densitatea relativă a comprimatelor presate uniaxial (Anexa 1.3).

Comprimatelor solicitate la compresiune simplă au fost presate inițial uniaxial, având densitățile relative: 0,7; 0,72; 0,74; 0,76; 0,78; 0,8; 0,82; 0,84; 0,87; 0,9.

După cum se observă în Fig.IV.30, rezistența la rupere (corespunzătoare apariției primelor fisuri) crește cu densitatea relativă a comprimatelor, ceea ce se explică prin creșterea coeziunii materialului cu densitatea.

IV.2.4. Presarea uniaxială a pulberii de bronz

Incercările experimentale efectuate pe pulbere de bronz furnizată de „SINTEROM” Cluj-Napoca au fost efectuate în laboratorul catedrei de Rezistența materialelor de la Universitatea „Politehnica” Timișoara.

IV.2.4.1. Instalația experimentală

Dispozitivul experimental include matrița prezentată în Fig.IV.16, (fotografie în Fig.IV.31) montată pe presa de tracțiune-compresiune din laboratorul de rezistența materialelor (Fig.IV.34) și legată la sistemul de achiziție de date (Fig.IV.35) al catedrei de Organe de mașini, produs al National Instruments.

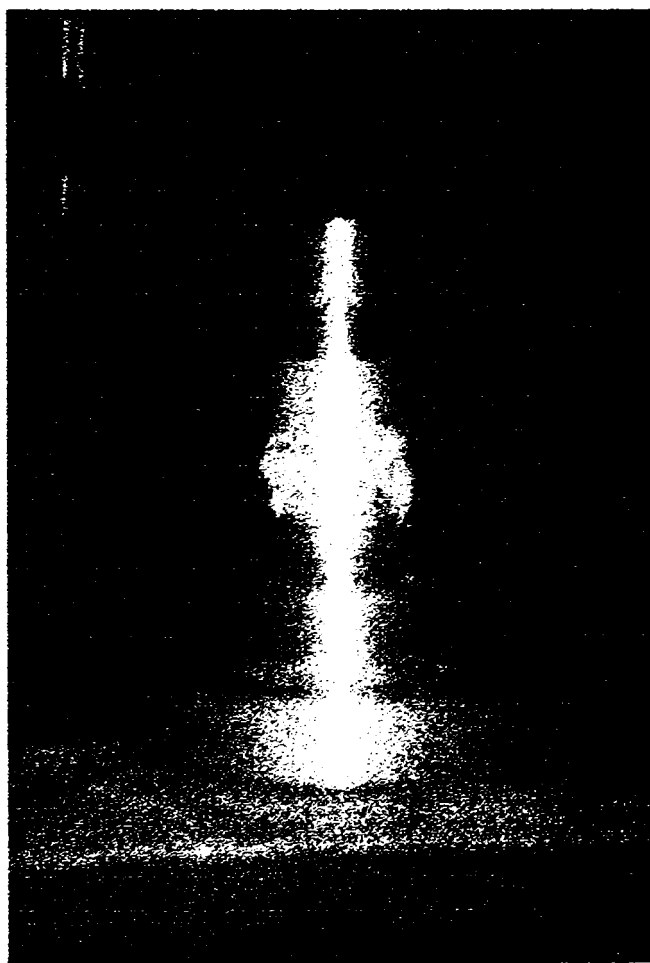


Fig.IV.31. Matrița pentru presare uniaxială.

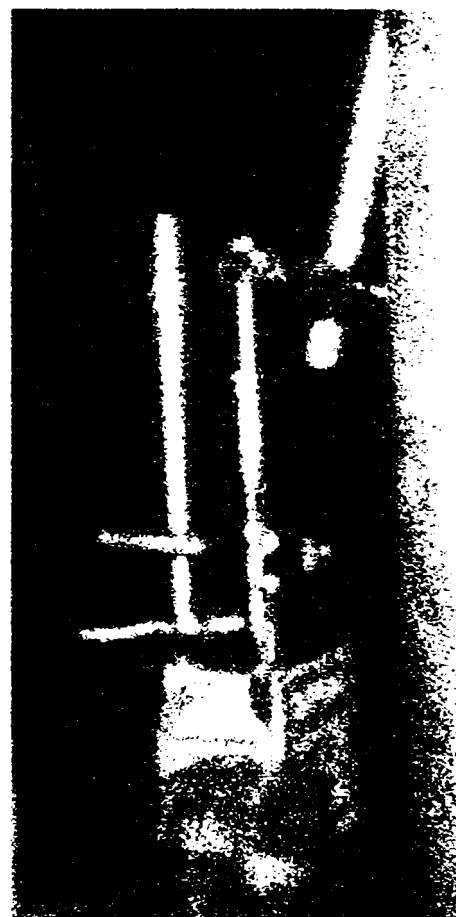


Fig.IV.32. Traductorul inductiv.

În figura IV.33 este prezentată matrița îmbrăcată cu o „cămașă” de protecție pentru traductorii rezistivi, plasată pe bacul presei, alături de traductorul inductiv de deplasare.

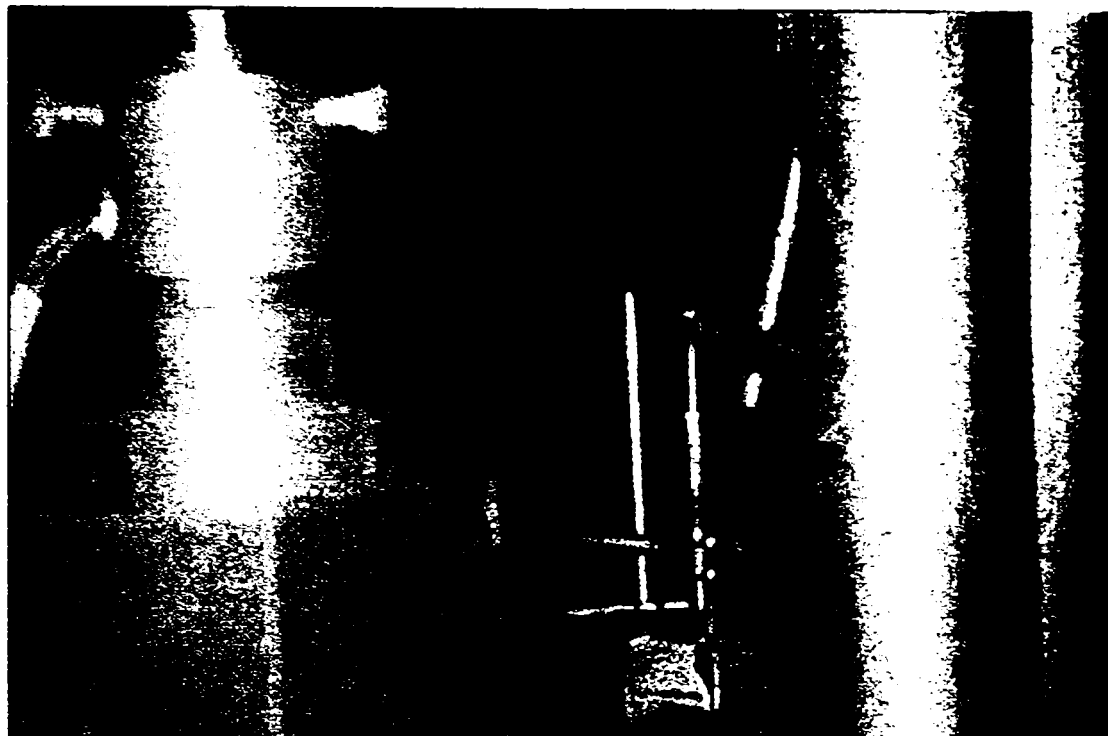


Fig.IV.33. Matrița îmbrăcată cu o „cămașă” de protecție și traductorul inductiv.

Forța axială aplicată de către presă este preluată direct de către modulul de achiziție de date, deplasarea axială a pistonului superior se înregistrează în mod continuu de către traductorul inductiv (fotografie în Fig.IV.32) montat pe bacul fix al presei, având tija în contact cu bacul mobil al presei; traductorul de deplasare este legat la puntea tensometrică. Deformațiile circumferențiale ale matriței (ε_{θ}) furnizate de traductorii rezistivi Vishay (lipiți pe suprafața laterală a matriței conform schemei din Anexa 1.4) sunt înregistrate în mod continuu de către punțile tensometrice. Toate mărimile măsurate sunt înregistrate pe calculator prin intermediul programului „Virtual Bench-Logger” care permite prelucrarea pe calculator a datelor experimentale cu programul utilitar "EXCEL". Figura IV.34 prezintă instalația experimentală fotografiată în timpul încercărilor.



Fig.IV.34. Instalația experimentală utilizată pentru presarea pulberii de bronz.

Sistemul de achiziție de date destinat aplicațiilor de laborator este un instrument foarte adecvat pentru înregistrarea mărimii măsurate sub forma tensiunii electrice a semnalului. Principiul sistemului de achiziție de date prezentat în continuare este schematizat în Fig.IV.35.

Sistemul tipic de achiziție de date convertește fenomenul fizic (deplasare, presiune, temperatură, lumină) în semnal electric (rezistență, tensiune) și include un modul de condiționare a semnalului și un modul de achiziție de date.

Modulul de condiționare a semnalului reprezintă interfața dintre semnalul brut și semnalul de ieșire și îmbunătățește funcționarea și fiabilitatea sistemului de achiziție de date cu o serie de funcții cum ar fi amplificarea semnalului, filtrarea lui, utilizare multiplă. Modulul de achiziție de date realizează legătura cu calculatorul .

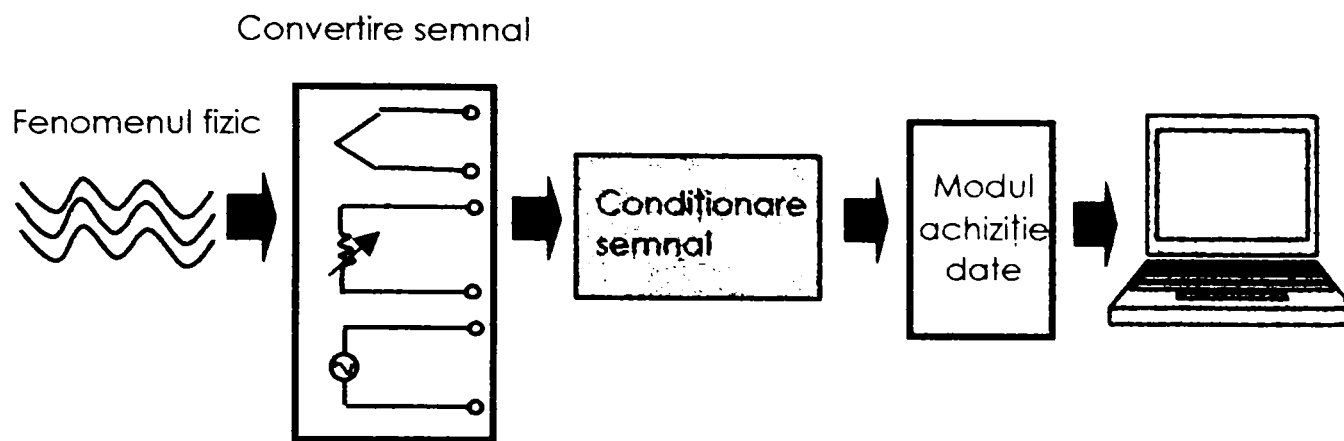


Fig.IV.35.Principiul sistemului de achiziție de date.

Presarea unidirecțională a pulberii de bronz și prelucrarea datelor experimentale în scopul obținerii mărimilor care caracterizează comportamentul mecanic al pulberii respectă metodologia prezentată în paragraful IV.2.1.

Înainte de a începe încercările s-au etalonat traductorii rezistivi și traductorul inductiv, înregistrând în fișierul de etalonare evoluția semnalului pentru capetele de scară pe punțile tensometrice (Anexa 1. 5).

În studiul experimental care urmează se va utiliza noțiunea de densitate, ($\rho = m/V$, $[g/cm^3]$), care este mai semnificativă în procedeul industrial. Volumul comprimatelor s-a calculat considerând că după scoaterea din matriță acestea sunt perfect cilindrice; diametrul fiecărui comprimat este egal cu diametrul interior al matriței (14 mm) iar înălțimea după ejectare s-a determinat prin măsurare. Înălțimea comprimatului în timpul încercării este furnizată de traductorul inductiv.

IV.2.4.2. Rezultatele încercărilor pentru pulberea de bronz

S-a efectuat presarea unidirecțională a mai multor probe din

pulbere de bronz industrial furnizat de întreprinderea SINTEROM Cluj-Napoca. S-au utilizat câte 24 grame pulbere de bronz pentru fiecare încercare. Pentru a începe presarea în condiții inițiale relativ similare, fiecare probă de pulbere a fost solicitată întâi în matriță cu o forță axială de preîncărcare de 100 daN; după descărcare, s-a efectuat presarea uniaxială a pulberii în regim static, cu viteză mică de încărcare, până la diferite forțe axiale maxime: 6200 daN, 6800 daN, 7200 daN, 7800 daN, 8000 daN, 8400 daN și 8500 daN. Figura IV.36 prezintă variația tensiunilor axială superioară (aplicată de pistonul superior al matriței) și radială medie, în funcție de densitatea comprimatului calculată în cursul încercării.

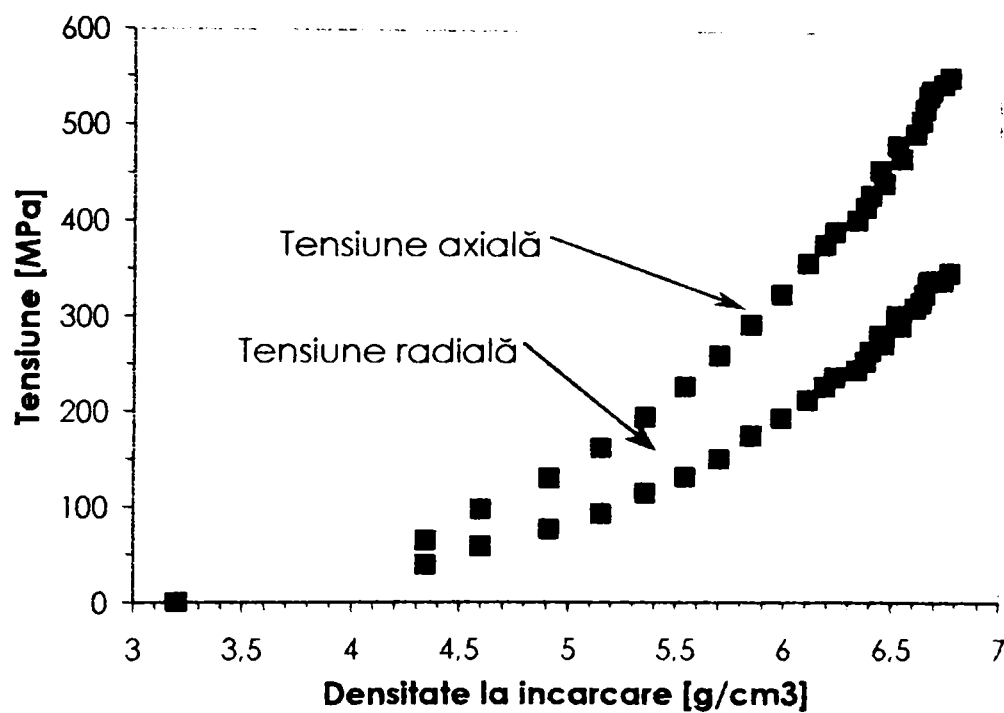


Fig.IV.36. Rezultatele presării unidirecționale a pulberii de bronz.

Figura IV.37 prezintă o comparație între densitatea comprimatelor în timpul încercării și după scoaterea lor din matriță. Datorită fenomenului de relaxare elastică a pulberii după ejectare, la aceeași tensiune axială, densitatea comprimatului scade față de densitatea calculată în timpul încercării.

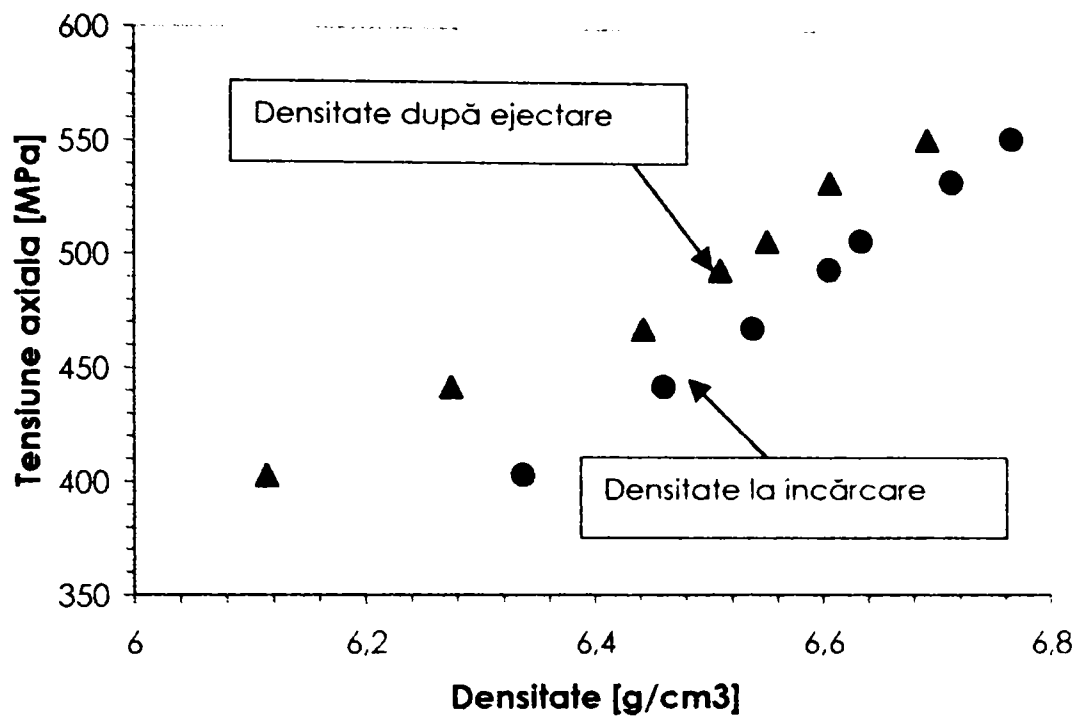


Fig.IV.37. Comparație între densitățile comprimatelor la încărcare și după scoaterea din matriță.

În figura IV.38 sunt prezentate rezultatele presării unidirecționale a pulberii de bronz (în planul deviator), în coordonate S_1, \bar{S}_2 (a se vedea relația IV.7).

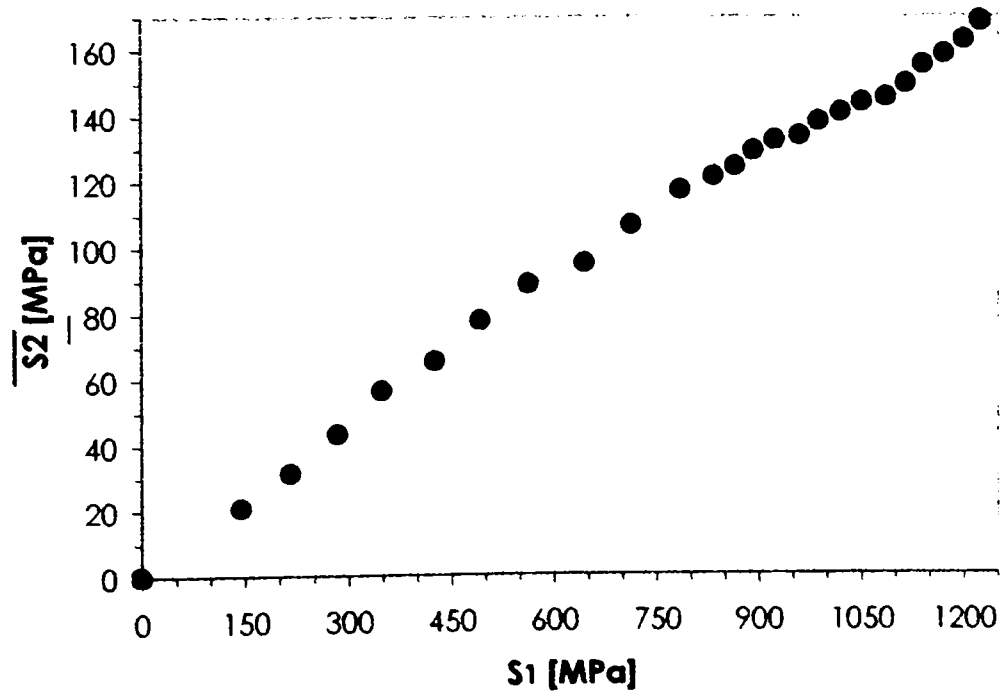


Fig.IV.38. Presarea pulberii de bronz în matriță; reprezentare în planul deviator.

IV.2.4.3. Evoluția densității în timpul încercării

În figura IV.39 sunt prezentate datele experimentale comparativ cu previziunile modelului lui Heckel (a se vedea paragraful IV.2.1.3 și relația IV.8). S-au folosit densitățile determinate în timpul încercării.

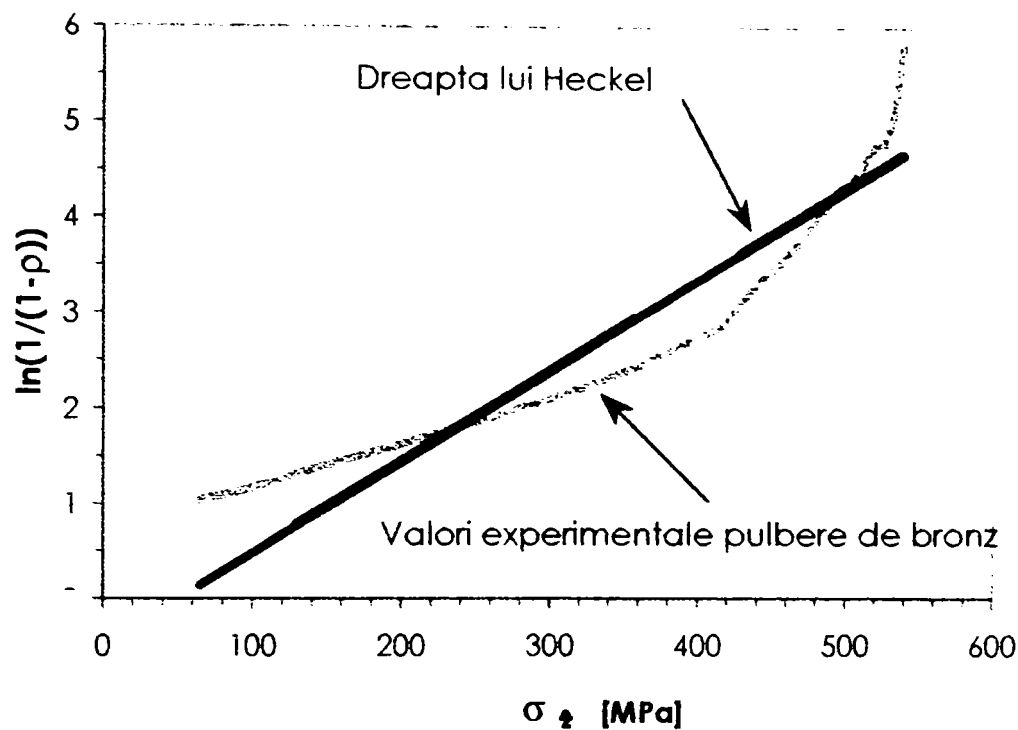


Fig.IV.39. Previziunile modelului lui Heckel pentru pulberea de bronz.

Modelul lui Heckel corespunzător valorilor determinate experimental pentru pulberea de bronz are următoarea formă:

$$\ln \frac{1}{1-p} = -0,465 + 0,0095 \cdot \sigma_z \quad (\text{IV.21})$$

În figura IV.40 sunt prezentate previziunile modelului lui Kawakita (a se vedea relația IV.10, paragraful IV.2.1.3) comparativ cu datele experimentale.

În modelele de densificare este utilizată densitatea relativă a pulberii de bronz, care se calculează ca raportul dintre densitatea comprimatului și densitatea materialului dens; pentru a calcula densitatea relativă a pulberii de bronz s-a

utilizat valoarea de $6,7\text{g/cm}^3$ - densitatea pe care o indică diagramele de presabilitate de la SINTEROM Cluj-Napoca.

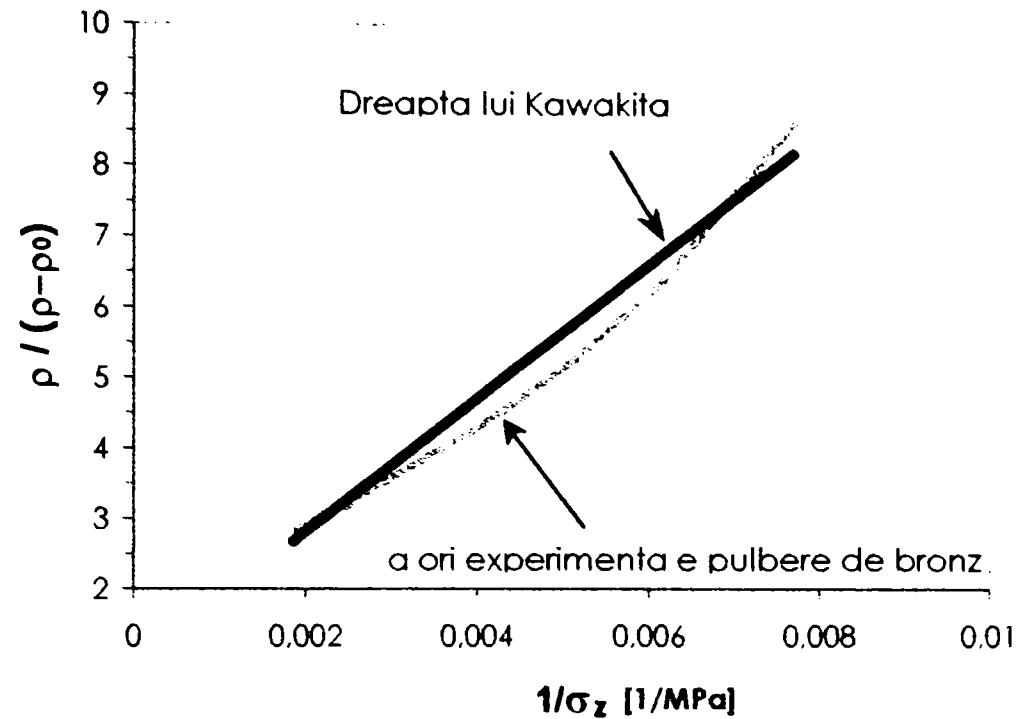


Fig.IV.40. Previziunile modelului lui Kawakita pentru pulberea de bronz.

Ecuția dreptei care descrie modelul lui Kawakita pentru pulberea de bronz este prezentată în relația (IV.22).

$$\frac{\rho}{\rho - \rho_0} = 945,66 \cdot \frac{1}{\sigma_z} + 0,9185 \quad (\text{IV.22})$$

Se remarcă faptul că modelul lui Kawakita descrie mai bine decât modelul lui Heckel evoluția densității pulberii în timpul presării, spre deosebire de pulberea de fier, pentru care modelul lui Heckel este mai adecvat.

IV.2.4.4. Interpretarea rezultatelor experimentale

a. Evoluția coeficientului de transmitere a tensiunilor pentru pulberea de bronz

În Fig.IV.41 este prezentată evoluția coeficientului de transmitere a tensiunilor

$\beta = \frac{\sigma_r}{\sigma_z}$ (paragraful IV.2.1.4) în funcție de densitatea comprimatului determinată

în timpul presării.

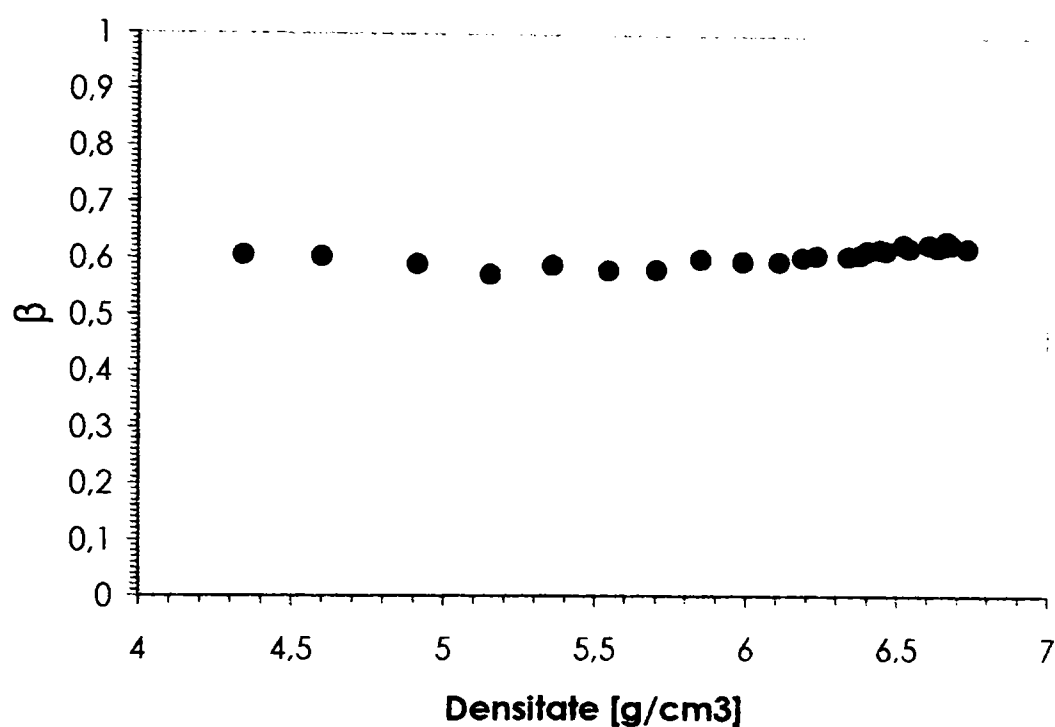


Fig.IV.41. Evoluția coeficientului de transmitere a tensiunilor.

Coeficientul β este aproape constant, variind între valorile 0,58 și 0,63, ceea ce poate conduce la concluzia că tensiunea radială și cea axială variază relativ în același fel. În cazul pulberilor ceramice coeficientul de transmitere a tensiunilor este constant, spre deosebire de pulberea de fier, unde β crește de la 0,37 la 0,6.

b. Calcul coeficientului de frecare în timpul presării uniaxiale a pulberii de bronz

Conform demonstrației prezentate în paragraful IV.2.1.4, coeficientul de frecare μ dintre pulbere și matriță se calculează cu relația (IV.17) .

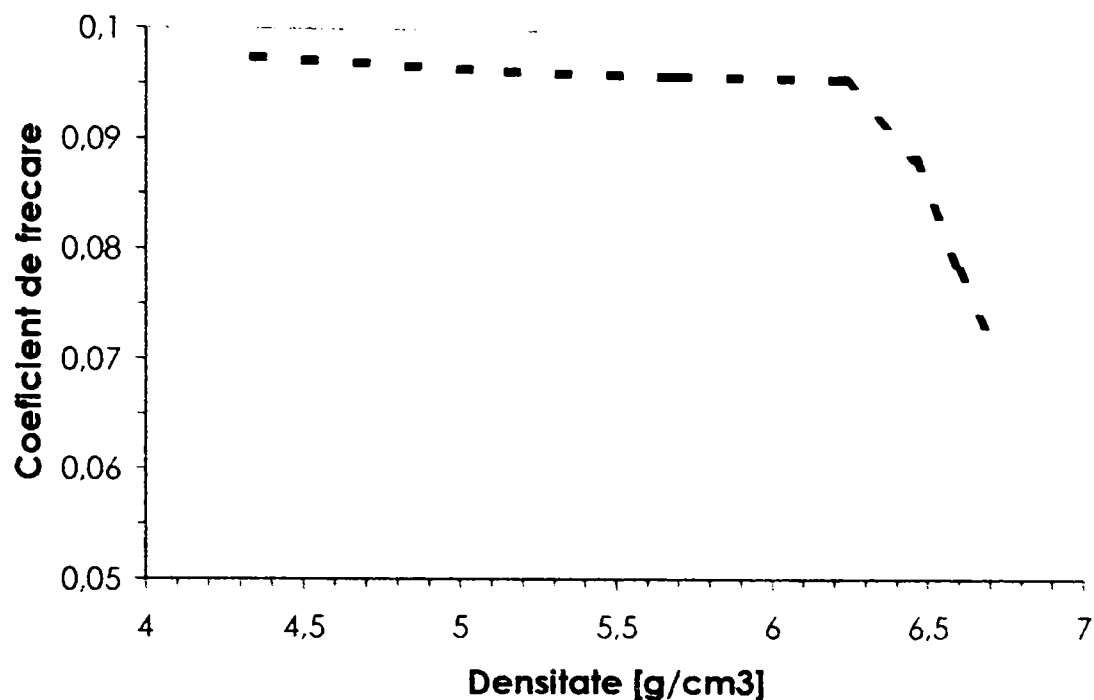


Fig.IV.42.Evoluția coeficientului de frecare pulbere-matriță în funcție de densitate.

Conform figurii IV.42, coeficientul de frecare dintre pulberea de bronz și matriță scade lent cu densitatea, de la valoarea 0,097 până la valoarea 0,0957 (pentru $\rho=6,23$), apoi panta diagramei crește odată cu creșterea densității (respectiv a tensiunii normale la peretele matriței - σ_r); evoluția coeficientului de frecare

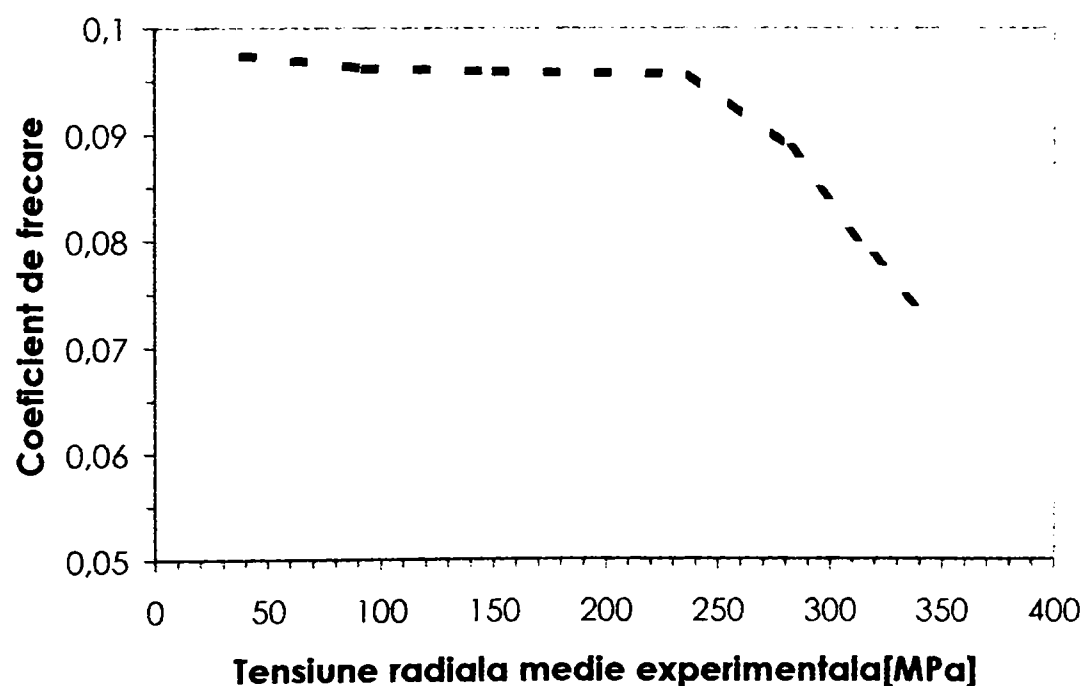


Fig.IV.43.Evoluția coeficientului de frecare în funcție de tensiunea radială.

confirmă bunele proprietăți de lubrifiere pe care le are bronzul. Aceeași variație se remarcă pe diagrama coeficient de frecare - tensiune radială.

IV.2.5. Incercarea la compresiune simplă a comprimatelor din pulbere de bronz

Comprimatele solicitate la compresiune simplă au fost inițial presate unidirecțional în matrită, având densitățile după ejectare: 6,11g/cm³, 6,27g/cm³, 6,44g/cm³, 6,51g/cm³, 6,55g/cm³, 6,6g/cm³, 6,7g/cm³. Comprimatele au fost presate cu viteză mică de aplicare a forței axiale, până la apariția primelor fisuri, (moment în care forța axială a început să scadă). În figura IV.44 se prezintă evoluția rezistenței la compresiune simplă în funcție de densitatea comprimatelor din pulbere de bronz. Se remarcă creșterea rezistenței la compresiune cu creșterea densității comprimatelor, datorată creșterii coeziunii materialului.

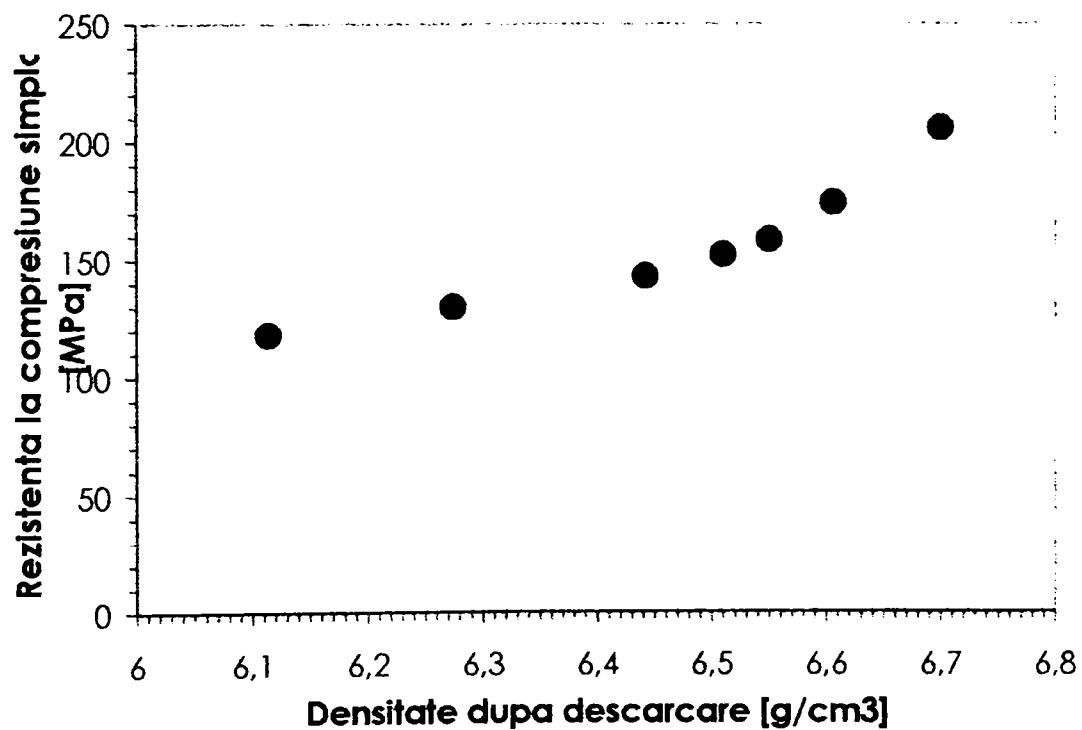


Fig.IV.44. Evoluția rezistenței la compresiune simplă a comprimatelor obținute prin presarea uniaxială a pulberii de bronz.

În figura IV.45 este fotografiat un comprimat din pulbere de bronz obținut prin presare unidirecțională în matrită, înainte (a) și după (b) solicitarea la compresiune simplă monoaxială.

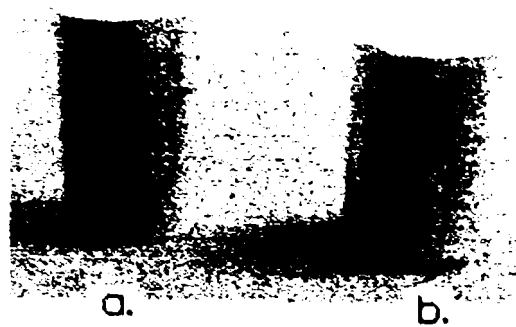


Fig.IV.45. Comprimat din pulbere de bronz obținut prin presare unidirecțională în matrită (a), solicitat la compresiune simplă (b).

Forma comprimatului fisurat, prezentat mai sus, este determinată de modul de obținere a comprimatelor, prin presare unidirecțională cu simplă acțiune; sub acțiunea presiunii, fiecare particulă de pulbere se deplasează în direcția presării și în același timp are tendința de a evita presiunea exercitată asupra ei, deplasându-se în direcția rezistenței minime, adică spre mijlocul matritei, apărând o "scufundare" a straturilor orizontale de pulbere sub forma unui con aplatizat sau a unei calote (Fig.IV.46), (SURDEANU 1984). Piesa obținută prezintă densitatea cea mai mare în zona periferică de sub poansonul de presare, iar

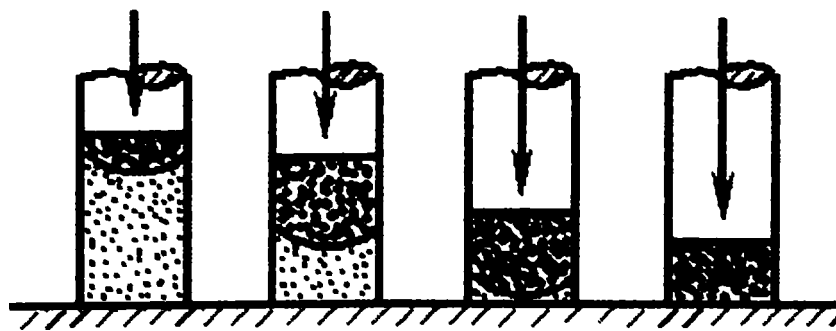


Fig.IV.46. Schema de deplasare a straturilor orizontale la presarea unidirecțională cu simplă acțiune.

densitatea cea mai mică, în zona periferică opusă, adică la baza comprimatului, în cazul de față.

IV.2.6. Concluzie

După cum s-a văzut în capitolul II, rezultatele experimentale prezentate în acest capitol sunt suficiente pentru modelarea comportamentului pulberii de fier.

Pe baza încercărilor de presare unidirecțională în matriță s-a determinat comportamentul pulberii și coeficientul de frecare pulbere – matriță.

Încercările de compresiune simplă efectuate asupra comprimatelor obținute prin presare unidirecțională în matriță arată că rezistența la rupere a acestora crește cu densitatea, coeziunea materialului crescând cu densitatea.

În urma presării izostatice, deformațiile comprimatului sunt izotrope și acesta se deformează omogen.

STUDIUL MICROSTRUCTURAL AL PULBERII DE FIER UTILIZATE

V.1. Pulberea de fier utilizată

În figura V.1. se prezintă pulberea de fier industrială (în stare inițială - mărire 500X) utilizată pentru efectuarea încercărilor care au stat la baza studiului de până aici.

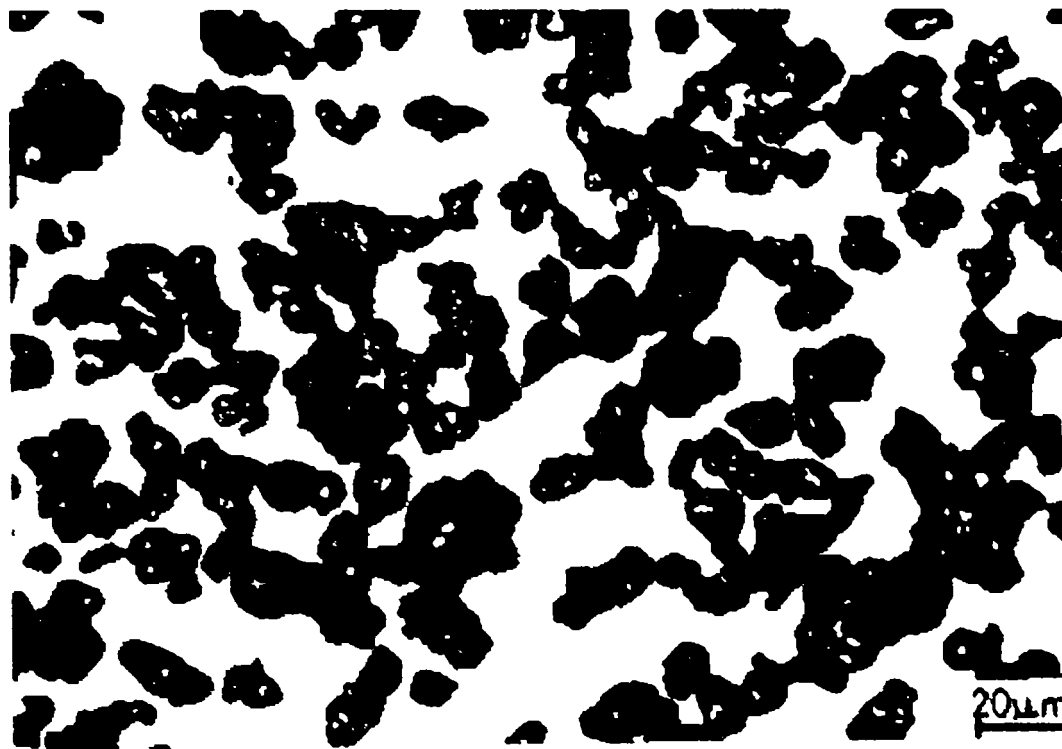


Fig.V.1. Pulberea de fier utilizată.

V.2. Tipuri de probe utilizate

Probele din pulbere de fier presată analizate în continuare au fost obținute în Laboratorul " Sols, Solides, Structures " al "Institut National Polytechnique" din Grenoble, astfel:

-a) prin presare izotropă la temperatura ambiantă (Fig.V.2, secțiune transversală prin probe); densitățile relative obținute: 0,8144 ; 0,8437 ; 0,864 ; 0,885;

-b) prin presare în matriță la temperatura ambiantă (Fig. V.2, secțiune longitudinală-); densitățile relative obținute : 0,627 ; 0,7274 ; 0,85 ; 0,905;

-c) prin presare în matriță la temperatura ambiantă până la densitățile relative 0,699; 777; 0,799; 0,834, urmată de compresiune simplă.

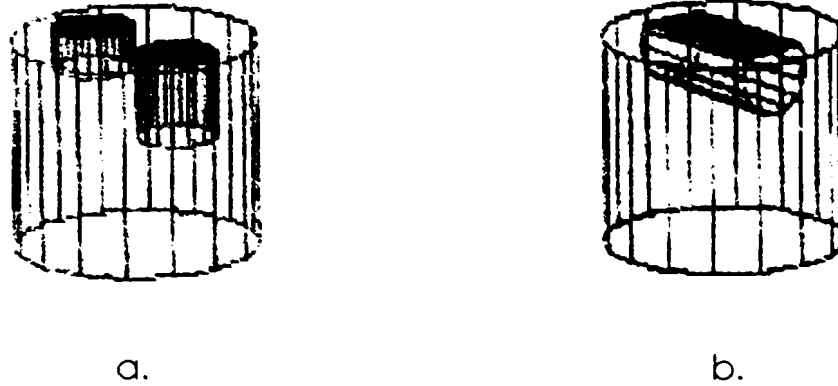


Fig.V.2. Forma probelor utilizate.

După presare și măsurarea densității, fiecare comprimat a fost tăiat, înglobat în rășină sintetică și lustruit în vederea atacului metalografic. După fotografiere, suprafețele s-au lustruit din nou în vederea măsurătorilor de microduritate.

Studiul la nivel microscopic a fost realizat în cadrul catedrei de Știința materialelor a Facultății de mecanică din Timișoara.

V.3. Studiul deformației plastice a particulelor de pulbere de fier pe parcursul presării la temperatura ambiantă

O problemă deosebit de importantă este aceea de a ști dacă în decursul presării la temperatura ambiantă, particulele de pulbere suferă o deformație plastică de la începutul aplicării presiunii, sau, dimpotrivă, deformația plastică are loc odată cu atingerea unei anumite presiuni.

Două metode sunt utilizate de obicei pentru a pune în evidență și măsura deformația plastică a particulelor de pulbere presată la temperatura ambiantă: observarea deformării particulelor (schimbarea formei, turtirea) și evaluarea ecruisării particulelor (OUEDRAOGO 1988).

Pentru o apreciere calitativă a deformării, observarea deformării particulelor se face utilizând fotografiile făcute pe microscopul optic sau electronic ale unor părți sau suprafețe ale unor secțiuni ale probelor. Determinarea ecruisării materialului se face prin măsurări de microduritate efectuate asupra probelor comprimate; duritatea unui material metalic crește cu gradul de ecruisare.

V.3.1. Apreciere calitativă a deformației plastice

Fotografiile care vor fi studiate în continuare (SAVA 1996) au fost făcute pe microscopul optic (mărire 500X), după atac cu Nital; ele arată că particulele având forma inițială rotundă s-au transformat în poliedre, deci a avut loc o deformare plastică.

Figurile V.3 și V.4 reprezintă secțiuni prin probele izotrope (densități relative 0,8144 și 0,864) și indică o diminuare a dimensiunilor poliedrelor în funcție de densitate, ceea ce poate conduce la concluzia că particulele au fost deformate plastic (Fig.V.4.-cel mai evident).

Figurile V.5. și V.6. reprezintă fotografiile probelor de pulbere presate în matriță (densități relative 0,7274 și 0,82); observăm de asemenea forma poliedrică a particulelor și, pentru densități mari, apariția porilor de formă alungită (a se vedea figura V.6), care precede închiderea porilor.

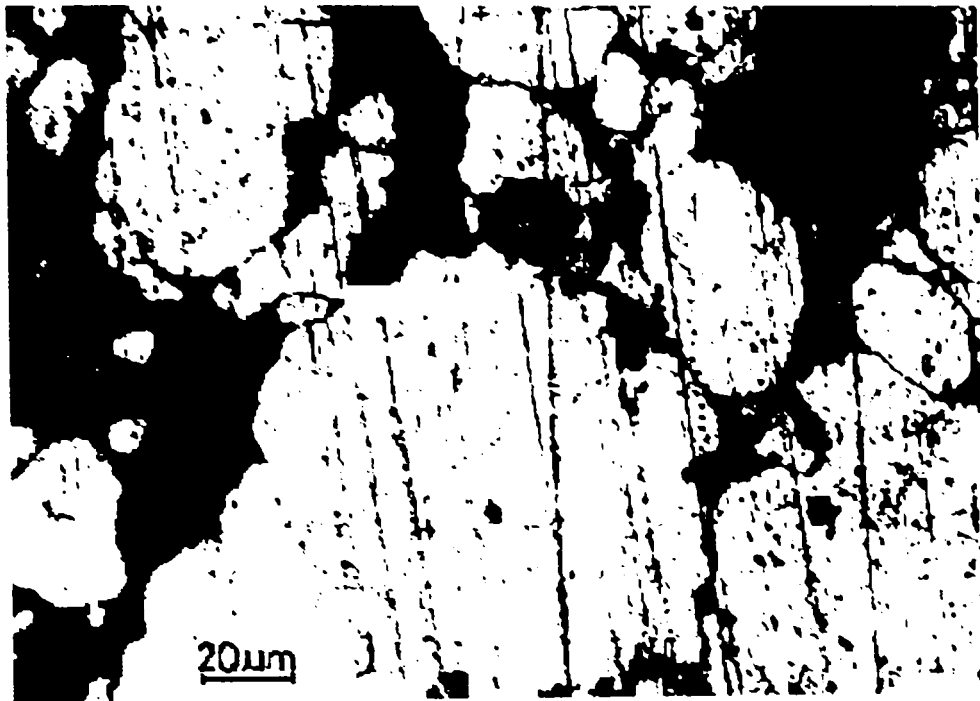


Fig.V.3. Proba cu $\rho = 0.8144$

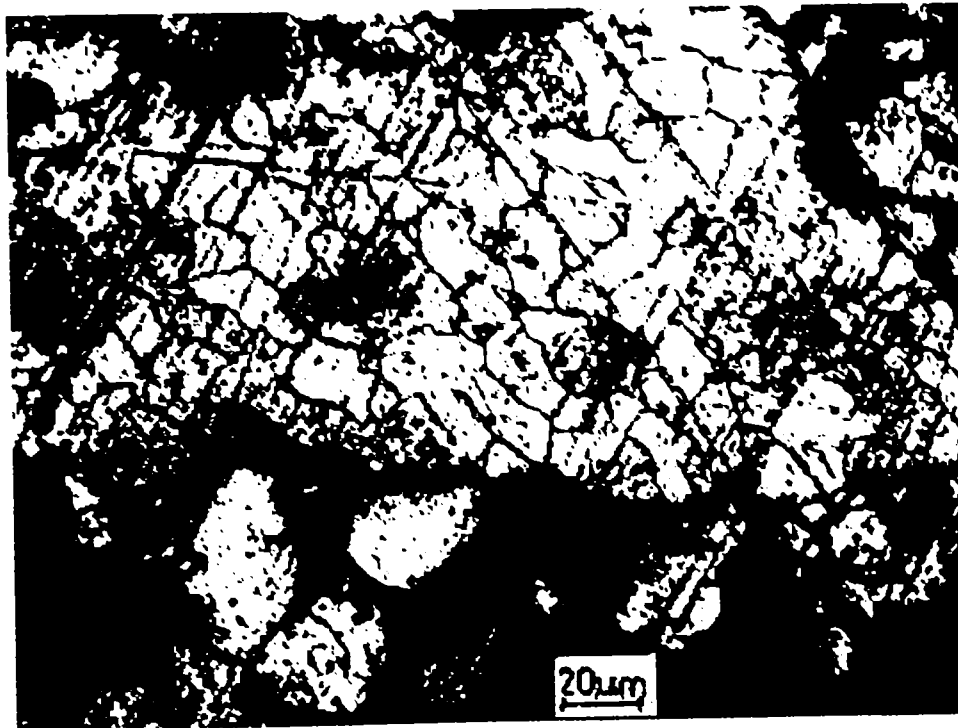


Fig.V.4. Proba cu $\rho = 0.864$



Fig.V.5. Proba cu $\rho = 0,7274$.

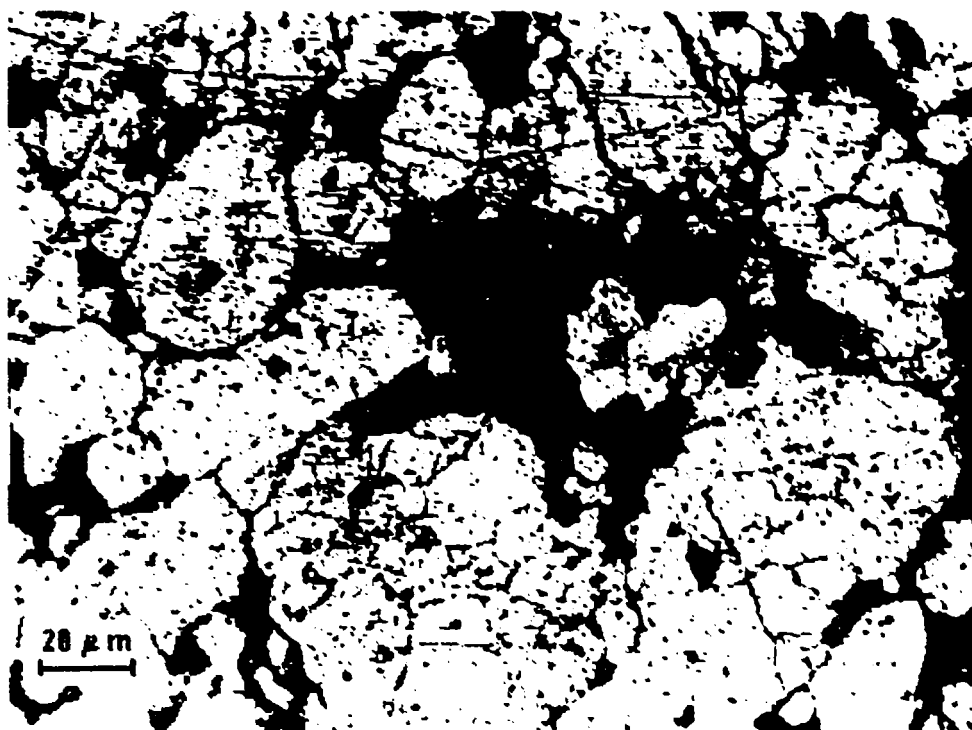


Fig. V.6. Proba cu $\rho = 0,82$.

Studiul fotografiilor probelor obținute prin presare în matrită, urmată de compresiune simplă (densitățile probelor presate în matrită: 0,777 și 0,834) - Fig.V.7. și Fig.V.8 – conduce la aceeași concluzie, că în urma deformării

plastice particulele s-au deformat și eventual s-au fisurat. În acest caz s-a realizat o comparație între aceste probe și celelalte deoarece jocurile au fost făcute în manieră aleatoare și densitățile probelor sunt diferite.

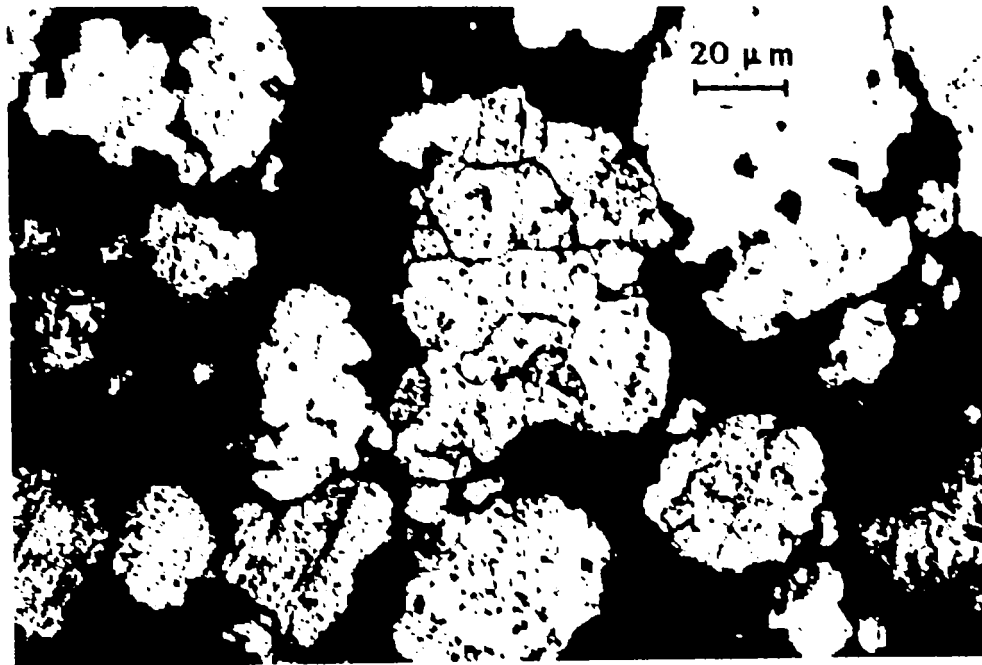


Fig.V.7 Proba cu $\rho = 0,777$

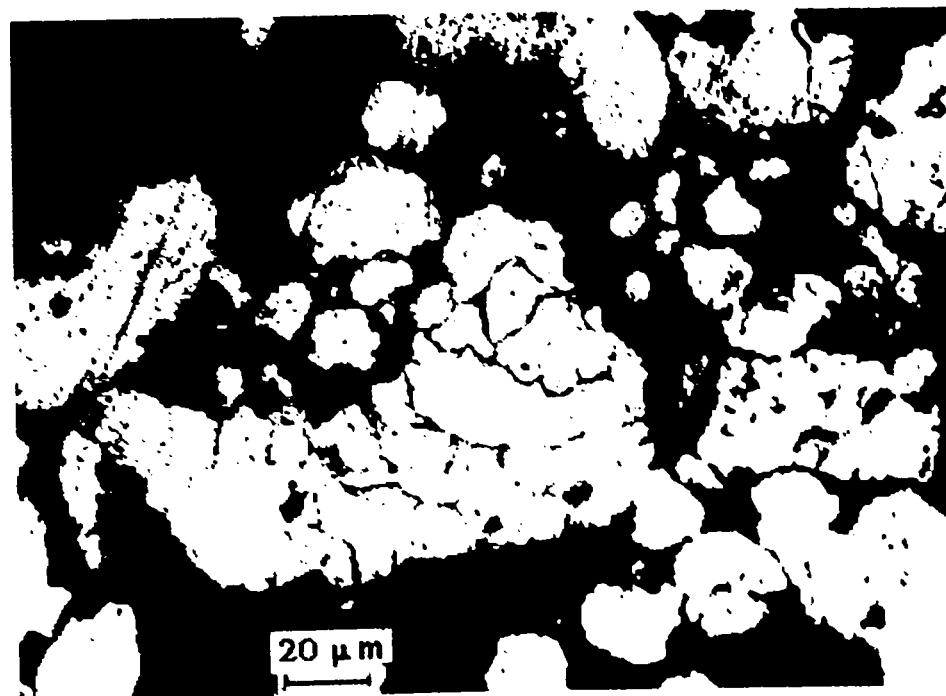


Fig.V.8. Proba cu $\rho = 0,834$

V.3.2. Studiul ecruisării probelor

Ecruisarea unui material este definită de către PONOMARIOV (1960):

„proprietatea materialului de a opune o rezistență din ce în ce mai ridicată deformării, pentru tensiuni care depășesc limita de curgere a materialului”. Duritatea este definită ca „rezistența pe care o opune materialul la pătrunderea unui corp exterior” (MOCANU 1982). Deci, duritatea unui material metalic crește cu gradul său de ecruisare; s-au efectuat măsurători de microduritate asupra comprimatelor din pulbere de fier presată, pentru a pune în evidență ecruisarea lor. S-a utilizat un aparat de tip PMT3, cu poanson piramidal Vickers de diamant, încărcat cu 50g. S-au efectuat 6-7 măsurători pentru fiecare probă, conform standardului (care impune minimum 5 măsurători), utilizând microscopul optic al aparatului, pentru a putea solicita matricea metalică și a evita porii.

Măsurătorile de microduritate efectuate pe probe conduc la curbele prezentate în figura V.9. Microduritatea crește cu densitatea, dar nu se poate face o comparație între probele izotrope și cele obținute prin presare în matrită, deoarece ultimele au fost studiate într-o zonă particulară (în vecinătatea peretelui probei), unde se presupune că densificarea este mai bună. Valorile microdurităților probelor obținute prin presare în matrită urmată de compresiune simplă sunt inferioare microdurităților celorlalte.

Figura V.10. reprezintă evoluția microdurității probelor obținute prin presare în matrită în funcție de presiunea aplicată de presă.

Comparând Fig.V.10 cu curbele furnizate de către HIRSCHORN și GAREY (1969) (Fig.V.11) pentru mai multe pulberi de fier presate unidirecțional în matrită, observăm aceeași alură crescătoare și valorile comparabile ale microdurităților; valorile obținute sunt puțin mai ridicate, în special pentru densitățile mai mari. O explicație ar putea consta în faptul că probele au fost

studiate într-o zonă particulară, în vecinătatea peretelui (Fig. V.1.b.), unde se presupune că densificarea este mai bună.

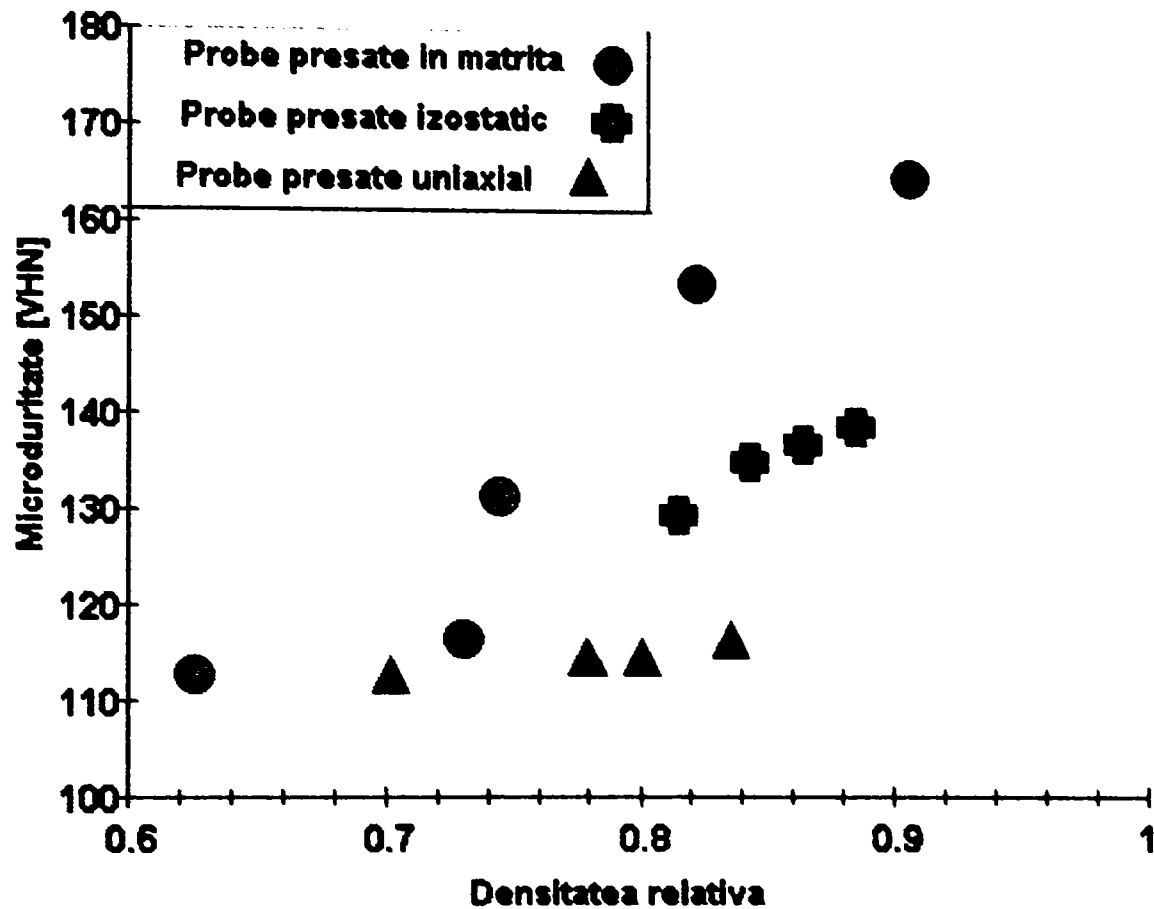


Fig.V.9. Evoluția microdurității în funcție de densitatea relativă a probelor.

În concluzie, cele două metode de studiu utilizate anterior conduc la aceeași idee: probele din pulbere de fier presată la temperatura ambiantă s-au ecrușat, adică, s-au deformat plastic ca urmare a solicitării. Fotografiiile făcute pe microscopul optic sunt dificil de interpretat. Creșterea continuă a curbelor de microduritate s-ar putea explica prin apariția deformației plastice încă de la începutul densificării, fapt pus în evidență de Hirschorn și Garey. Figura V.10 prezintă evoluția microdurității probelor obținute prin presare în matrită în funcție de presiunea aplicată de presă, iar Fig.V.11 prezintă aceleași mărimi reprezentate de Hirschorn și Garey pentru probele din diferite pulberi de fier studiate de ei. Se observă alături de creșterea ambelor curbe.

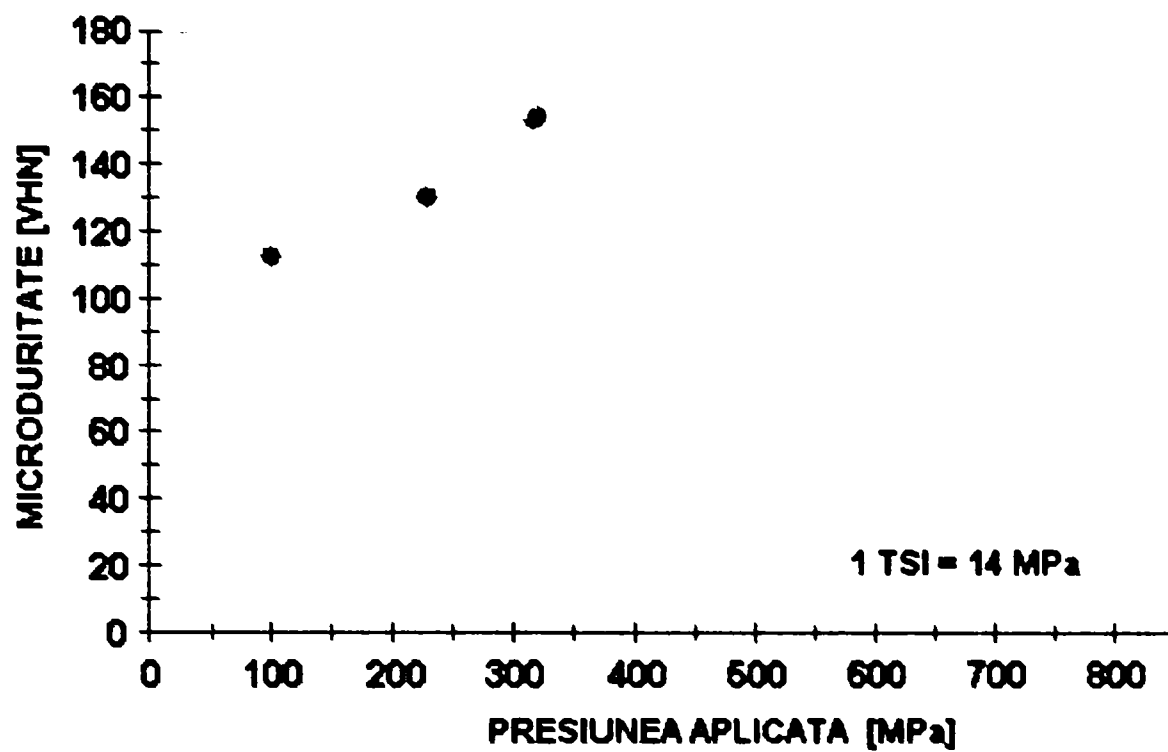


Fig.V.10. Evoluția microduratei probelor obținute prin presare în matriță, în funcție de presiunea aplicată de presă.

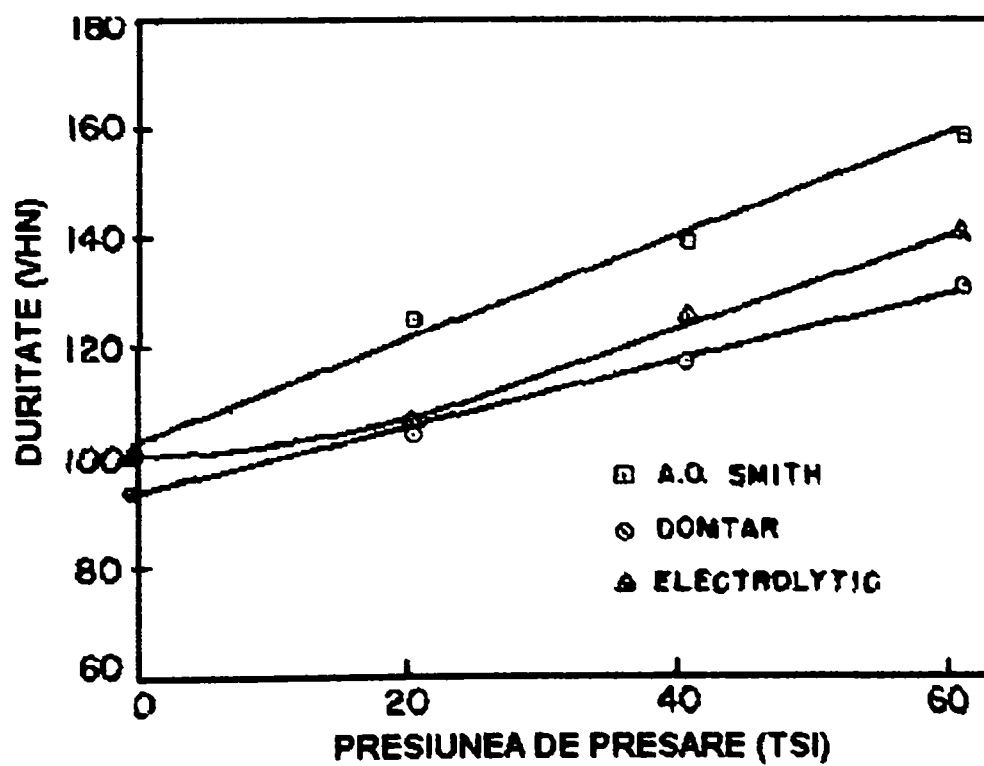


Fig.V.11. Evoluția microduratei probelor obținute prin presare în matriță, în funcție de presiunea aplicată de presă. Curbele lui Hirschorn și Garey.

V.4. Analiza liniară cantitativă a distribuției porilor în pulberea de fier presată la temperatura ambiantă

Proprietățile unui solid - material eterogen - sunt în general caracterizate de microstructura sa.

V.4.1. Metoda și aparatura

Analiza stereometrică a probelor prezentate în paragraful V.2. a fost realizată cu ajutorul analizorului de faze de tip Epiquant (Fig.V.13) de la I.S.I.M. Timișoara, programat în condițiile următoare:

- dimensiunile câmpului analizat : 1.4 mm x 1.4 mm;
- pas de măsură : 1 μ m;
- direcții de baleiere : x și y;
- înregistrarea datelor la imprimantă;
- faze analizate: A - particule negre (pori);
C - particule albe (matricea metalică).

Principiul de funcționare al aparatului Epiquant :

Metoda este valabilă numai pentru probe care pot fi studiate în lumină reflectată; ea se bazează pe proprietățile diferite ale fiecărei faze de a reflecta o rază incidentă, ceea ce permite evidențierea lor. Măsurătorile se fac de-a lungul unei linii de explorare (Fig.V.12.).

În planul imaginii reflectate există o diafragmă care captează lumina reflectată; un fotomultiplicator (1) transformă radiația luminoasă într-un semnal electric care este utilizat de partea electronică a aparatului.

Intensitatea acestui semnal indică natura fazei intersectate de linia de explorare; durata sa indică lungimea fazei.

Aparatul poate distinge 3 faze pe care le analizează într-o singură explorare, determinând numărul de particule și lungimile corzilor intersectate de către linia de explorare (Fig.V.12.), și face repartiția fazelor în 13 clase de dimensiuni.

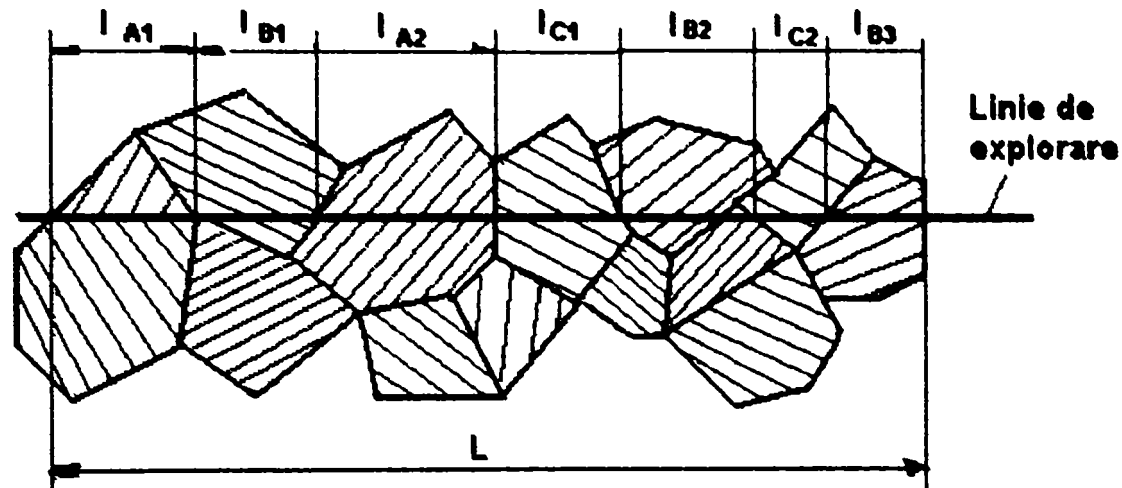


Fig.V.12. Linia de explorare și fazele intersectate.

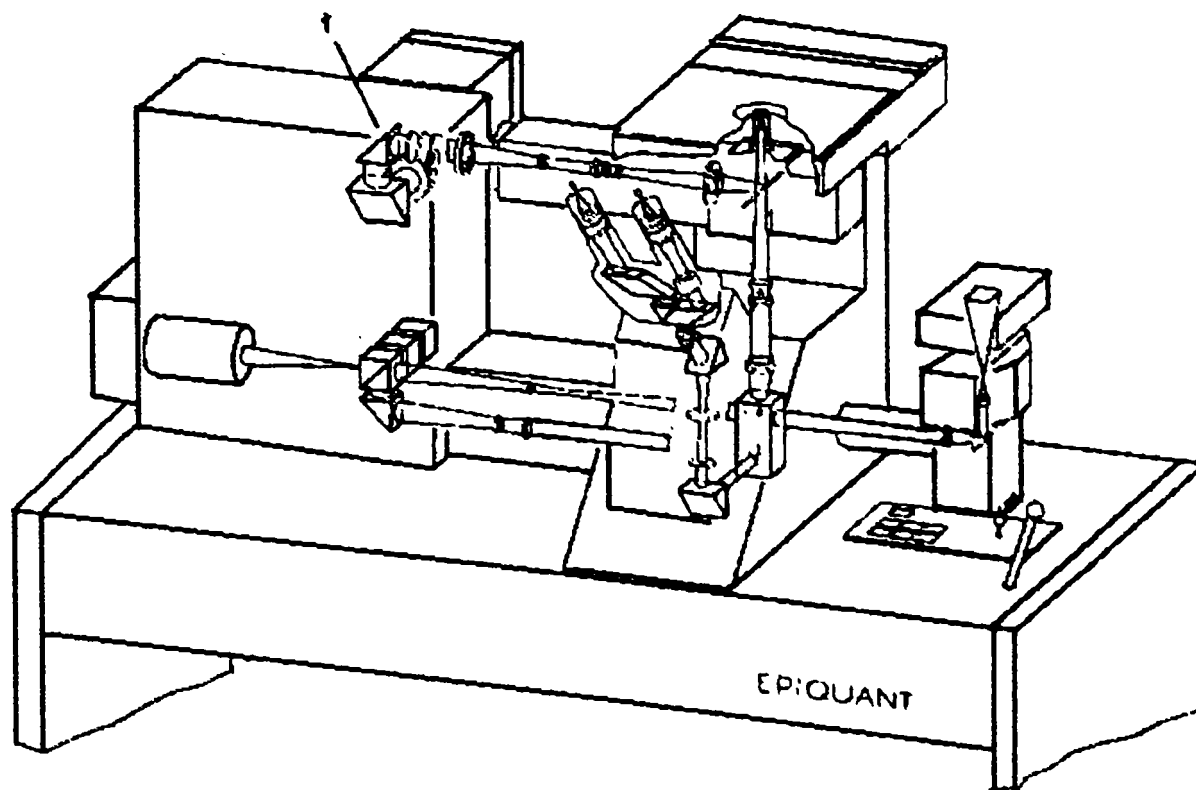


Fig.V.13. Aparatul Epiquant.

Tabelul 1. prezintă cele 13 clase de dimensiuni; limitele fiecărei clase formează o progresie geometrică cu rația $\sqrt{2}$.

TABELUL 1.

CLASE DE DIMENSIUNI												
Dimensiuni ale particulelor [μm]												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1...	1.4...	2...	2.8...	4...	5.6...	8...	11.2..	16...	22.4..	32...	44.8..	>64
1.4	2	2.8	4	5.6	8	11.2	..16	22.4	..32	44.8	..64	

Parametrii structurii spațiale pot fi determinați cu ajutorul datelor primare stereometrice furnizate prin punct, arie, sau linie de explorare, deoarece analiza stereometrică cantitativă caracterizează din punct de vedere tridimensional microstructurile prin măsurători pe suprafețe plane.

Pentru fiecare probă au fost analizate, 5 câmpuri ; amplasarea lor pe probă și ordinea de analiză sunt prezentate în figura V.14.a pentru secțiunile longitudinale și în figura V.14.b. pentru secțiunile transversale. Primul câmp este situat în centrul geometric al probei. Fiecare câmp a fost baleiat în direcțiile x și y, de-a lungul a 25 de linii paralele pentru fiecare direcție, ca în figura V.15.

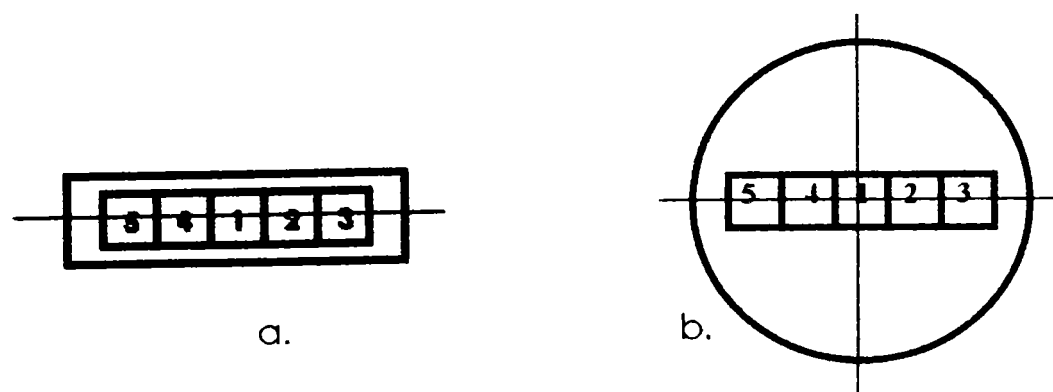


Fig.V.14.Câmpuri de analiză a probelor.

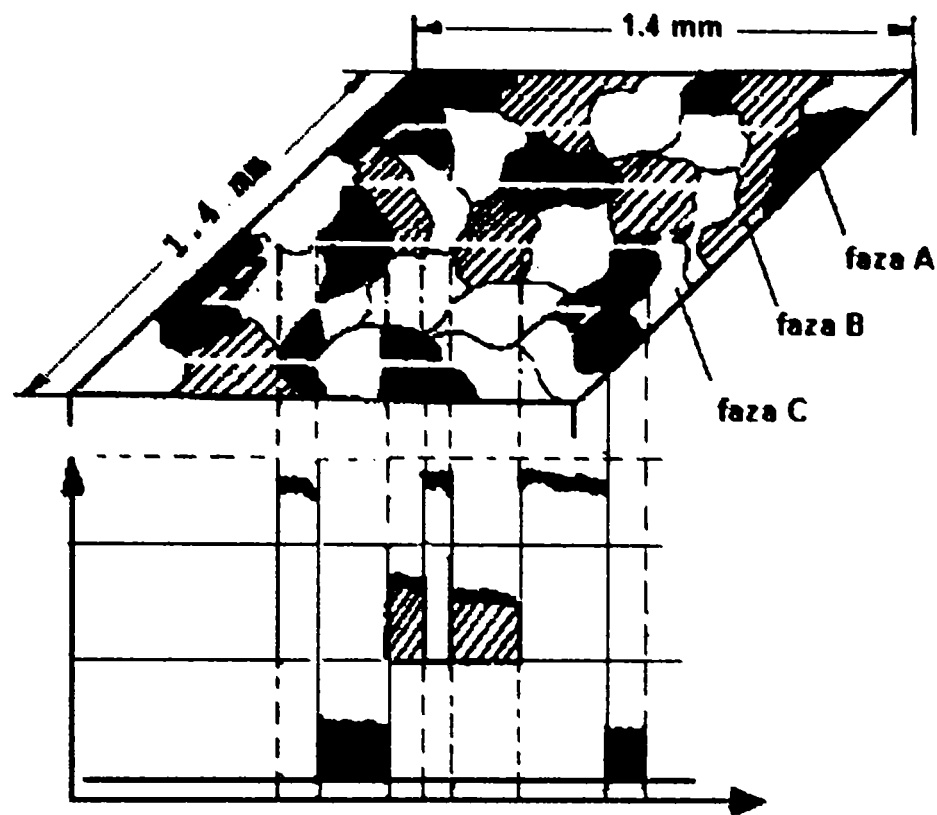


Fig.V.15. Baleierea câmpurilor analizate.

Rezultatele furnizate de aparatul Epiquant sunt:

- numărul de particule ale fazei A (faza neagră - pori, n_A);
- numărul de particule ale fazei B;
- numărul de particule ale fazei C (faza albă - matricea metalică, n_C);
- numărul de particule aparținând claselor de dimensiuni 1 la 12;
- numărul de particule în clasa de dimensiuni 13 și al particulelor neclasate;
- lungimea grăunților fazei A (l_A);
- lungimea grăunților fazei B (l_B);
- lungimea grăunților fazei C (l_C).

Mărimile determinate sunt:

- dimensiunea medie a porilor pentru fiecare probă ;
- frecvența relativă a porilor pe clase de dimensiuni;
- porozitatea pentru suprafața analizată.

Metodica de prelucrare a datelor furnizate de aparat este prezentată în Anexa 2.

V.4.2. Rezultate obținute

V.4.2.1. Probe izotrope

Pe baza datelor din tabelul 1, Anexa 2.2 (care prezintă numărul total de pori pe clase de dimensiuni, pentru toate câmpurile analizate și pentru fiecare densitate) s-a reprezentat în figura V.16. frecvența relativă de apariție a porilor [%] pe clase de dimensiuni, pentru comprimatele izotrope.

Pentru $\rho = 0,8144$, frecvența relativă de apariție a porilor nu variază prea mult în funcție de clasele de dimensiuni; în schimb, pentru $\rho = 0,885$, predomină porii mici; pentru $\rho = 0,864$ era posibilă apariția mai multor pori mici.

Utilizând relațiile A.V.1, A.V.2 și rezultatele analizei efectuate cu aparatul Epiquant (tabelele 2 și 3 din Anexa 2.3) s-a reprezentat grafic comparația între porozitățile medii ale porilor [%] pentru probele izotrope în funcție de densitățile lor relative (Fig.V.17). Proba cea mai densă prezintă porozitatea cea mai scăzută.

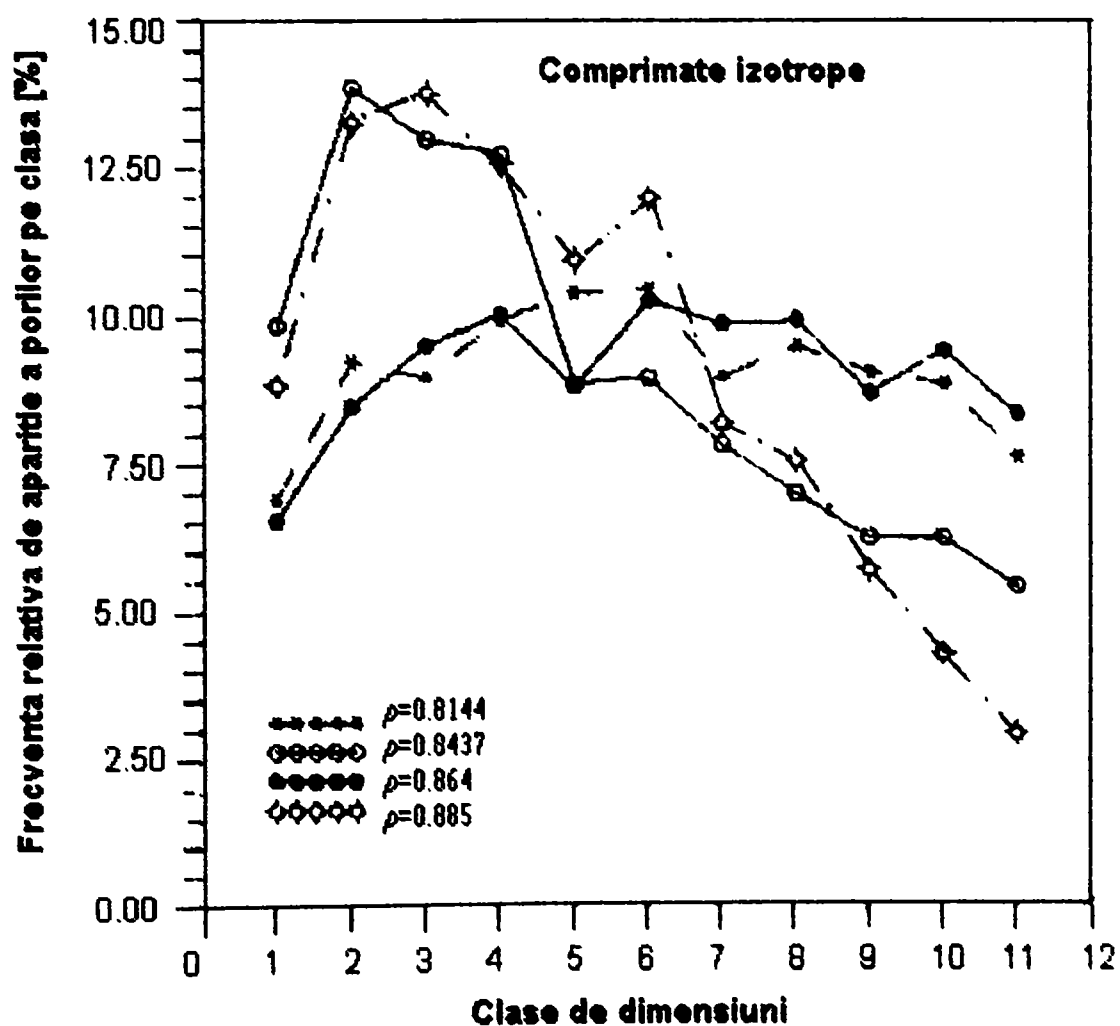


Fig. V.16. Frecvența relativă de apariție a porilor pentru probele izotrope.

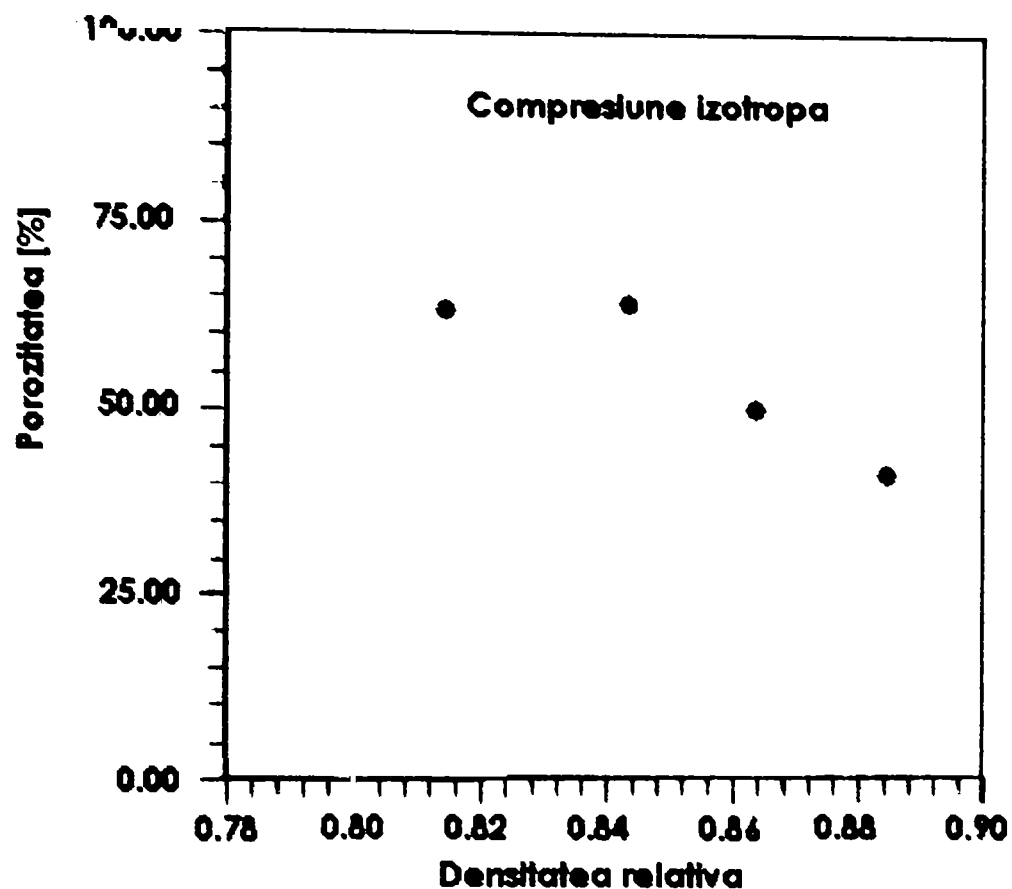


Fig.V.17. Evoluția porozității probelor izotrope.

V.4.2.2. Probe presate uniaxial în matrită

Pe baza datelor furnizate de aparatul Epiquant (tabelul 4, Anexa 2.4) s-a reprezentat frecvența relativă de apariție a porilor pe clase de dimensiuni, pentru probele presate în matrită (Fig.V.18); pentru densitățile mari predomină porii de dimensiune mică și mijlocie.

Pe baza datelor experimentale (tabelele 5 și 6, Anexa 2.5) s-a reprezentat porozitatea probelor presate în matrită în funcție de densitățile lor relative (Fig. V.19). Se remarcă diminuarea accentuată a porozității cu creșterea densității probei.

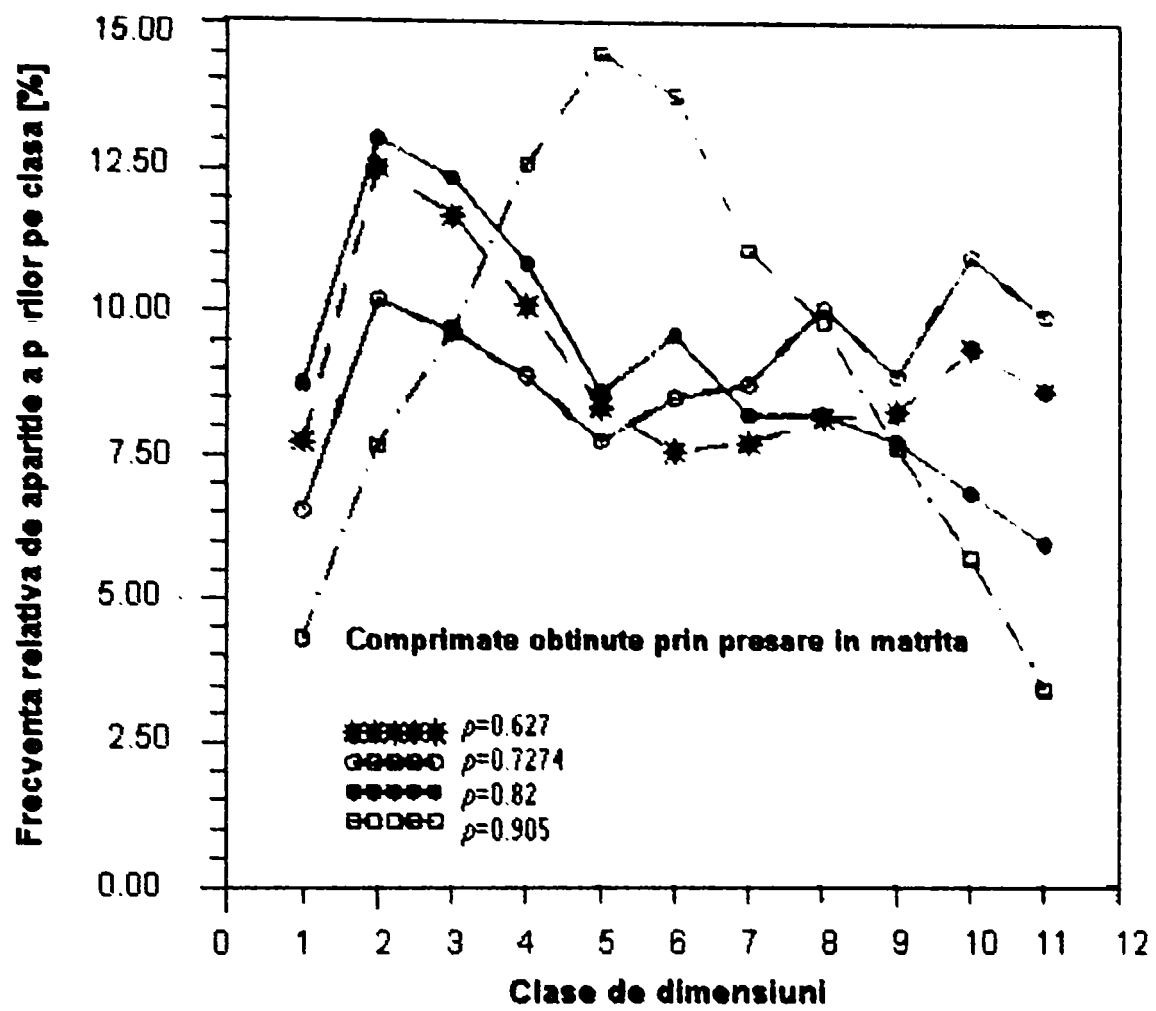


Fig.V.18. Frecvența relativă de apariție a porilor (probe presate în matrită).

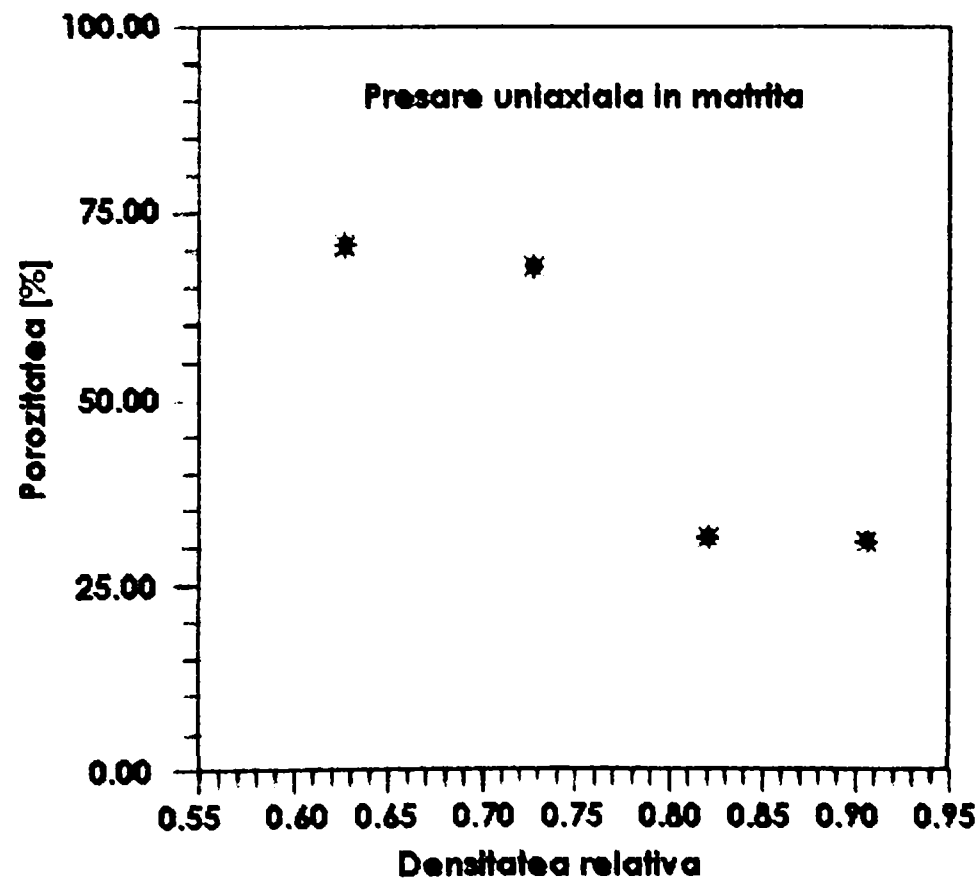


Fig.V.19. Evoluția porozității probelor presate uniaxial în matrită.

V.4.2.3. Comparație între probele izotrope și cele presate în matrită

Figura V.20. furnizează dimensiunile medii ale porilor pentru probele izotrope și pentru cele obținute prin presare în matrită, în funcție de densitatea relativă a comprimatelor. Formula (A.V.1 – Anexa 2.1) a fost utilizată pentru calculul dimensiunilor medii ale porilor. Global, dimensiunile medii ale porilor comprimatelor izotrope sunt mai mici decât cele ale probelor obținute prin presare în matrită.

Totuși, dacă facem o comparație între probele de densități apropiate, în conformitate cu figura V.20, proba obținută prin presare izotropă până la densitatea $\rho = 0,8144$ are pori de dimensiuni medii mult mai mici decât proba obținută prin presare în matrită (pană la densitatea $\rho = 0,82$).

Explicația poate consta în poziția particulară a secțiunii longitudinale a probelor obținute prin presare în matrită, în vecinătatea peretelui matritei, unde densificarea este mai bună.

Se remarcă dimensiunile medii ale porilor comparabile, pentru proba izotropă cu $\rho = 0,885$ și proba presată uniaxial în matrită, cu $\rho = 0,82$.

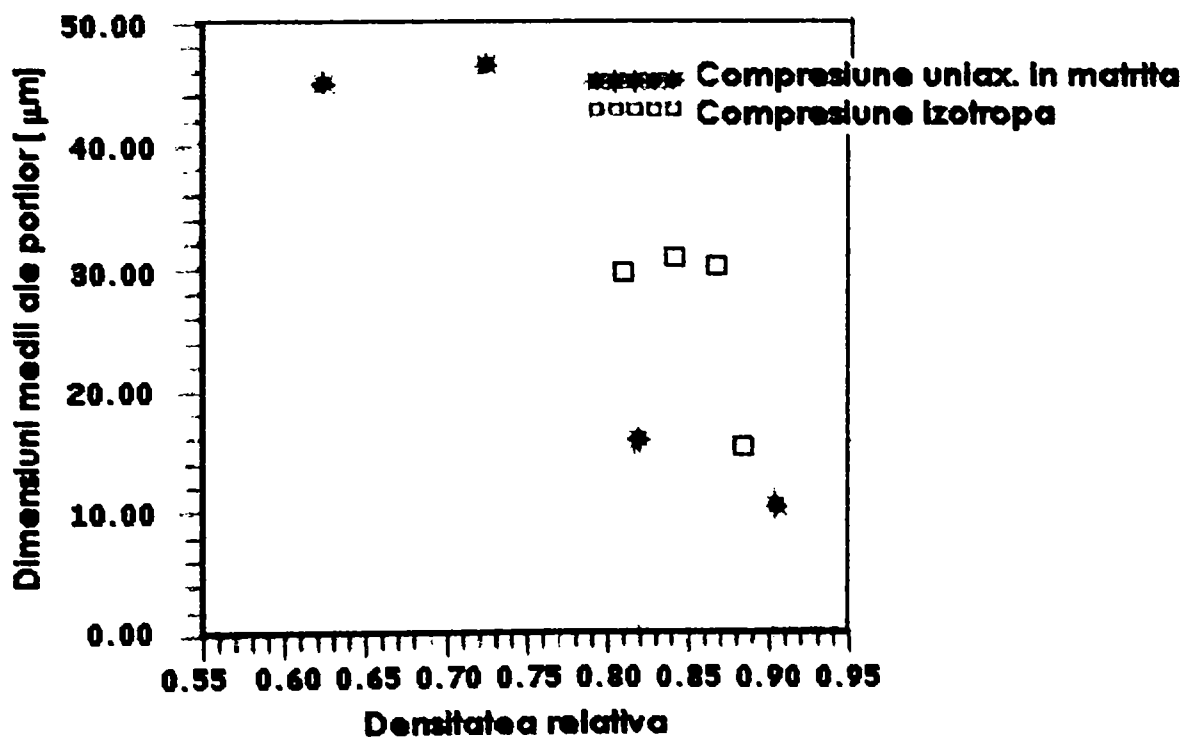


Fig.V.20. Comparație între dimensiunile medii ale porilor probelor presate prin metode diferite, reprezentate în funcție de densitățile lor relative .

În figura V.21 se prezintă comparativ porozitățile probelor presate în matrită și ale celor izotrope, în funcție de densitățile relative ale acestora.

Datorită poziției particulare a secțiunii longitudinale a probelor obținute prin presare în matrită, (în vecinătatea peretelui matritei, unde densificarea este mai bună datorită frecării) porozitatea acestor probe este net inferioară (31,18%).

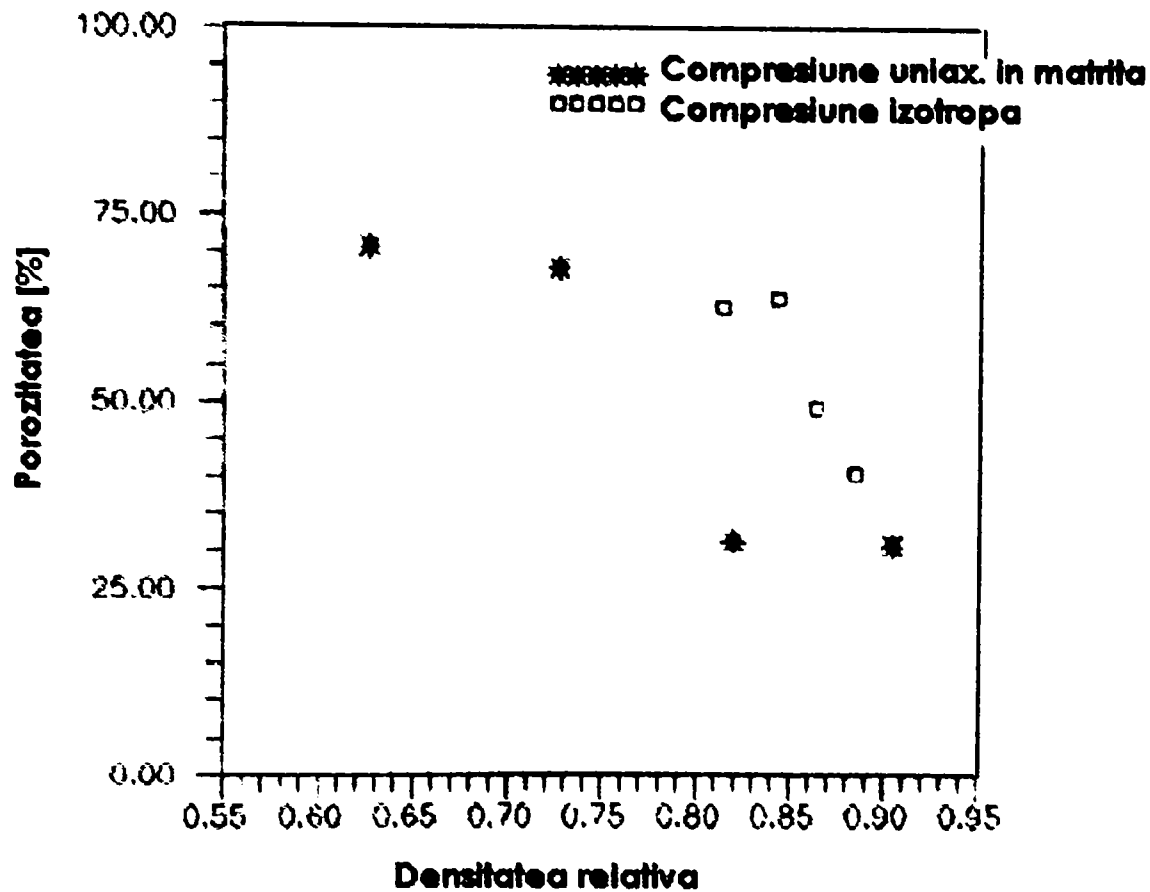


Fig.V.21. Comparație între porozitățile probelor presate prin metode diferite, reprezentate în funcție de densitățile lor relative .

V.5. Concluzii

Analiza stereometrică a probelor din pulbere de fier presată prin metode diferite aduce informații asupra densificării.

Studiul probelor izotrope indică o repartiție neomogenă a porilor (în secțiunea analizată), din punctul de vedere al dimensiunilor lor cât și al gradului de porozitate corespunzător diferitelor densități relative.

Rezultatele analizei stereometrice nu sunt edificatoare pentru probele presate uniaxial în matriță, datorită zonei particulare studiate (în vecinătatea peretelui matriței unde densificarea este mai bună).

CAPITOLUL VI

SIMULARE NUMERICA

VI.1. Prezentarea programului LAGAMINE

Legea de comportament elaborată pentru modelarea comportamentului unei pulberi de fier presate la temperatura ambiantă a fost integrată în programul de analiză cu elemente finite LAGAMINE de la Universitatea din Liege, Belgia, special elaborat pentru materiale pulverulente.

Programul LAGAMINE conține subprogramele: EMailL – pentru discretizare, pre-procesorul LAGAPRE, procesorul, LAGABA și post-procesorul, DESFIN (Fig.VI.1) și permite rezolvarea problemelor elastice, elastoplastice, elastovâscoplastice și termomecanice.

Pre-procesorul citește și transformă date ingineresti (informații asupra discretizării, condiții la limită, legi constitutive utilizate, simetrii) reunite în fișiere cu extensia „.dat” în date de tip elemente finite (două fișiere care nu sunt direct lisibile) și verifică coerența lor.

Procesorul este programul de calcul propriu-zis; el funcționează cu două tipuri de fișiere. Primul conține datele din fișierele descrise mai sus; al doilea este așa numitul fișier de „încărcare” care conține datele referitoare la strategia de calcul (număr maxim de iterații pe pas de calcul, parametrii de convergență, controlul salvării pașilor de calcul).

Post-procesorul permite vizualizarea grafică a rezultatelor după ce acestea au fost selectate (SELECT).

Programul LAGAMINE este scris în limbaj FORTRAN și conține o bibliotecă de legi constitutive care poate fi alimentată în funcție de nevoi și în care am implementat legea de comportament elaborată în capitolul II, structura programului permițând utilizatorului să introducă o nouă lege sub forma unui subprogram, fără ca acest lucru să afecteze restul programului. Subprogramul aferent legii de comportament este aplicat la fiecare pas de integrare al fiecărui element. Fiecare lege stocată în bibliotecă are un număr

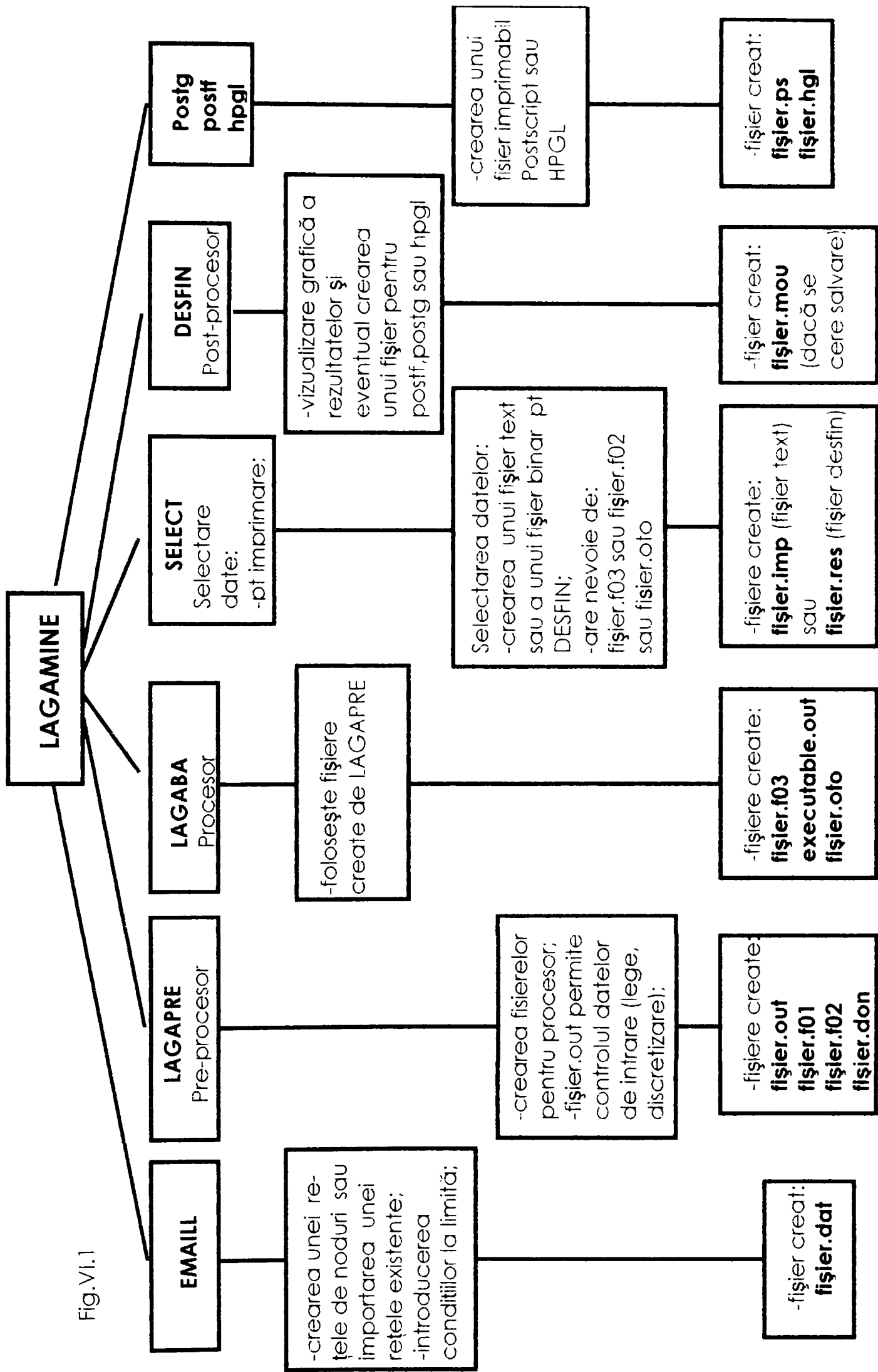


Fig.VI.1

(o adresă) care permite utilizatorului să o apeleze, în funcție de cerințele calculelor.

Legile constitutive elastoplastice, fiind de tip incremental, pot fi descrise cu ajutorul derivatelor temporale ale tensiunilor și deformațiilor; pentru a obține soluția, trebuie să se integreze numeric legea de comportament. Metodele numerice nepermițând verificarea echilibrului în fiecare moment, se presupune că echilibrul este atins o dată la fiecare pas de timp.

Am implementat legea de comportament (II.1) în programul LAGAMINE și aceasta se găsește în biblioteca programului la adresa 760, sub denumirea PELL2AN1; programul PELL2AN1.for scris în limbaj Fortran este prezentat în ANEXA 3.

VI.2. INTEGRAREA LEGILOR ELASTOPLASTICE

VI.2.1. Generalități

Integrarea numerică a legilor de comportament se bazează pe respectarea condiției de coerență, [CHARLIER 1994] adică, de a obține la sfârșitul unui traseu de încărcare plastică o stare de tensiune situată pe suprafața de plasticitate actualizată de ecrisare. În programul LAGAMINE există 3 metode prin care se poate determina noua suprafață de plasticitate și noua stare de tensiune care respectă condiția de coerență: și anume, schema „normalei medii”, metoda „normalei la început de pas” și „ metoda returului radial” . Cele 3 metode diferă prin direcția normalei \mathbf{n} utilizate. În calculele următoare am utilizat metoda returului radial, care exprimă echilibrul la sfârșitul fiecărui pas de timp.

Legile constitutive sunt de tip incremental:

$$\underline{\dot{\sigma}} = \underline{C} \underline{\dot{\varepsilon}} + \underline{f}(\underline{\sigma}) \quad (\text{VI.1})$$

unde

$\dot{\underline{\sigma}}$ = tensorul vitezelor de tensiune ;

$\dot{\underline{\epsilon}}$ = tensorul vitezelor de deformație ;

\underline{C} = tensor care caracterizează legea elastoplastică;

$\underline{f}(\underline{\sigma})$ = tensor care reprezintă efectul vâscozității ;

Valorile inițiale ale tensorilor $\underline{\sigma}$ și $\underline{\epsilon}$ sunt cunoscute : sunt valorile la începutul pasului studiat, deci la sfârșitul pasului precedent. Dacă se cunosc $\underline{\epsilon}$ și $\underline{C}(\underline{\sigma})$ în fiecare moment al pasului, se poate integra relația (VI.1). În esență, programul se bazează pe calculul incrementului de deformație în fiecare moment.

Tensiunile finale depind în general de calea de integrare utilizată . Programul efectuează iterații succesive ; în timpul fiecărei iterații trebuie să se evalueze o nouă stare finală de tensiune.

În timpul efectuării unui pas pot apărea 3 tipuri de comportament :

- deformația este pur elastică;
- deformația este întâi pur elastică, apoi devine elastoplastică;
- deformația este în permanență elastoplastică.

Oricare ar fi starea inițială de tensiune, $\underline{\sigma}^A$, într-o primă etapă se presupune că deformația este pur elastică ; se calculează starea de tensiune $\underline{\sigma}^E$, la sfârșit de pas elastic (Fig.VI.2). În continuare se utilizează criteriul de plasticitate în starea A pentru a vedea dacă o parte a deformației este elastoplastică :

dacă $f(\underline{\sigma}^E, k^A) \leq 0$, pasul este pur elastic ;

dacă $f(\underline{\sigma}^E, k^A) > 0$, pasul este elastoplastic.

cu k = parametru de ecruisare.

Dacă starea de tensiune se găsește în interiorul suprafeței de plasticitate definită la început de pas (deformația fiind presupusă liniară pe parcursul

pasului de calcul), înseamnă că deformația este pur elastică și starea de tensiune la sfârșit de pas se găsește pe suprafața de plasticitate definită la început de pas.

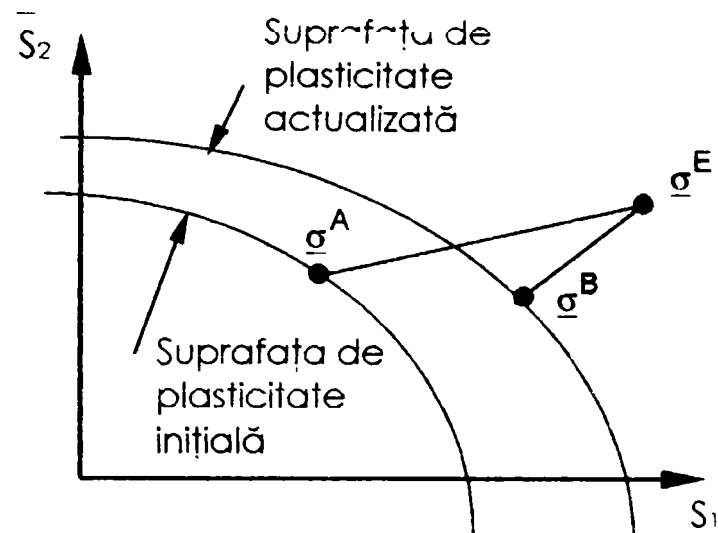


Fig.VI.2. Schema de integrare a legilor elastoplastice.

Dacă starea de tensiune $\underline{\sigma}^A$ la început de pas se situează pe suprafața de plasticitate inițială, (Fig.VI.2), deformația este elastoplastică. Ecuațiile constitutive în regim elastoplastic sunt date de relațiile (VI.2...VI.4) :

$$\dot{\underline{\varepsilon}} = \dot{\underline{\varepsilon}}^e + \dot{\underline{\varepsilon}}^p \quad (VI.2)$$

$$\dot{\underline{\sigma}} = \underline{C}^e \dot{\underline{\varepsilon}}^e = \underline{C}^e (\dot{\underline{\varepsilon}} - \dot{\underline{\varepsilon}}^p) \quad (VI.3)$$

$$\dot{\underline{\varepsilon}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}} \quad (VI.4)$$

Relația (VI.3) constituie ecuația de bază pentru integrarea legilor elastoplastice. Procesul global astfel descris poate fi înlocuit prin 2 mecanisme de deformare; primul este pur elastic și trebuie calculate tensiunile "pseudo-elastice" $\underline{\sigma}^E$. Al doilea mecanism, plastic, corespunde unui proces de relaxare a tensiunilor pentru a regăsi suprafața de plasticitate actualizată, $\underline{\sigma}^B$ (Fig.VI.2).

Trebuie deci să se calculeze într-o primă etapă starea de tensiune la sfârșitul traseului elastic $\underline{\sigma}^E$:

$$\underline{\sigma}^E = \underline{\sigma}^A + \underline{C}^e \underline{\Delta \varepsilon} \quad (VI.5)$$

apoi să ne întoarcem pe suprafața de plasticitate actualizată cu ecrusarea la sfârșit de pas (calculul lui $\underline{\sigma}^B$, Fig. VI.2) . Oricare ar fi metoda de revenire pe suprafața de plasticitate actualizată, trebuie să se cunoască direcția normalei la aceasta.

VI.2.2. Funcționarea subprogramului

Subprogramul PELL2AN1.for prezentat în cele ce urmează se găsește în ANEXA 3.

Etapele de calcul efectuate la fiecare pas și pentru fiecare punct de integrare sunt prezentate în organigrama din Fig.VI.3.

Calcululele din bucla mare a organigramei se repetă pentru fiecare componentă a tensorului viteză de deformație.

La începutul primului pas, la timpul 0, tensiunile sunt inițializate.

VI.2.3. Metoda returului radial

Aceasta metodă de calcul descrie procesul de relaxare a tensiunilor "elastice" $\underline{\sigma}^E$ pentru a găsi suprafața de plasticitate actualizată $\underline{\sigma}^B$ (Fig.VI.2).

Se calculează simultan normala $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$ în B și starea de tensiune $\underline{\sigma}^B$ la sfârșit de pas.

Raționamentul are ca punct de plecare relația (VI.5) scrisă pentru starea

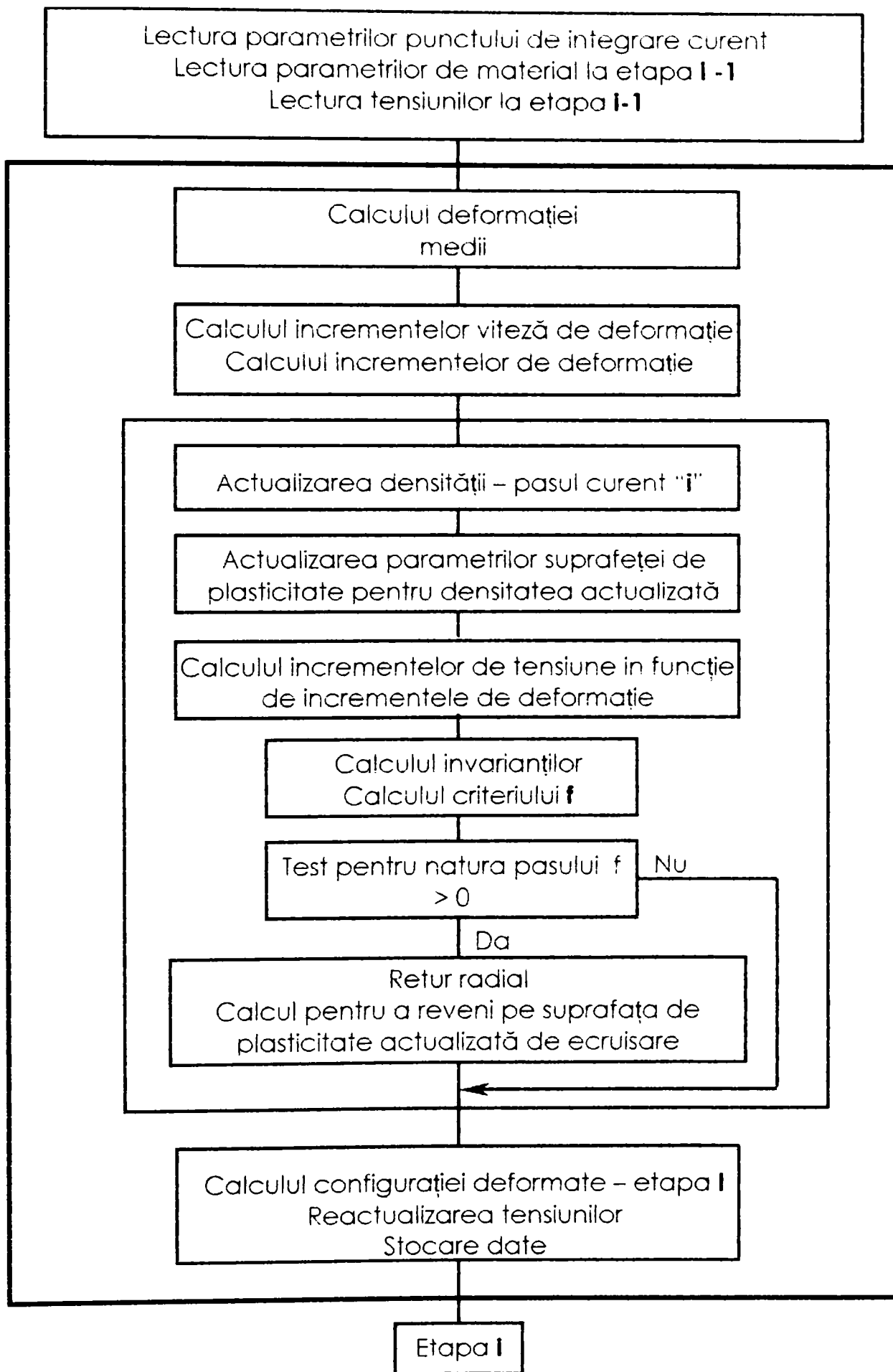


Fig.VI.3. Etapele de calcul efectuate la fiecare pas.

de tensiune corespunzătoare punctului B :

$$\underline{\sigma}^B = \underline{\sigma}^A + \underline{C}^e \underline{\Delta \varepsilon} \quad (VI.6)$$

unde :

$$\underline{\Delta \varepsilon} = \underline{\varepsilon} - \lambda \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}_{ij}}$$

$$\text{și } C_{ijkl}^e = \frac{E}{1+\nu} \delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \delta_{ij} \delta_{kl}$$

E = modulul de elasticitate longitudinal.

La pasul (i - 1) programul calculează starea de tensiune în punctul A ; la pasul actual, (i), presupunând deformația pur elastică, se calculează starea de tensiune în punctul E (Fig.VI.2) în funcție de starea de tensiune inițială (în A), ceea ce conduce la relația următoare :

$$\underline{\sigma}^B = \underline{\sigma}^E + \underline{C}^e \underline{\Delta \varepsilon} \quad (VI.7)$$

Primul invariant al tensorului tensiunilor corespunzătoare punctului E, (S_1^E) poate deci fi calculat.

Multiplicatorul plastic are forma următoare, cu S_1^E cunoscut și S_1^B de determinat :

$$d\lambda = \frac{S_1^E - S_1^B}{\delta_{ij} \left(C_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \right)} \quad (VI.8)$$

VI.2.4. Integrarea modelului propus

Conform convenției de semn „-„ pentru tensiunile de compresiune care a fost

utilizată în programul LAGAMINE, în calculele următoare, legea de comportament propusă, (II.1) a fost utilizată sub forma (VI.15):

$$f = \bar{S}_2 - k(-S_1 - x)^n (1 + S_1)^p \quad (VI.9)$$

Pentru modelul propus, multiplicatorul plastic (relația VI.8) are forma :

$$d\lambda = - \frac{(S_1^E - S_1^B)(-12\nu)}{3kE \left[-n(-S_1^B - x)^{n-1} (1 + S_1^B)^p + p(-S_1^B - x)^n (1 + S_1^B)^{p-1} \right]} \quad (VI.10)$$

Componentele deviatorului stării de tensiune corespunzătoare punctului B sunt date de relația următoare :

$$\bar{\sigma}_{ij}^B = \frac{\bar{\sigma}_{ij}^E}{1 - F(S_1, \bar{S}_2)} \quad (VI.11)$$

unde $F(S_1, \bar{S}_2)$ se determină astfel:

$$F(S_1, \bar{S}_2) = - \frac{S_1^E - S_1^B}{\delta_{mn} \left(C_{mnop}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{op}} \right)} \left[C_{ijkl}^p \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} - \frac{\delta_{ij}}{3} \left(\delta_{mn} C_{mnkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} \right) \right] \quad (VI.12)$$

Pentru modelul (II.1) prezentat în capitolul II, $\bar{\sigma}_{ij}^B$ se obține de forma:

$$\bar{\sigma}_{ij}^B = \frac{\bar{\sigma}_{ij}^E}{1 - \frac{(S_1^E - S_1^B)(1 - 2\nu)}{3k^2 \left[-n(-S_1^B - x)^{2n-1} (1 + S_1^B)^{2p} + p(-S_1^B - x)^{2n} (1 + S_1^B)^{2p-1} \right]} (1 + \nu)} \quad (VI.13)$$

Introducând în legea de comportament (II.1) deviatorul stării de tensiune corespunzător punctului B calculat mai sus, $\bar{\sigma}_{ij}^B$, se ajunge la o ecuație $f(S_1^B)=0$, care impune situarea pe suprafața de plasticitate actualizată prin densitate (care trece prin punctul B):

$$f(S_1^B) = \bar{S}_2^E - f_1(S_1^B) k (-S_1^B - x)^n (1 - S_1^B)^p = 0 \quad (VI.14)$$

cu $f_1(S_1^B) =$

$$= \left[1 - \frac{(S_1^E - S_1^B)(1 - 2\nu)}{3k^2 \left[-n(-S_1^B - x)^{2n-1} (1 - S_1^B)^{2p} + p(-S_1^B - x)^{2n} (1 + S_1^B)^{2p-1} \right] (1 + \nu)} \right] \quad (VI.15)$$

Pentru a găsi soluția S_1^B a ecuației (VI.13) am utilizat metoda secantei (Fig.VI.4), soluția fiind dată de relația (VI.16) :

$$(S_1^B)_{n+1} = (S_1^B)_n - \left[(S_1^B)_n - (S_1^B)_{n-1} \right] \frac{f((S_1^B)_n)}{f((S_1^B)_n) - f((S_1^B)_{n-1})} \quad (VI.16)$$

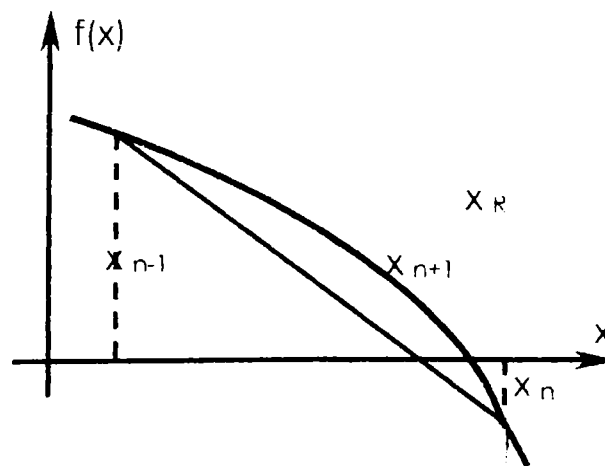


Fig.VI.4. Metoda secantei.

În figura VI.4, $x = S_1^B$, iar x_R = rădăcina.

VI.3. Simularea încercărilor simple

Obiectivul acestui paragraf este de a verifica corespondența dintre simularea numerică și rezultatele experimentale.

Legea de comportament propusă în capitolul II, implementată în programul LAGAMINE, fost utilizată pentru a simula formarea unei pulberi de fier prin următoarele procedee: presare uniaxială în matriță și presare izotropă.

VI.3.1. Presarea uniaxială în matriță

Calcululele au fost efectuate folosind elemente izoparametrice cu 8 noduri și elemente de contact cu 3 noduri. Figura VI.5 prezintă rețeaua de noduri folosită pentru ansamblul pulbere-matriță. Nodurile din zona de contact dintre pulbere și matriță sunt blocate pe direcția "x" iar compresiunea este realizată printr-o deplasare impusă pe direcția "y". Pentru luarea în considerare frecării în zona de contact dintre pulbere și peretele matriței s-au folosit elemente de tip CNTCP; pentru deplasarea pistonului superior s-a folosit elementul tip "Fondation".

Fig VI.6. prezintă campul tensiunilor axiale, iar Fig. VI.8. redă distribuția densității pulberii presate uniaxial în matriță.

Pentru verificarea rezultatelor obținute prin simularea presării uniaxiale în matriță s-a considerat ca densitatea relativă a comprimatului obținut este $\rho = 0,954$; parametrii modelului, introduși în program, s-au calculat cu relațiile (VI.17):

$$k = 1,27(\rho - 0,47) - 9,997(\rho - 0,47)^2 + 48,363(\rho - 0,47)^3 - 136,845(\rho - 0,47)^4 + 195,119(\rho - 0,47)^5 \quad (VI.17)$$

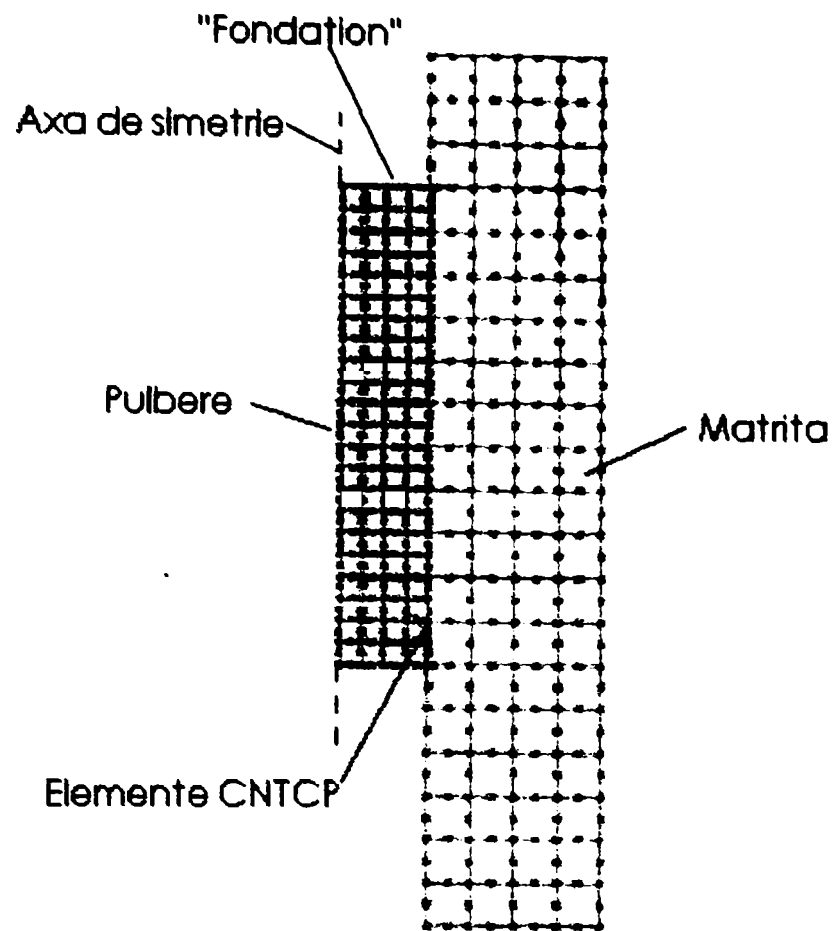


Fig.VI.5. Rețeaua de noduri folosită pentru simulare.

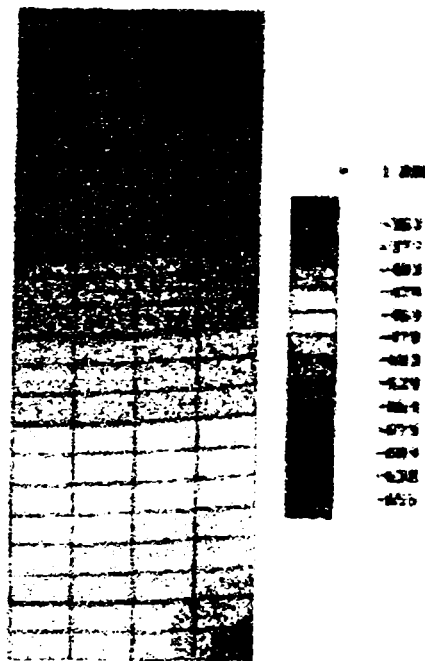


Fig.VI.6. Câmpul tensiunilor axiale.

$$\begin{aligned}
 n &= 1,535 - 2,427(\rho - 0,47) \\
 p &= 0,316 + 0,168(\rho - 0,47) \\
 x &= -5,84(\rho - 0,47) - 523,14(\rho - 0,47)^2
 \end{aligned}
 \tag{VI.17}$$

Valorile parametrilor obținute pentru $\rho = 0,954$ sunt:

$$\begin{aligned}
 k &= 1,4295 \\
 n &= 0,3603 \\
 p &= 0,3973 \\
 x &= -119,3.
 \end{aligned}$$

Am utilizat de asemenea valoarea experimentală $l = 1535,81$ (pentru $\rho = 0,954$).

Rezolvând sistemul de ecuații :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \sigma_z + 2\sigma_r \\
 \sqrt{\frac{3}{2}} S_2 &= \sigma_z - \sigma_r
 \end{aligned}
 \tag{VI.18}$$

am calculat: $\sigma_z = 582\text{MPa}$ și $\sigma_r = 416\text{MPa}$.

Simularea conduce la: $\sigma_z = 581,9\text{MPa}$ și $\sigma_r = 417,4\text{MPa}$; precizia simulării este deci foarte bună.

În Fig.VI.7 este prezentată comparația între rezultatele simulării numerice realizate pentru presarea uniaxială în matrită a pulberii de fier și datele experimentale.

VI.3.2. Presarea izotropă

Presarea izotropă a pulberii de fier s-a realizat aplicând pulberii cu densitatea relativă la începutul încercării $\rho = 0,7$ două deplasări impuse, după direcțiile

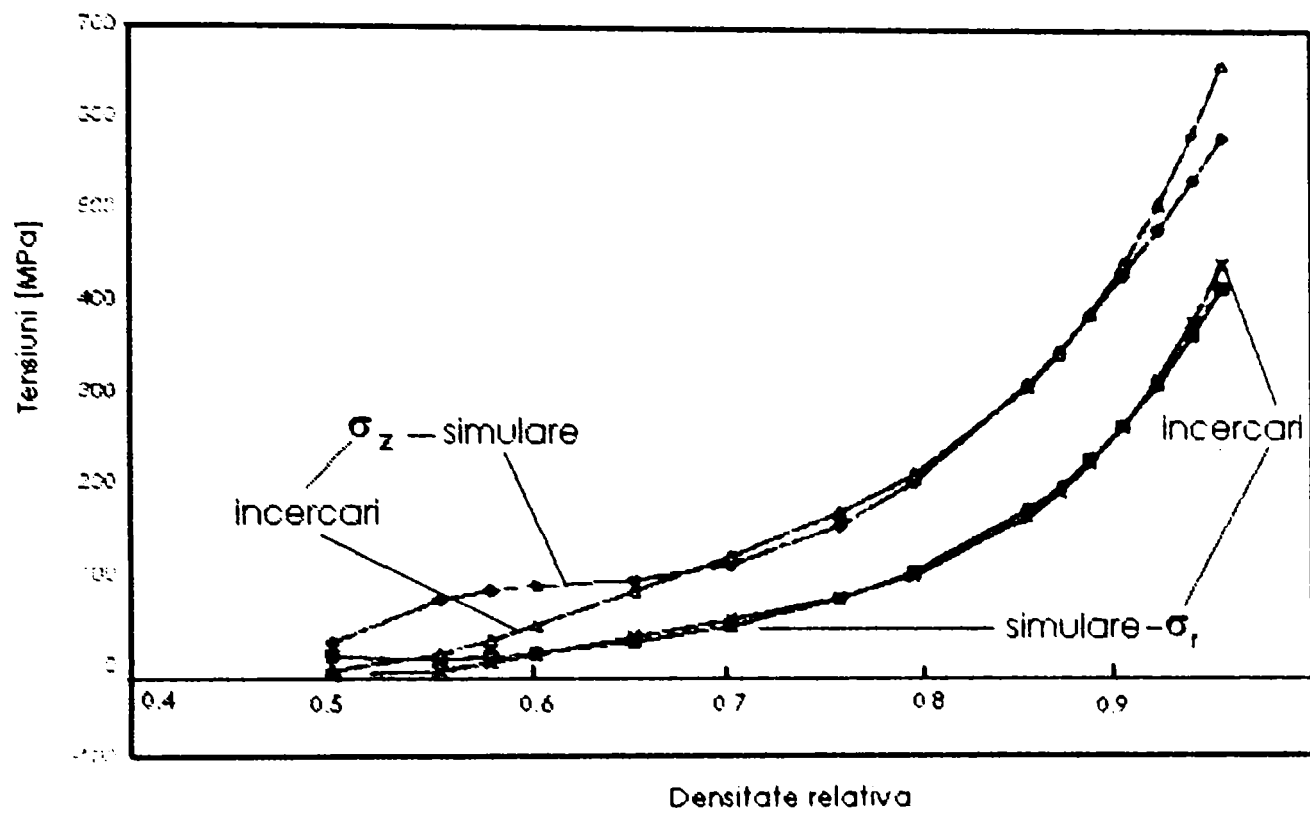


Fig.VI.7. Comparație între rezultatele simulării și încercări, pentru presarea uniaxială în matriță.

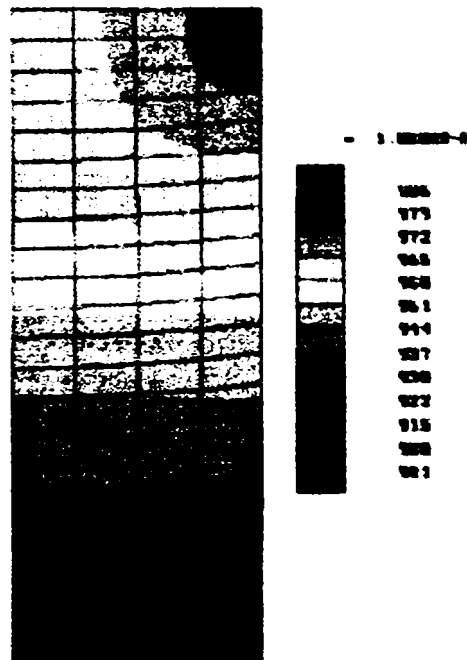


Fig.VI.8. Distribuția densității pulberii presate uniaxial în matriță.

"x" și "y". Rezultatele simulării descriu perfect încercările experimentale (Fig.VI.9).

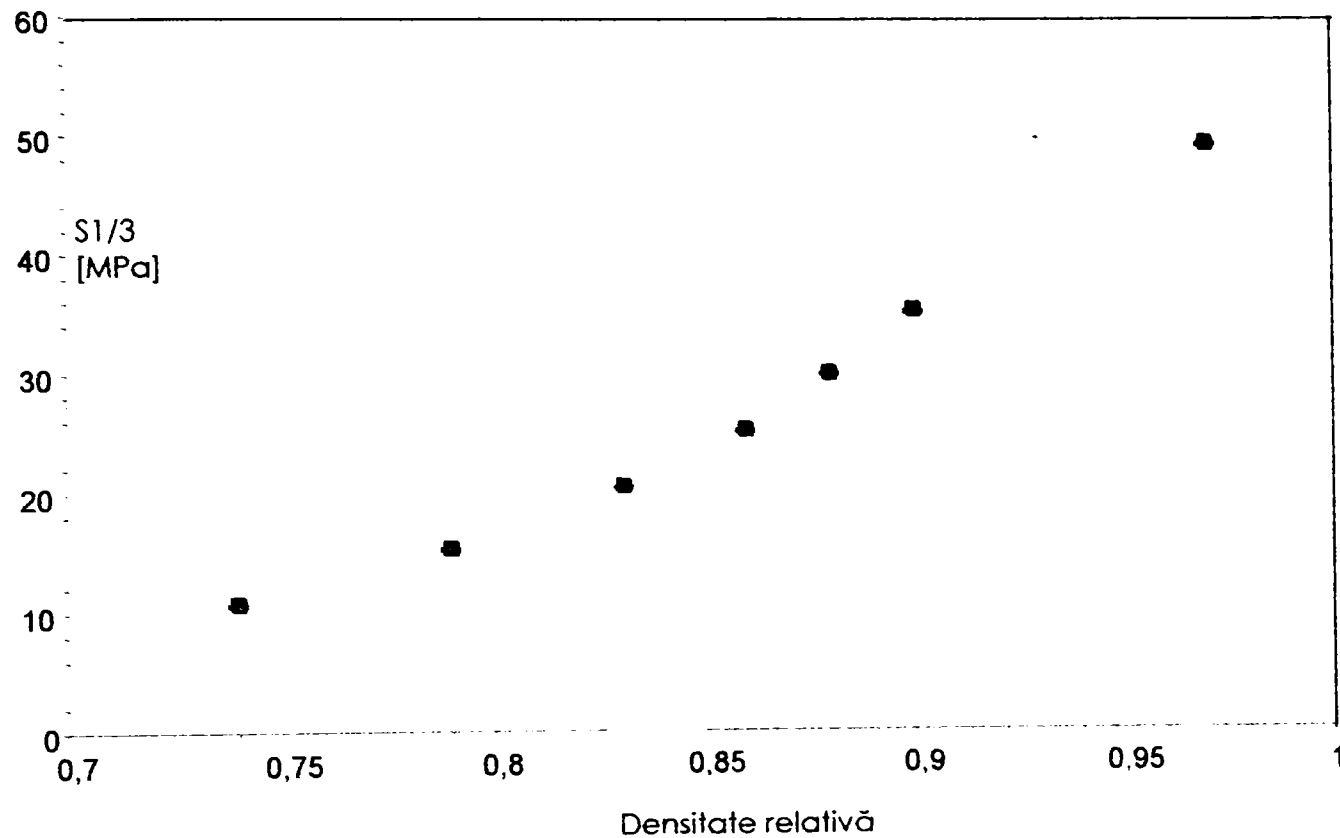


Fig.VI.9. Presarea izostatică – simulare și încercări.

VI.4. Concluzii

Simularea încercărilor de presare uniaxială în matrită și presare izotropă, utilizate pentru formarea unei pulberi de fier, a condus la rezultate deosebit de satisfăcătoare. Simularea este precisă, programul LAGAMINE fiind întrutotul adecvat descrierii comportamentului pulberilor metalice presate la temperatura ambiantă.

VII. CONCLUZII GENERALE

Lucrarea de față se încadrează în domeniul de mare actualitate privind formarea pieselor în Metalurgia pulberilor și reprezintă sinteza activității de cercetare pe care am desfășurat-o pe parcursul mai multor ani, în cadrul Catedrei de Rezistența Materialelor a Universității „Politehnica” Timișoara și în cadrul laboratorului „Sols, Solides, Structures” al „Institut National Politehnique” din Grenoble.

Caracteristicile mecanice ale pieselor sinterizate depind fundamental de densitatea și calitățile comprimatelor obținute prin presare la temperatura ambiantă, fapt care constituie motivația științifică a abordării tematicii acestei teze, referitoare la presarea pulberilor metalice la temperatura ambiantă, și nu la studiul propriu-zis al pieselor sinterizate.

Prin prisma acestei abordări, obiectivele acestei teze au fost modelarea comportamentului unor pulberi metalice în timpul formării la temperatura ambiantă (în contextul realizării unei sinteze a modelelor de comportament existente la ora actuală în literatura de specialitate) și realizarea unei caracterizări experimentale a comportamentului mecanic al unor pulberi de fier și bronz, în timpul presării la temperatura ambiantă.

VI.1. Contribuții personale

1. Sinteza modelelor de comportament din literatura de specialitate și clasificarea lor în trei mari categorii, în funcție de tipul materialelor pentru care acestea sunt elaborate, reprezintă o contribuție originală care aduce o imagine nouă, de ansamblu, asupra stadiului cercetării științifice în acest domeniu; este vorba de modele pentru materiale solide poroase, modele pentru materiale pulverulente de tip soluri și modele special elaborate pentru pulberi metalice.

2. Elaborarea unei soluții originale pentru modelarea comportamentului pulberii cu ajutorul unui model asimetric, care aproximează bine încercările de compresiune simplă, izotropă și în matrită; modelul este definit cu ajutorul a 5 parametri dependenți de parametrul de ecrusare : rezistența la tracțiune izotropă (x), primul invariant al tensorului tensiunilor calculat pentru presarea izotropă (I), și parametri prin care se ajustează forma suprafeței de plasticitate și valorile maxime ale invariantilor tensorului tensiunilor (k , n și p).

3. Determinarea multiplicatorului plastic „ $d\lambda$ ” pentru modelul propus și pentru modelele cele mai utilizate în literatura de specialitate (Cam-clay și cap model), prin dezvoltarea și particularizarea formulei generale din teoria plasticității , utilizând calculul tensorial.

4. Justificarea matematică a avantajelor modelului și a modului în care acesta ameliorează performanțele modelelor existente, astfel:
 - permite trecerea de la un material cu consistență slabă la un material foarte dens;
 - suprafață de încărcare asimetrică, pentru a descrie comportamentul diferit al pulberii sub solicitări de compresiune și sub solicitarea de tracțiune;
 - suprafață de încărcare convexă, a cărei evoluție cu parametrul de ecrusare să fie limitată în tensiune medie de punctele de intersecție cu axa absciselor;
 - suprafața de încărcare admite tangente verticale în punctele de intersecție cu axa absciselor;
 - suprafețele de încărcare sunt limitate în tensiune deviatoare prin criteriul von Mises.

5. Justificarea alegerii deformației volumice plastice ca parametru de ecrusare pe baza studiului unei suprafețe de plasticitate $F(\sigma, p) = 0$,

reprezentată în planul deviator, și al variației densității pulberii pe orice traseu de încărcare, precum și determinarea deformației volumice plastice în funcție de densitatea pulberii și de starea de tensiune; diferite trasee de încărcare $F(\sigma, \rho) < 0$ conduc pe suprafața de plasticitate $F(\sigma, \rho) = 0$, dar fiecare conduce la puncte diferite de pe suprafața de plasticitate, care corespund la diferite densități relative. În schimb, fiecare încărcare elastică este legată de aceeași deformație volumică plastică ε_v^p corespunzătoare acestei suprafețe de plasticitate (oricare ar fi traseul de încărcare).

6. Studiul funcționării modelului propus printr-o abordare nouă, prin prisma teoriei plasticității, a fenomenelor de densificare și dilatarea care apar în timpul presării pulberilor.

7. Determinarea experimentală a parametrilor modelului propus și ai celorlalte două modele studiate (Cam-clay și cap model), utilizând rezultatele experimentale (un punct de presare unidirecțională în matriță, un punct de compresiune izotropă și un punct de compresiune simplă, corespunzând rezistenței la compresiune simplă a unui comprimat obținut prin presarea unidirecțională a pulberii), și următoarele ecuații:

-ecuația suprafeței de plasticitate utilizată pentru presarea unidirecțională în matriță;

-ecuația suprafeței de plasticitate utilizată pentru compresiunea simplă;

-legea normalității din teoria plasticității aplicată la presarea unidirecțională în matriță;

- legea normalității pentru compresiunea simplă ;

Presarea izotropă dă imediat parametrul I;

Parametrii k, n, p, x au fost obținuți calând aceste ecuații pe datele experimentale pentru zece valori ale deformației volumice plastice

corespunzătoare densităților relative: 0,7, 0,72, 0,74, 0,76, 0,78, 0,8, 0,82, 0,84, 0,87, 0,9). S-a folosit programul TEORIST.

8. Verificarea experimentală a validității modelului prin compararea suprafețelor de încărcare corespunzătoare la diferite densități relative ale pulberii comprimate cu valorile experimentale. S-a folosit programul utilitar EXCEL.
9. Analiza comparată a modelelor cele mai utilizate din literatură și a modelului propus, care arată originalitatea, oportunitatea și avantajele utilizării acestuia:
 - dependența de un număr redus de parametri;
 - buna flexibilitate în raport cu rezultatele experimentale;
 - prezicerea comportamentului în tracțiune al pulberii;
 - buna reproductibilitate a rezultatelor experimentale.
10. Sinteza și studiul mijloacelor de laborator din literatura de specialitate utilizate pentru presarea unidirecțională în matriță și pentru presarea triaxială.
11. Studiul evoluției densității comprimatelor din pulbere de fier și bronz în timpul încercărilor, prin compararea acestora cu previziunilor unor criterii din literatura de specialitate (Heckel, Kawakita) ; se remarcă buna corespondență dintre previziunile modelelor lui Heckel și Kawakita și rezultatele experimentale obținute pentru pulberea de fier. S-a folosit programul utilitar Table Curve.
12. Calculul coeficientului de frecare pulbere-matriță, pornind de la ecuația de echilibru a unui element de înălțime infinitezimală „dz” decupat din comprimat, asupra căruia acționează componentele

stării de tensiune specifice solicitării uniaxiale în matriță a pulberii. Frecării pulbere-matriță i se datorează unul din defectele care determină rebutarea pieselor sinterizate, și anume, densitatea variabilă a comprimatelor.

13. Studiul deformației plastice a particulelor din pulbere de fier, pe parcursul presării la temperatura ambiantă, realizat prin:

-aprecierea calitativă a deformației plastice pe baza fotografiilor unor suprafețe ale unor secțiuni ale probelor, făcute pe microscopul optic;

-evaluarea ecruisării probelor prin măsurători de microduritate efectuate asupra probelor comprimate, (duritatea unui material metalic crescând cu gradul său de ecruisare);

-analiza liniară cantitativă a distribuției porilor în pulberea de fier presată la temperatura ambiantă realizată cu ajutorul analizorului de faze de tip Epiquant de la I.S.I.M. Timișoara.

Analiza stereometrică cantitativă caracterizează din punct de vedere tridimensional microstructurile prin măsurători pe suprafețe plane.

14. Realizarea unui program scris în limbaj FORTRAN pentru implementarea legii de comportament elaborate în capitolul II, în programul de analiză cu elemente finite LAGAMINE; simularea presării izostatice și uniaxiale în matriță a pulberii de fier.

BIBLIOGRAFIE

ABOU- CHEDID G., BROWN S.B., - On the mechanical of metal powder compaction. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 1992, vol 2.

BORTZMEYER D., - *Compaction des poudres céramiques*. Thèse, 1990.

BOUVARD D., - *Frittage des poudres métalliques et céramiques*. Cours de 3-e année de la filière Matériaux et structures. Ecole Nationale Supérieure de Hydraulique et de Mécanique, Grenoble 1994 .

BOUVARD D., CIZERON G., - *La métallurgie des poudres*, La Recherche N. 270, nov. 1994 .

BRUHNS O., SLUZALEC A., *Densification of Powder Metals with Assumed Ellipsoidal Yield Surface*. *Int. J. Mech. Sci.* vol.35, No.9, 1993.

BUZDUGAN Gh. – *Rezistentă materialelor*, E.D.P., Bucuresti, 1964.

CARROLL M.M., HOLT A.,C., *Suggested modification of the P-a-model for porous materials*. *J. Appl. Phys.* 43, 1972.

CORAPCIOGLU Y., UZ T., *Constitutive equations for plastic deformation of porous materials*. *J. Powder Techn.* 21, 269, 1978.

CHARLIER R., *Approche unifiée de quelques problèmes non-linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis*. Thèse de Docteur en sciences appliquées de l'Université de Liege, 1994.

DESAI C.S., HASHMI Q.S.E., *Analysis, Evaluation and implementation of a nonassociative model for Geologic materials*. *Int. J. of Plasticity*, 1989.

DIMAGGIO F.L., SANDLER I.S., *J. Eng. Mech. Div. ASCE*, june 1991.

DI MILLIA R.A., REED J.S., - *J. of American Ceram. Soc.* 66, 1983.

DORAIVELU S.M., GEGEL H.L., GUNASEKERA J.S. *A new yield function for compressible P/M materials*. *Int. J. Mech. Sci.*, 26, 9, 1984.

- DOREMUS P., GEINDREAU C., Martin A., LECOT R., DAO M., - High pressure triaxial apparatus for investigating the mechanical behaviour of metal powder. *Congres mondial de métallurgie de poudres*, vol. 1.
- DOWSON G., - *Powder Metallurgy* – Adam Hilger, Bristol 1990.
- DUWEZ P., ZWELL L., Pressure distribution in compacting metal powders. *Metals Trans.*
- FARUQUE M.O., A third invariant independent cap model for geological materials. *Soils and Foundations* , vol.27, 2, 1987-Japanese Society of soils mechanics and Foundation Engineering.
- FLECK N., A., KUHN L., T., McMEEKING R., M., Yielding of metal powder bonded by isolated contacts. *J. Mech. Phys. Solids* vol. 40, No.5, 1992.
- GOVINDARAJAN R.,M., ARAVAS N., Deformation processing of metal powders: cold isostatic pressing. *Int. J. Mech. Sci.*, vol.36, No.4, 1993.
- GREEN R.J., A plasticity theory for porous solids. *Int. J. Mech. Sci.* 14, 215, 1972.
- ***Guide to the usage of sintered parts – Italian Metal Powder Industries Association- ASSINTER.
- GURSON A.L., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth, *ASME, J. Eng. Mater. Technol.* 99, 2, 1977.
- HÄGGBLAD H.-A., McEWAN K., Explicit versus implicit finite element simulation of metal powder compaction, *Numerical methods in industrial forming processes - Numiform'92*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 875, 1992.
- HÄGGBLAD H.-A., *Modelling and Simulation of Metal Powder Pressing-Doctoral Thesis-Lulea University of Technology*, 1993.
- HÄGGBLAD H.-A., DOREMUS P., BOUVARD D. An International Research Programme on the Mechanics of Metal Powder Forming. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* , 2, 1996.
- HECKEL R.W., - An analysis of powder compaction phenomena. *Transaction of the metallurgical Society of AIME* , vol.221, 1961.
- HEHENBERGER M., SAMUELSON P., ALM O., NILSON L., PLOFFSON T. - IUTAM Conf. *On Deformation and Failure in Granular Materials*, Delft 1982.

HELLE A.,S., EASTERLING K.,E., ASHBY M.,F., Hot-isostatic pressing diagrams: new developments. Acta metall. vol.33, No.12, 1985.

HEWITT R.L., WALLACE W., DE MALHERBE M.C., - Plastic deformation in metal powder compaction. Powder Metallurgy, 1974, vol. 17, N.33.

HIRSCHORN J.B., GAREY M.V., Plastic Deformation of Compacted Iron Powders; Int. J. of Powder Met., 1969.

KAWAKITA K., LUDDE K.H., - Some considerations on powder compression equations. Powder technology, vol. 4,1970.

KUHN H.A., DOWNEY C.L., Deformation characteristics and plasticity theory of sintered powder materials. Int. J. Powder Met., 7, 15, 1971.

LADE P. V., Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces Structures 1977, vol.13, Pergamon Press.

* Manuel de rhéologie de géomatériaux, 1987.

MATSUOKA H., NAKAI T., Stress deformation and strength characteristics under three different principal stresses. Proc. JSCE 232, 1974.

MATSUOKA H., NAKAI T., Relationship among Tresca, Mises, Mohr-Coulomb and Matsuoka-Nakai failure Criteria. Soils and Foundation, vol. 25, N.4, 1985.

MEYER R., - Poudres métalliques, Techniques de l'ingénieur, M862-M864 .

MOCANU D. R., Incercari de materiale, vol.1, E.D.P. Bucuresti, 1982.

MOSBAH P., Compression oedométrique des poudres de fer et de cuivre. Memoire de D.E.A., I.N.P. Grenoble, 1991.

MOSBAH P., Etude expérimentale et modélisation du comportement des poudres métalliques au cours du compactage en matrice fermée. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble 1995.

MOSBAH P., KOTERA H., KOJIMA J., A study of mechanical behaviour of iron powders by three and two-dimensional compaction. International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Process, Grenoble 1997.

MROZ Z., Mech. Phys. Solids, 15, 1967.

NOVA R., 'Sinfonietta classica': An exercise on classical soil modelling- Constitutive Equations for Granular non-Cohesive Soils, Saada & Bianchini (eds) 1988, Balkema, Rotterdam, ISBN 906191 789 1.

OLSZAK W., PERZINA P., SAWCZUK A., Teoria plasticitatii, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1970.

OYANE M., SHIMA S., KONO Y., Theory of plasticity for porous metals. Bull. JSME 16,1254, 1973.

OUEDRAOGO E., Etude de la densification des poudres métalliques au cours de la mise en forme. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1988.

PARK J.J., Constitutive relations to predict plastic deformations of porous metals in compaction. Int. J. Mech. Sci., vol. 37, 7, 1995.

PAVIER E., DOREMUS P., Comparison between constitutive equations modelling the compacting of iron powder and experimental data obtained with triaxial tests. International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Process. Grenoble, 1997.

PAVIER E., Caractérisation du comportement d'une poudre de fer pour le procédé de compression en matrice. Thèse, Grenoble 1998.

PETRESCU M., GADEA S., - Metalurgie fizica si studiul metalelor. E.D.P. Bucuresti, 1981.

PONOMARIOV S.D., Calcule de rezistenta pentru constructia de masini. Vol 1, E.D.P. Bucuresti, 1960.

PRAGER, W., Proc. Inst. Mech. Engrs., 169, 1955.

PREVOST J.H., Plasticity theory for soil stress-strain behaviour. J. Engh. Mech. Div., ASCE, 104, 1978.

ROSCOE K.H., SCHOFFIELD A.N., WROTH A.N., On the yielding of soils. Geotechnics 9-71, 1968.

ROWE P. W., The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. Proc. R. Soc. A., 269, 1962.

ROWE P. W., Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soil. Proc. Roscoe Meml. Symp. Cambridge, 1971.

SAVA M. Modèle de comportement rhéologique des poudres métalliques. Memoire d'Etudes Approfondies. Institut National Politechnique Grenoble, 1991.

SAVA M., TRIPA P., Considerație asupra stării de tensiune în pulberile metalice. Revista Metalurgia Nr. 4, 1993, pag.44-47.

SAVA M., TRIPA P., Considerație asupra stării de tensiune în pulberile de fier supuse la compresiune uniaxială. Sesiunea tehnico științifică a Universității Eftimie Murgu, Reșița, oct.1993.

SAVA M., TRIPA P., Considerație asupra stării de tensiune în pulberile de cupru supuse la compresiune uniaxială. Sesiunea tehnico științifică a Universității Eftimie Murgu, Reșița, oct. 1993.

SAVA M., Tripa P., Determinarea lucrului mecanic specific de volum la compresiunea uniaxială a pulberii de fier. Simpozion jubiliar "70 ani de la înființarea laboratorului de Rezistența materialelor", Timișoara, oct. 1993.

SAVA M. Calculul coeficientului de frecare pulbere-matriță în cazul pulberilor de fier supuse la compresiune uniaxială în matriță. Analele Universității din Oradea, mai 1994.

SAVA M. Calculul coeficientului de frecare pulbere-matriță în cazul pulberilor de cupru supuse la compresiune uniaxială în matriță. Analele Universității din Oradea, mai 1994.

SAVA M., Tripa P., Considerations sur la compression uniaxiale en matrice des poudres métalliques. Buletin științific și tehnic al U.T.T. Timișoara, tom 39 (53), 1994.

SAVA M., Modele de comportement des poudres de fer a froid. Buletin științific și tehnic al U.T.T. Timișoara, tom 39 (53), 1994, pg.75-79.

SAVA M., Stutz P., Stresses of diepressed iron powder – an approach to hypoelasticity. Conference on product. Engineering with foreign participation. Belgrad, sept 1994, pg. 603-608.

SAVA M., Etude de la deformation plastique des particules de poudre de fer au cours de la compression a froid. Buletin științific și tehnic al U.P.T. Timișoara, tom 41 (55), 1996.

SAVA M., Constitutive Equations for Cold Pressed Iron Powder-Formulation and Experimental Identification. International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Process. Grenoble, 1997.

SHIMA S., OYANE M., Plasticity theory for porous metals. *Int. J. Mech. Sci.*, vol.37, no.7, 1976.

SHIMA S., OYANE M., TABATA , Considerations of basic equations and their application in the forming of metal powder and porous metals. *J. Mech. Working Technology*, 1, 1978.

SHIMA S., SALEH M.A.E., Development of constitutive equations for granular materials with induced anisotropy during compaction processes. *Advances in Micromechanics of Granular Materials*, 1992, Elsevier Science Publishers.

SHIMA S., KOTERA H., MOSBAH P., KOJIMA J., Influence of the third stress invariant on iron powder behaviour during compaction. *Int. Workshop on Modelling of Metal Powders Forming Processes*, Grenoble, 1997.

SHTERN M., Qualitative Methods for the Mechanics of Compaction. *International Workshop on Modelling of Metal Powder Forming Processes*, Grenoble, 1997.

SURDEANU T., PERNES M., - Piese sinterizate din pulberi metalice, Editura Tehnica, Bucuresti, 1984 .

STUTZ P., Contribution à l'étude de la loi rhéologique des milieux pulvérulents. *Thèse de doctorat d'Etat*, Université Joseph Fourier, Grenoble 1972.

STRIJBOS S., RANKIN P.J., KLEIN- WASSINK R.J., BANNINK J., OUDEMANS G.J. – *Powder Technology* 18, 1977.

TRASORRAS J., KRAUSS T., M., FERGUSON B.,L., Modelling of Powder Compaction using the Finite Element Method.

TRUESDELL C., Hypo-elasticity, *J. Rationnal Mech. Anal.*, 4, 1955.

VALANIS K.C., *Arch. Mech.* 23, 517, 1971.

VERMEER P.A., A double hardening model for sand. *Géotechnique*, 28, no.4, 1978.

ZIEGLER H., *Q. Appl. Math.*, 19, 1959.

ANEXE

ANEXA 1

ANEXA 1.1

Presarea unidirecțională în matrită a pulberii de fier rezultate experimentale

Densitate relativă	Tensiune axială	Tensiune radială	Tensiune axială medie	
ρ încărc	σ_z sup MPa	σ_z inf MPa	σ_r med MPa	σ_z med MPa
0,47	0	0	0	0
0,6	65,37	30,29	18,37	47,83
0,65	92,68	45,93	25,89	69,305
0,7	110,99	70,09	40,92	90,54
0,72	137,51	83,27	48,34	110,39
0,74	163,69	108,44	56,7	136,065
0,76	200,98	111,43	66,21	156,205
0,78	212,3	139,75	77,08	176,025
0,8	248,93	151,87	89,67	200,4
0,82	275,77	173,22	104,43	224,495
0,84	313,52	203,21	121,95	258,365
0,87	378,61	250,09	155,09	314,35
0,9	439,76	302,56	200,34	371,16
0,95	568,27	443,22	310	505,745

Comparație între densitatea calculată în timpul presării (ρ încărc) și densitatea obținută după ejectarea comprimatului (ρ descărc)

σ_z med MPa	ρ încărc	ρ descărc
74,5	0,66	0,64
103,28	0,71	0,68
136,06	0,74	0,72
156,205	0,76	0,74
176,025	0,78	0,76
224,495	0,82	0,8
267,39	0,85	0,83
301,75	0,87	0,85
320,62	0,88	0,86
388,35	0,91	0,89
414,77	0,92	0,9
505,745	0,95	0,93

ANEXA 1.2

Presare izostatică - pulbere de fier - rezultate experimentale

Densitate relativă după descărcare	Presiune medie
ρ	$(\sigma_z + 2\sigma_r)/3$
	S1/3
	MPa
0,674	54
0,696	77
0,74	105
0,79	151
0,831	203
0,86	250
0,88	297,5
0,9	350
0,97	395

Evoluția deformațiilor specifice în timpul presării izostatice

Deformație specifică axială	Deformație specifică radială
ϵ_z	ϵ_r
0,0093	0,00714
0,0124	0,0128
0,0203	0,0207
0,032	0,032
0,04357	0,04499
0,052	0,05214

ANEXA 1.3

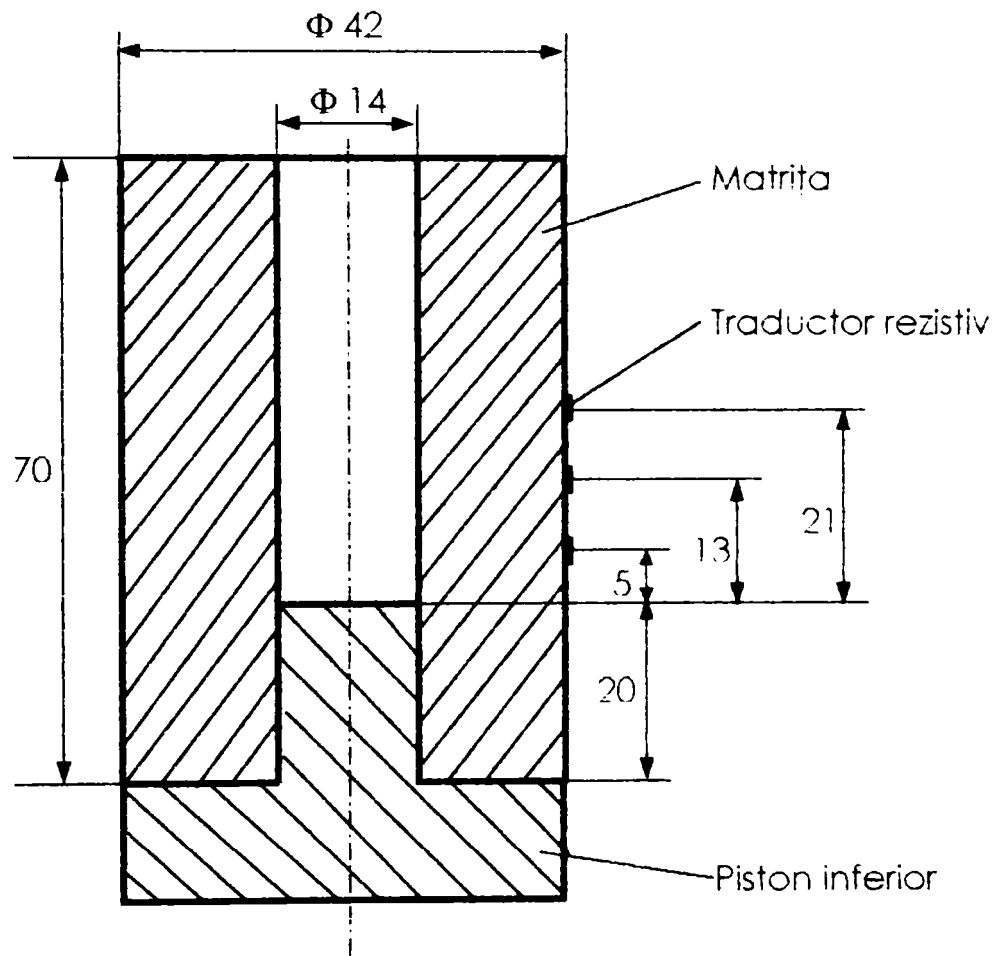
Compresiune simplă pulbere de fier -rezultate experimentale

Evoluția rezistenței la compresiune simplă a comprimatelor obținute prin presare uniaxială, în funcție de densitatea după ejectare

Densitate relativă după descărcare	Rezistența la compresiune simplă MPa
0,7	49,16
0,72	55,39
0,74	62,88
0,76	72,75
0,78	83,93
0,8	98,14
0,82	114,89
0,84	133,98
0,87	166,02
0,9	200,08

ANEXA 1.4

Dispunerea traductorilor rezistivi pe matrită



ANEXA 1.5

Etalonare traductori

Presare în matriță pulbere de bronz

VIRTUALBENCH-LOGGER 2.1 REPORT
NATIONAL INSTRUMENTS
DATE CREATE 14:10:18 11.02.2001

USER Marcela Sava

START COMMENT

Etalonare traductori rezistivi 0,1,2
traductor inductiv 3

END COMMENT

START DATA

Date	Time	Md1 Ch0(V)	Md1 Ch1(V)	Md1 Ch2(V)	Md1 Ch3(V)
11.02.2001	14:11:14	-0.410	0.113	-0.057	1.320
11.02.2001	14:11:15	-0.479	0.107	-0.062	1.320
11.02.2001	14:11:16	-0.470	0.111	-0.063	1.321
11.02.2001	14:11:17	-0.406	0.111	-0.057	1.320
11.02.2001	14:11:18	-0.505	0.107	-0.064	1.320
11.02.2001	14:11:19	-0.441	0.114	-0.060	1.320
11.02.2001	14:11:20	-0.423	0.109	-0.058	1.320
11.02.2001	14:11:21	-0.508	0.108	-0.065	1.320
11.02.2001	14:11:22	-0.418	0.114	-0.058	1.321
11.02.2001	14:11:23	-0.458	0.108	-0.062	1.321
11.02.2001	14:11:24	-0.490	0.110	-0.065	1.321
11.02.2001	14:11:25	-0.407	0.113	-0.057	1.320
11.02.2001	14:11:26	-0.492	0.107	-0.063	1.321
11.02.2001	14:11:27	-0.460	0.113	-0.062	1.321
11.02.2001	14:11:28	-0.410	0.111	-0.058	1.321
11.02.2001	14:11:29	-0.510	0.108	-0.065	1.321
11.02.2001	14:11:30	-0.433	0.114	-0.060	1.321
11.02.2001	14:11:31	-0.434	0.109	-0.060	1.321
11.02.2001	14:11:32	-0.503	0.108	-0.065	1.322
11.02.2001	14:11:33	-0.413	0.114	-0.058	1.321
11.02.2001	14:11:34	-0.471	0.108	-0.063	1.322
11.02.2001	14:11:35	-0.479	0.111	-0.064	1.321
11.02.2001	14:11:36	-0.406	0.112	-0.057	1.322
11.02.2001	14:11:54	-0.444	0.107	-0.061	1.320
11.02.2001	14:11:55	-0.499	0.109	-0.066	1.321
11.02.2001	14:11:56	-0.410	0.113	-0.059	1.321
11.02.2001	14:11:57	5.674	0.107	-0.064	1.320
11.02.2001	14:11:58	8.872	0.112	-0.064	1.321
11.02.2001	14:11:59	9.118	0.113	-0.058	1.320
11.02.2001	14:12:00	9.123	0.110	-0.064	1.320
11.02.2001	14:12:01	9.124	0.116	-0.060	1.321
11.02.2001	14:12:02	9.124	0.113	-0.058	1.321
11.02.2001	14:12:03	9.125	0.112	-0.064	1.321
11.02.2001	14:12:04	8.696	0.117	-0.057	1.321
11.02.2001	14:12:05	2.114	0.112	-0.060	1.320
11.02.2001	14:12:06	-0.143	0.115	-0.063	1.320
11.02.2001	14:12:07	-0.277	0.118	-0.055	1.320
11.02.2001	14:12:08	-0.368	0.112	-0.062	1.320
11.02.2001	14:12:09	-6.424	0.118	-0.061	1.321
11.02.2001	14:12:10	-9.164	0.117	-0.056	1.320
11.02.2001	14:12:11	-9.169	0.114	-0.063	1.320
11.02.2001	14:12:12	-9.171	0.121	-0.057	1.320

11.02.2001	14:12:13	-9.171	0.115	-0.058	1.320
11.02.2001	14:12:14	-9.172	0.116	-0.063	1.320
11.02.2001	14:12:15	-9.171	0.121	-0.055	1.320
11.02.2001	14:12:16	-8.550	0.114	-0.060	1.321
11.02.2001	14:12:17	-2.416	0.119	-0.063	1.321
11.02.2001	14:12:18	-0.446	0.120	-0.055	1.321
11.02.2001	14:12:19	-0.276	0.116	-0.062	1.321
11.02.2001	14:12:20	-0.222	0.122	-0.060	1.323
11.02.2001	14:12:21	-0.178	0.119	-0.057	1.322
11.02.2001	14:12:22	-0.286	0.117	-0.063	1.323
11.02.2001	14:12:23	-0.589	0.030	-0.058	1.323
11.02.2001	14:12:24	-0.664	0.027	-0.060	1.322
11.02.2001	14:12:25	-0.854	0.027	-0.065	1.321
11.02.2001	14:12:26	-0.546	0.028	-0.057	1.321
11.02.2001	14:12:27	-0.794	0.027	-0.063	1.321
11.02.2001	14:12:28	-0.757	0.028	-0.063	1.321
11.02.2001	14:12:29	-0.544	-0.898	-0.058	1.321
11.02.2001	14:12:30	-0.881	-0.956	-0.064	1.320
11.02.2001	14:12:31	-0.672	-1.751	-0.061	1.321
11.02.2001	14:12:32	-0.605	-1.698	-0.060	1.321
11.02.2001	14:12:33	-0.899	-1.807	-0.066	1.321
11.02.2001	14:12:34	-0.587	-1.708	-0.059	1.320
11.02.2001	14:12:35	-0.721	-1.732	-0.062	1.321
11.02.2001	14:12:36	-0.821	-0.837	-0.065	1.321
11.02.2001	14:12:37	-0.521	0.115	-0.058	1.320
11.02.2001	14:12:38	-0.823	0.032	-0.064	1.321
11.02.2001	14:12:39	-0.711	0.022	-0.063	1.321
11.02.2001	14:12:40	-0.534	0.021	-0.059	1.321
11.02.2001	14:12:41	-0.880	0.021	-0.066	1.321
11.02.2001	14:12:42	-0.602	0.984	-0.060	1.321
11.02.2001	14:12:43	-0.610	0.976	-0.062	1.321
11.02.2001	14:12:44	-0.840	1.883	-0.067	1.321
11.02.2001	14:12:45	-0.525	1.785	-0.060	1.321
11.02.2001	14:12:46	-0.733	1.832	-0.065	1.321
11.02.2001	14:12:47	-0.752	1.871	-0.067	1.320
11.02.2001	14:12:48	-0.503	1.772	-0.060	1.322
11.02.2001	14:12:49	-0.842	1.871	-0.067	1.321
11.02.2001	14:12:50	-0.642	1.833	-0.064	1.322
11.02.2001	14:12:51	-0.550	1.777	-0.061	1.324
11.02.2001	14:12:52	-0.862	1.890	-0.067	1.323
11.02.2001	14:12:53	-0.559	1.801	-0.061	1.321
11.02.2001	14:12:54	-0.663	0.847	-0.063	1.321
11.02.2001	14:12:55	-0.821	-0.065	-0.066	1.317
11.02.2001	14:12:56	-0.518	0.014	-0.058	1.318
11.02.2001	14:12:57	-0.791	0.015	-0.064	1.322
11.02.2001	14:12:58	-0.721	0.027	-0.062	1.321
11.02.2001	14:12:59	-0.514	0.027	-0.057	1.318
11.02.2001	14:13:00	-0.858	0.110	-0.064	1.319
11.02.2001	14:13:01	-0.612	0.118	-0.013	1.318
11.02.2001	14:13:02	-0.580	0.114	-0.013	1.319
11.02.2001	14:13:03	-0.856	0.112	-0.015	1.319
11.02.2001	14:13:04	-0.531	0.117	-0.013	1.318
11.02.2001	14:13:05	-0.703	0.110	-0.014	1.319
11.02.2001	14:13:06	-0.775	0.114	-0.015	1.317
11.02.2001	14:13:07	-0.499	0.116	-0.812	1.318

11.02.2001	14:13:08	-0.816	0.111	-1.039	1.319
11.02.2001	14:13:09	-0.664	0.118	-1.205	1.320
11.02.2001	14:13:10	-0.516	0.115	-1.215	1.320
11.02.2001	14:13:11	-0.851	0.113	-1.215	1.319
11.02.2001	14:13:12	-0.561	0.119	-0.574	1.319
11.02.2001	14:13:13	-0.600	0.115	-0.391	1.319
11.02.2001	14:13:14	-0.809	0.116	-0.023	1.320
11.02.2001	14:13:15	-0.493	0.121	0.001	1.319
11.02.2001	14:13:16	-0.727	0.114	-0.002	1.319
11.02.2001	14:13:17	-0.715	0.119	0.898	1.320
11.02.2001	14:13:18	-0.474	0.119	1.147	1.319
11.02.2001	14:13:19	-0.817	0.115	1.143	1.320
11.02.2001	14:13:20	-0.605	0.121	1.148	1.320
11.02.2001	14:13:21	-0.514	0.118	1.146	1.320
11.02.2001	14:13:22	-0.820	0.118	1.144	1.319
11.02.2001	14:13:23	-0.507	0.124	0.339	1.320
11.02.2001	14:13:24	-0.624	0.118	-0.011	1.319
11.02.2001	14:13:25	-0.760	0.121	-0.018	1.320
11.02.2001	14:13:26	-0.452	0.124	-0.018	1.319
11.02.2001	14:13:27	-0.746	0.120	-0.020	1.320
11.02.2001	14:13:28	-0.646	0.125	-0.020	1.321
11.02.2001	14:13:29	-0.455	0.122	-0.019	1.322
11.02.2001	14:13:30	-0.809	0.119	-0.021	1.320
11.02.2001	14:13:31	-0.542	0.125	-0.019	1.320
11.02.2001	14:13:32	-0.535	0.120	-0.019	1.321
11.02.2001	14:13:33	-0.793	0.120	-0.021	1.321
11.02.2001	14:13:34	-0.464	0.125	-0.019	-4.138
11.02.2001	14:13:35	-0.659	0.118	-0.020	-9.258
11.02.2001	14:13:36	-0.704	0.123	-0.021	-9.265
11.02.2001	14:13:37	-0.443	0.125	-0.019	-9.267
11.02.2001	14:13:38	-0.775	0.120	-0.021	-9.268
11.02.2001	14:13:39	-0.599	0.126	-0.020	-9.268
11.02.2001	14:13:40	-0.467	0.121	-0.019	-9.273
11.02.2001	14:13:41	-0.800	0.121	-0.021	-3.925
11.02.2001	14:13:42	-0.502	0.127	-0.019	1.312
11.02.2001	14:13:43	-0.570	0.121	-0.019	2.287
11.02.2001	14:13:44	-0.758	0.123	-0.021	9.189
11.02.2001	14:13:45	-0.435	0.125	-0.018	9.229
11.02.2001	14:13:46	-0.694	0.119	-0.020	9.228
11.02.2001	14:13:47	-0.652	0.125	-0.020	9.229
11.02.2001	14:13:48	-0.435	0.125	-0.018	9.229
11.02.2001	14:13:49	-0.793	0.123	-0.021	9.229
11.02.2001	14:13:50	-0.567	0.129	-0.020	9.230
11.02.2001	14:13:51	-0.500	0.123	-0.020	7.138
11.02.2001	14:13:52	-0.793	0.123	-0.021	-3.402
11.02.2001	14:13:53	-0.457	0.128	-0.019	-4.198
11.02.2001	14:13:54	-0.628	0.124	-0.020	1.318
11.02.2001	14:13:55	-0.703	0.129	-0.021	1.320
11.02.2001	14:13:56	-0.418	0.131	-0.018	1.321
11.02.2001	14:13:57	-0.734	0.127	-0.020	1.321
11.02.2001	14:13:58	-0.584	0.133	-0.019	1.321
11.02.2001	14:13:59	-0.431	0.131	-0.018	1.321
11.02.2001	14:14:00	-0.771	0.130	-0.020	1.321
11.02.2001	14:14:01	-0.479	0.136	-0.018	1.320
11.02.2001	14:14:02	-0.509	0.130	-0.019	1.320

USER Marcela Sava

START COMMENT
Proba B1
Bz ind, Fmax 85kN
END COMMENT

START DATA

Date	Time	Md1 Ch0(V)	Md1 Ch1(V)	Md1 Ch2(V)	Md1 Ch3(V)	1
11.02.2001	14:39:02	-0.898	0.233	-0.330	-0.191	
11.02.2001	14:39:03	-0.815	0.168	-0.268	-0.199	
11.02.2001	14:39:04	-0.820	0.167	-0.268	-0.247	
11.02.2001	14:39:05	-0.825	0.163	-0.270	-0.335	
11.02.2001	14:39:06	-0.830	0.161	-0.271	-0.436	
11.02.2001	14:39:07	-0.832	0.160	-0.272	-0.585	
11.02.2001	14:39:08	-0.837	0.159	-0.272	-0.787	
11.02.2001	14:39:09	-0.844	0.157	-0.273	-1.021	
11.02.2001	14:39:10	-0.846	0.156	-0.274	-1.273	
11.02.2001	14:39:11	-0.850	0.154	-0.276	-1.570	
11.02.2001	14:39:12	-0.851	0.152	-0.277	-1.868	
11.02.2001	14:39:13	-0.854	0.150	-0.279	-2.166	
11.02.2001	14:39:14	-0.860	0.148	-0.279	-2.466	
11.02.2001	14:39:15	-0.866	0.146	-0.276	-2.769	
11.02.2001	14:39:16	-0.869	0.143	-0.276	-3.073	
11.02.2001	14:39:17	-0.871	0.140	-0.273	-3.376	
11.02.2001	14:39:18	-0.876	0.136	-0.273	-3.736	
11.02.2001	14:39:19	-0.882	0.132	-0.282	-4.120	
11.02.2001	14:39:20	-0.886	0.127	-0.296	-4.535	
11.02.2001	14:39:21	-0.894	0.123	-0.304	-4.983	
11.02.2001	14:39:22	-0.910	0.118	-0.309	-5.455	
11.02.2001	14:39:23	-0.916	0.113	-0.319	-5.945	
11.02.2001	14:39:24	-0.931	0.106	-0.325	-6.448	
11.02.2001	14:39:25	-0.950	0.099	-0.338	-6.956	
11.02.2001	14:39:26	-0.961	0.091	-0.357	-7.467	
11.02.2001	14:39:27	-0.975	0.084	-0.381	-7.977	
11.02.2001	14:39:28	-0.992	0.077	-0.411	-8.488	
11.02.2001	14:39:29	-1.021	0.068	-0.441	-9.009	
11.02.2001	14:39:30	-1.044	0.059	-0.478	-9.283	
11.02.2001	14:39:31	-1.071	0.050	-0.497	-9.273	
11.02.2001	14:39:32	-1.100	0.041	-0.500	-9.271	
11.02.2001	14:39:33	-1.128	0.030	-0.503	-9.271	
11.02.2001	14:39:34	-1.158	0.019	-0.440	-9.270	
11.02.2001	14:39:35	-1.183	0.009	-0.417	-9.270	
11.02.2001	14:39:36	-1.208	-0.001	-0.434	-9.270	
11.02.2001	14:39:37	-1.233	-0.011	-0.493	-9.270	
11.02.2001	14:39:38	-1.259	-0.023	-0.455	-9.270	
11.02.2001	14:39:39	-1.290	-0.036	-0.458	-9.270	
11.02.2001	14:39:40	-1.320	-0.048	-0.484	-9.270	
11.02.2001	14:39:41	-1.348	-0.060	-0.512	-9.269	
11.02.2001	14:39:42	-1.373	-0.070	-0.519	-9.269	
11.02.2001	14:39:43	-1.397	-0.079	-0.525	-9.269	

11.02.2001	14:39:44	-1.422	-0.088	-0.536	-9.269
11.02.2001	14:39:45	-1.444	-0.098	-0.547	-9.268
11.02.2001	14:39:46	-1.470	-0.109	-0.547	-9.269
11.02.2001	14:39:47	-1.489	-0.121	-0.559	-9.268
11.02.2001	14:39:48	-2.693	0.620	-0.629	-9.268
11.02.2001	14:39:49	-1.877	0.066	-0.612	-9.268
11.02.2001	14:39:50	-2.765	0.608	-0.660	-9.268
11.02.2001	14:39:51	-2.793	0.597	-0.688	-9.268
11.02.2001	14:39:52	-2.820	0.585	-0.694	-9.268
11.02.2001	14:39:53	-2.849	0.573	-0.700	-9.268
11.02.2001	14:39:54	-2.880	0.559	-0.706	-9.268
11.02.2001	14:39:55	-2.904	0.544	-0.718	-9.267
11.02.2001	14:39:56	-2.942	0.530	-0.723	-9.267
11.02.2001	14:39:57	-2.974	0.515	-0.734	-9.267
11.02.2001	14:39:58	-3.009	0.500	-0.744	-9.267
11.02.2001	14:39:59	-3.043	0.483	-0.756	-9.267
11.02.2001	14:40:00	-3.076	0.464	-0.774	-9.267
11.02.2001	14:40:01	-1.993	-0.270	-0.735	-9.267
11.02.2001	14:40:02	-3.163	0.435	-0.782	-9.266
11.02.2001	14:40:03	-3.202	0.417	-0.793	-9.266
11.02.2001	14:40:04	-3.245	0.398	-0.806	-9.266
11.02.2001	14:40:05	-3.284	0.377	-0.821	-9.266
11.02.2001	14:40:06	-2.145	-0.398	-0.775	-9.266
11.02.2001	14:40:07	-2.187	-0.420	-0.784	-9.266
11.02.2001	14:40:08	-2.232	-0.443	-0.795	-9.265
11.02.2001	14:40:09	-2.280	-0.465	-0.807	-9.265
11.02.2001	14:40:10	-2.327	-0.487	-0.817	-9.265
11.02.2001	14:40:11	-2.372	-0.511	-0.829	-9.265
11.02.2001	14:40:12	-2.421	-0.539	-0.839	-9.265
11.02.2001	14:40:13	-3.554	0.131	-0.891	-9.265
11.02.2001	14:40:14	-3.708	0.171	-0.903	-9.265
11.02.2001	14:40:15	-3.741	0.148	-0.912	-9.265
11.02.2001	14:40:16	-3.790	0.122	-0.924	-9.264
11.02.2001	14:40:17	-3.846	0.093	-0.934	-9.264
11.02.2001	14:40:18	-3.895	0.067	-0.943	-9.264
11.02.2001	14:40:19	-3.951	0.040	-0.948	-9.264
11.02.2001	14:40:20	-3.949	-0.021	-0.971	-9.264
11.02.2001	14:40:21	-4.030	-0.036	-0.972	-9.264
11.02.2001	14:40:22	-4.112	-0.048	-0.975	-9.264
11.02.2001	14:40:23	-4.167	-0.079	-0.989	-9.264
11.02.2001	14:40:24	-4.223	-0.110	-1.004	-9.263
11.02.2001	14:40:25	-4.263	-0.153	-1.019	-9.263
11.02.2001	14:40:26	-4.338	-0.174	-1.037	-9.263
11.02.2001	14:40:27	-4.394	-0.206	-1.056	-9.262
11.02.2001	14:40:28	-4.446	-0.239	-1.073	-9.263
11.02.2001	14:40:29	-4.488	-0.268	-1.091	-9.262
11.02.2001	14:40:30	-4.536	-0.295	-1.108	-9.262
11.02.2001	14:40:31	-4.583	-0.324	-1.134	-9.262
11.02.2001	14:40:32	-4.633	-0.354	-1.152	-9.262
11.02.2001	14:40:33	-4.681	-0.384	-1.170	-9.262
11.02.2001	14:40:34	-4.730	-0.414	-1.189	-9.262
11.02.2001	14:40:35	-4.781	-0.446	-1.207	-9.262
11.02.2001	14:40:36	-4.835	-0.479	-1.228	-9.262
11.02.2001	14:40:37	-4.886	-0.512	-1.248	-9.262
11.02.2001	14:40:38	-4.940	-0.546	-1.268	-9.261

11.02.2001	14:40:39	-4.999	-0.580	-1.290	-9.261
11.02.2001	14:40:40	-5.055	-0.616	-1.312	-9.261
11.02.2001	14:40:41	-5.105	-0.649	-1.332	-9.261
11.02.2001	14:40:42	-5.139	-0.674	-1.347	-9.261
11.02.2001	14:40:43	-5.163	-0.692	-1.358	-9.261
11.02.2001	14:40:44	-5.188	-0.708	-1.368	-9.261
11.02.2001	14:40:45	-5.213	-0.727	-1.377	-9.261
11.02.2001	14:40:46	-5.242	-0.745	-1.387	-9.261
11.02.2001	14:40:47	-5.270	-0.762	-1.398	-9.261
11.02.2001	14:40:48	-5.297	-0.780	-1.409	-9.261
11.02.2001	14:40:49	-5.327	-0.800	-1.420	-9.261
11.02.2001	14:40:50	-5.358	-0.821	-1.432	-9.261
11.02.2001	14:40:51	-5.387	-0.841	-1.444	-9.261
11.02.2001	14:40:52	-5.416	-0.860	-1.454	-9.261
11.02.2001	14:40:53	-5.450	-0.881	-1.467	-9.261
11.02.2001	14:40:54	-5.482	-0.903	-1.481	-9.261
11.02.2001	14:40:55	-5.513	-0.925	-1.494	-9.261
11.02.2001	14:40:56	-5.545	-0.945	-1.507	-9.261
11.02.2001	14:40:57	-5.578	-0.968	-1.521	-9.261
11.02.2001	14:40:58	-5.613	-0.992	-1.535	-9.261
11.02.2001	14:40:59	-5.643	-1.014	-1.548	-9.261
11.02.2001	14:41:00	-5.675	-1.037	-1.562	-9.260
11.02.2001	14:41:01	-5.715	-1.061	-1.578	-9.260
11.02.2001	14:41:02	-5.749	-1.085	-1.592	-9.260
11.02.2001	14:41:03	-5.781	-1.108	-1.606	-9.260
11.02.2001	14:41:04	-5.816	-1.133	-1.622	-9.260
11.02.2001	14:41:05	-5.851	-1.158	-1.636	-9.260
11.02.2001	14:41:06	-5.885	-1.183	-1.650	-9.260
11.02.2001	14:41:07	-5.923	-1.209	-1.665	-9.260
11.02.2001	14:41:08	-5.964	-1.236	-1.680	-9.260
11.02.2001	14:41:09	-6.001	-1.261	-1.694	-9.260
11.02.2001	14:41:10	-6.037	-1.286	-1.709	-9.260
11.02.2001	14:41:11	-6.077	-1.314	-1.724	-9.260
11.02.2001	14:41:12	-6.114	-1.342	-1.742	-9.260
11.02.2001	14:41:13	-6.150	-1.370	-1.759	-9.260
11.02.2001	14:41:14	-6.191	-1.398	-1.775	-9.260
11.02.2001	14:41:15	-6.233	-1.428	-1.795	-9.260
11.02.2001	14:41:16	-6.272	-1.456	-1.814	-9.260
11.02.2001	14:41:17	-6.311	-1.486	-1.835	-9.260
11.02.2001	14:41:18	-6.353	-1.517	-1.853	-9.259
11.02.2001	14:41:19	-6.395	-1.547	-1.872	-9.260
11.02.2001	14:41:20	-6.433	-1.577	-1.889	-9.260
11.02.2001	14:41:21	-6.477	-1.608	-1.908	-9.260
11.02.2001	14:41:22	-6.520	-1.640	-1.927	-9.259
11.02.2001	14:41:23	-6.564	-1.672	-1.946	-9.259
11.02.2001	14:41:24	-6.607	-1.703	-1.961	-9.259
11.02.2001	14:41:25	-6.653	-1.738	-1.978	-9.259
11.02.2001	14:41:26	-6.695	-1.770	-1.994	-9.259
11.02.2001	14:41:27	-6.741	-1.804	-2.011	-9.259
11.02.2001	14:41:28	-6.789	-1.839	-2.028	-9.259
11.02.2001	14:41:29	-6.835	-1.875	-2.045	-9.259
11.02.2001	14:41:30	-6.879	-1.909	-2.060	-9.259
11.02.2001	14:41:31	-6.928	-1.945	-2.077	-9.259
11.02.2001	14:41:32	-6.977	-1.982	-2.095	-9.259
11.02.2001	14:41:33	-7.024	-2.017	-2.113	-9.259

11.02.2001	14:41:34	-7.075	-2.055	-2.131	-9.259
11.02.2001	14:41:35	-7.126	-2.094	-2.151	-9.259
11.02.2001	14:41:36	-7.175	-2.132	-2.168	-9.259
11.02.2001	14:41:37	-7.197	-2.170	-2.185	-9.259
11.02.2001	14:41:38	-7.250	-2.210	-2.204	-9.259
11.02.2001	14:41:39	-7.303	-2.250	-2.224	-9.258
11.02.2001	14:41:40	-7.354	-2.290	-2.243	-9.258
11.02.2001	14:41:41	-7.408	-2.331	-2.262	-9.258
11.02.2001	14:41:42	-7.465	-2.374	-2.281	-9.258
11.02.2001	14:41:43	-7.516	-2.416	-2.299	-9.258
11.02.2001	14:41:44	-7.571	-2.457	-2.318	-9.258
11.02.2001	14:41:45	-7.619	-2.496	-2.332	-9.258
11.02.2001	14:41:46	-7.666	-2.534	-2.346	-9.258
11.02.2001	14:41:47	-7.703	-2.565	-2.355	-9.258
11.02.2001	14:41:48	-7.729	-2.589	-2.362	-9.258
11.02.2001	14:41:49	-7.755	-2.611	-2.368	-9.258
11.02.2001	14:41:50	-7.775	-2.631	-2.372	-9.258
11.02.2001	14:41:51	-7.775	-2.638	-2.374	-9.258
11.02.2001	14:41:52	-7.782	-2.645	-2.375	-9.258
11.02.2001	14:41:53	-7.786	-2.650	-2.377	-9.258
11.02.2001	14:41:54	-7.785	-2.653	-2.376	-9.258
11.02.2001	14:41:55	-7.781	-2.653	-2.376	-9.258
11.02.2001	14:41:56	-7.784	-2.656	-2.377	-9.258
11.02.2001	14:41:57	-7.776	-2.654	-2.376	-9.258
11.02.2001	14:41:58	-7.768	-2.650	-2.375	-9.258
11.02.2001	14:41:59	-7.767	-2.651	-2.374	-9.258
11.02.2001	14:42:00	-7.766	-2.651	-2.374	-9.258
11.02.2001	14:42:01	-7.763	-2.651	-2.374	-9.258
11.02.2001	14:42:02	-7.759	-2.650	-2.373	-9.258
11.02.2001	14:42:03	-7.758	-2.649	-2.373	-9.258
11.02.2001	14:42:04	-7.758	-2.650	-2.373	-9.258
11.02.2001	14:42:05	-7.756	-2.649	-2.373	-9.258
11.02.2001	14:42:06	-7.755	-2.649	-2.372	-9.258
11.02.2001	14:42:07	-7.757	-2.650	-2.373	-9.258

END DATA

USER Marcela Sava

START COMMENT

plastelina
h=22 mm
Fmax=35kN
END COMMENT

START DATA

Date	Time	Md1 Ch0(V)	Md1 Ch1(V)	Md1 Ch2(V)	Md1 Ch3(V)
11.02.2001	15:55:40	-0.424	-0.084	-2.948	0.586
11.02.2001	15:55:41	-0.512	-0.094	-2.948	0.584
11.02.2001	15:55:42	-0.296	-0.125	-2.948	0.455
11.02.2001	15:55:43	-0.786	-0.296	-2.948	0.286
11.02.2001	15:55:44	-0.880	-0.347	-2.948	0.240
11.02.2001	15:55:45	-0.878	-0.351	-2.947	0.203
11.02.2001	15:55:46	-0.977	-0.402	-2.947	0.168
11.02.2001	15:55:47	-1.003	-0.435	-2.947	0.132
11.02.2001	15:55:48	-1.043	-0.451	-2.947	0.092
11.02.2001	15:55:49	-1.164	-0.534	-2.947	0.046
11.02.2001	15:55:50	-1.193	-0.566	-2.947	-0.002
11.02.2001	15:55:51	-1.287	-0.614	-2.947	-0.055
11.02.2001	15:55:52	-1.393	-0.726	-2.947	-0.111
11.02.2001	15:55:53	-1.454	-0.750	-2.947	-0.167
11.02.2001	15:55:54	-1.566	-0.826	-2.948	-0.219
11.02.2001	15:55:55	-1.626	-0.927	-2.947	-0.270
11.02.2001	15:55:56	-1.718	-0.935	-2.947	-0.322
11.02.2001	15:55:57	-1.826	-1.055	-2.947	-0.375
11.02.2001	15:55:58	-1.887	-1.128	-2.948	-0.429
11.02.2001	15:55:59	-2.022	-1.150	-2.947	-0.485
11.02.2001	15:56:00	-2.116	-1.308	-2.947	-0.541
11.02.2001	15:56:01	-2.209	-1.340	-2.947	-0.597
11.02.2001	15:56:02	-2.330	-1.387	-2.947	-0.644
11.02.2001	15:56:03	-2.318	-1.511	-2.947	-0.672
11.02.2001	15:56:04	-2.406	-1.450	-2.947	-0.699
11.02.2001	15:56:05	-2.433	-1.500	-2.947	-0.722
11.02.2001	15:56:06	-2.359	-1.582	-2.948	-0.746
11.02.2001	15:56:07	-2.515	-1.529	-2.947	-0.771
11.02.2001	15:56:08	-2.538	-1.643	-2.947	-0.794
11.02.2001	15:56:09	-2.551	-1.654	-2.948	-0.817
11.02.2001	15:56:10	-2.628	-1.615	-2.948	-0.842
11.02.2001	15:56:11	-1.639	-1.603	-2.947	-0.865
11.02.2001	15:56:12	-1.756	-1.566	-2.948	-0.888
11.02.2001	15:56:13	-1.999	-1.607	-2.947	-0.911
11.02.2001	15:56:14	-2.051	-1.752	-2.948	-0.934
11.02.2001	15:56:15	-2.303	-1.694	-2.948	-0.958
11.02.2001	15:56:16	-2.316	-1.778	-2.948	-0.981
11.02.2001	15:56:17	-2.359	-1.862	-2.948	-1.005
11.02.2001	15:56:18	-2.503	-1.785	-2.948	-1.028
11.02.2001	15:56:19	-2.523	-1.935	-2.947	-1.051
11.02.2001	15:56:20	-2.572	-1.930	-2.948	-1.073

11.02.2001	15:56:21	-2.720	-1.899	-2.947	-1.097
11.02.2001	15:56:22	-2.723	-2.082	-2.948	-1.120
11.02.2001	15:56:23	-2.856	-2.017	-2.948	-1.143
11.02.2001	15:56:24	-2.966	-2.057	-2.948	-1.165
11.02.2001	15:56:25	-2.869	-2.191	-2.948	-1.186
11.02.2001	15:56:26	-3.027	-2.082	-2.947	-1.206
11.02.2001	15:56:27	-3.058	-2.199	-2.947	-1.225
11.02.2001	15:56:28	-3.075	-2.264	-2.947	-1.245
11.02.2001	15:56:29	-3.286	-2.179	-2.947	-1.265
11.02.2001	15:56:30	-3.210	-2.355	-2.948	-1.285
11.02.2001	15:56:31	-3.286	-2.322	-2.948	-1.304
11.02.2001	15:56:32	-3.405	-2.290	-2.947	-1.323
11.02.2001	15:56:33	-3.340	-2.482	-2.947	-1.341
11.02.2001	15:56:34	-3.553	-2.386	-2.947	-1.359
11.02.2001	15:56:35	-3.661	-2.448	-2.947	-1.378
11.02.2001	15:56:36	-3.593	-2.588	-2.946	-1.395
11.02.2001	15:56:37	-3.772	-2.456	-2.946	-1.414
11.02.2001	15:56:38	-3.720	-2.573	-2.947	-1.415
11.02.2001	15:56:39	-3.640	-2.568	-2.946	-1.414
11.02.2001	15:56:40	-3.755	-2.437	-2.946	-1.413
11.02.2001	15:56:41	-3.601	-2.595	-2.946	-1.412
11.02.2001	15:56:42	-3.648	-2.496	-2.947	-1.412
11.02.2001	15:56:43	-3.689	-2.440	-2.947	-1.411
11.02.2001	15:56:44	-3.476	-2.583	-2.946	-1.411
11.02.2001	15:56:45	-3.386	-2.394	-2.947	-1.410
11.02.2001	15:56:46	-3.396	-2.440	-2.947	-1.410
11.02.2001	15:56:47	-3.144	-2.498	-2.947	-1.410
11.02.2001	15:56:48	-3.341	-2.347	-2.947	-1.409
11.02.2001	15:56:49	-3.251	-2.472	-2.948	-1.409
11.02.2001	15:56:50	-3.227	-2.448	-2.947	-1.409
11.02.2001	15:56:51	-3.332	-2.335	-2.948	-1.408
11.02.2001	15:56:52	-3.927	-2.595	-2.947	-1.400
11.02.2001	15:56:53	-3.934	-2.456	-2.947	-1.389
11.02.2001	15:56:54	-3.889	-2.365	-2.947	-1.358
11.02.2001	15:56:55	-3.378	-2.185	-2.947	-1.204
11.02.2001	15:56:56	-2.180	-1.040	-2.946	-0.596
11.02.2001	15:56:57	-1.125	-0.201	-2.946	0.146
11.02.2001	15:56:58	-0.994	-0.142	-2.947	2.919
11.02.2001	15:56:59	-0.941	-0.129	-2.947	9.073
11.02.2001	15:57:00	-0.992	-0.141	-2.947	9.230
11.02.2001	15:57:01	-0.947	-0.128	-2.947	9.229
11.02.2001	15:57:02	-0.933	-0.127	-2.947	9.224
11.02.2001	15:57:03	-0.873	-0.132	-2.947	9.217
11.02.2001	15:57:04	-0.120	-0.013	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:05	-0.789	-0.114	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:06	-0.857	-0.114	-2.946	9.213
11.02.2001	15:57:07	-0.815	-0.097	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:08	-0.852	-0.114	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:09	-0.814	-0.120	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:10	-0.902	-0.134	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:11	-0.988	-0.142	-2.946	9.213
11.02.2001	15:57:12	-0.956	-0.124	-2.947	9.213
11.02.2001	15:57:13	-0.956	-0.123	-2.947	9.213

END DATA

ANEXA 1.6

Presarea unidirecțională în matrită a pulberii de bronz rezultate experimentale

forța axială	presiunea axială	densitate relativă după descărcare	tensiune radială medie
daN	MPa	MPa	MPa
1000	64,96273737	0,564	42,56
1500	97,44410606	0,597	63,09
2000	129,9254747	0,638	81,76
2500	162,4068434	0,669	99,49
3000	194,8882121	0,696	122,45
3500	227,3695808	0,72	140,56
4000	259,8509495	0,74	160,75
4500	292,3323182	0,759	186,48
5000	324,8136869	0,777	205,52
5500	357,2950556	0,793	226,8
5800	376,7838768	0,803	241,92
6000	389,7764242	0,809	251,62
6200	402,7689717	0,815	259,28
6400	415,7615192	0,82	268,43
6600	428,7540667	0,831	280,37
7000	454,7391616	0,836	298,1
7200	467,7317091	0,842	308
7400	480,7242566	0,847	319,38
7600	493,716804	0,851	327,97
7800	506,7093515	0,856	334,13
8000	519,701899	0,859	343,63
8100	526,1981727	0,863	350,18
8200	532,6944465	0,865	355,23
8300	539,1907202	0,867	357,1
8400	545,6869939	0,869	358,4
8500	552,1832677	0,872	366,24

Comparație între densitatea calculată în timpul presării (ρ încărc) și densitatea obținută după ejectarea comprimatului (ρ descărc)

σ_z med MPa	ρ descărc g/cm ³	ρ încărc g/cm ³
402,77	6,11	6,3378
441,75	6,27	6,4612
467,73	6,44	6,539
493,72	6,51	6,606
506,7	6,55	6,6345
532,12	6,6	6,714
552,18	6,72	6,7669

ANEXA 1.7

Compresiune simplă pulbere de bronz -rezultate experimentale

Evoluția rezistenței la compresiune simplă a comprimatelor obținute prin presare uniaxială, în funcție de densitatea după ejectare

Forța compresiune simplă daN	Densitate relativă după descărcare	Rezistența la compresiune simplă MPa
1820	6,114	118,2295
2000	6,274	129,9225
2200	6,442	142,9148
2340	6,51	152,0093
2440	6,55	158,5055
2680	6,606	174,0962
3170	6,7	205,9272

ANEXA 2

ANEXA 2.1

Rezultatele furnizate de aparatul Epiquant pentru probele izotrope sunt prezentate în Fig. A.V.1 ; liniile numerotate de la 01 la 23 semnifică:

01 – cod pentru toate probele;

02 – codul câmpului analizat;

05 – numărul particulelor fazei A (faza neagră - pori; n_A);

06 - numărul particulelor fazei B;

07 - numărul particulelor fazei C (faza albă - matricea metalică, n_C);

08 la 19 - numărul particulelor aparținând claselor de dimensiuni 1 la 12 (Tabelul 1, paragraful V.4.1);

20 – numărul particulelor în clasa de dimensiuni 13 și numărul particulelor neclasate);

21 – lungimea grăunților fazei A (l_A);

22 - lungimea grăunților fazei B (l_B);

23 - lungimea grăunților fazei C (l_C).

Pentru fiecare câmp analizat, suma liniilor 21 și 23 (suma lungimilor grăunților fazei A și respectiv C) reprezintă lungimea totală a liniei de explorare; un calcul simplu dă procentajul de pori respectiv de metal pe câmp analizat (frecvența relativă): utilizând lungimile grăunților fazei A (l_{Ai}), se calculează dimensiunea medie a fazei A (pori) \bar{l}_A , repartiția fazei A, - V_A , pe care o vom denumi "porozitate" (relațiile A.V.1 și A.V.2) (FARBAȘ (1986)).

$$\bar{l}_A = \frac{\sum l_{Ai}}{n_A} \quad (\text{A.V.1})$$

$$V_A = \frac{\sum l_{Ai}}{L} \quad (\text{A.V.2})$$

unde: n_A = numărul total de grăunți ai fazei A (numărați);

$\sum l_{Ai}$ = lungimea totală a grăunților fazei A;

L = suma lungimilor grăunților fazelor A și C.

Rezultatele furnizate de aparatul Epiquant (probe izotrope)-Fig. A.V.1

$\rho=0,8144$

00	26107	26159	26189	26199	26199	26199	26199	26199	26199	26199	26199
01	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111
02	01101	01201	02102	02202	03103	03203	04104	04204	05105	05205	05205
03	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003
04	00036	00036	00036	00036	00036	00036	00036	00036	00036	00036	00036
05	01072	01072	02072	02072	03072	03072	04072	04072	05072	05072	05072
06	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003	00003
07	00069	00069	00069	00069	00069	00069	00069	00069	00069	00069	00069
08	00068	00068	00068	00068	00068	00068	00068	00068	00068	00068	00068
09	00074	00074	00074	00074	00074	00074	00074	00074	00074	00074	00074
10	00037	00037	00037	00037	00037	00037	00037	00037	00037	00037	00037
11	00052	00052	00052	00052	00052	00052	00052	00052	00052	00052	00052
12	00066	00066	00066	00066	00066	00066	00066	00066	00066	00066	00066
13	00067	00067	00067	00067	00067	00067	00067	00067	00067	00067	00067
14	00071	00071	00071	00071	00071	00071	00071	00071	00071	00071	00071
15	00055	00055	00055	00055	00055	00055	00055	00055	00055	00055	00055
16	00064	00064	00064	00064	00064	00064	00064	00064	00064	00064	00064
17	00057	00057	00057	00057	00057	00057	00057	00057	00057	00057	00057
18	00092	00092	00092	00092	00092	00092	00092	00092	00092	00092	00092
19	00090	00090	00090	00090	00090	00090	00090	00090	00090	00090	00090
20	00113	00113	00113	00113	00113	00113	00113	00113	00113	00113	00113
21	27262	27705	28204	28714	29278	29274	29414	29410	29491	29470	29470
22	00095	00095	00095	00095	00095	00095	00095	00095	00095	00095	00095
23	12132	12291	16096	16206	16622	16710	16382	15810	14007	13530	13530

$\rho=0,864$

00	26109	26109	26109	26109	26199	26199	26199	26199	26199	26199	26199
01	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111
02	01101	01201	02102	02202	03103	03203	04104	04204	05105	05205	05205
03	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004
04	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027
05	00749	00760	00638	00616	00595	00605	00634	00614	00658	00682	00682
06	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
07	00540	00560	00426	00415	00594	00492	00484	00419	00487	00479	00479
08	00046	00046	00027	00039	00024	00071	00030	00074	00034	00038	00038
09	00059	00065	00033	00037	00031	00032	00030	00048	00042	00042	00042
10	00052	00063	00034	00037	00041	00048	00059	00038	00038	00052	00052
11	00045	00057	00042	00053	00044	00045	00048	00049	00050	00066	00066
12	00039	00058	00040	00031	00037	00042	00046	00047	00044	00054	00054
13	00050	00047	00051	00046	00055	00043	00056	00059	00045	00055	00055
14	00044	00036	00045	00054	00050	00042	00066	00051	00046	00037	00037
15	00056	00051	00046	00044	00045	00067	00059	00048	00053	00047	00047
16	00046	00044	00050	00049	00046	00043	00058	00041	00040	00037	00037
17	00056	00049	00059	00052	00046	00049	00049	00073	00057	00041	00041
18	00049	00041	00049	00038	00028	00032	00050	00045	00047	00037	00037
19	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
20	00000	00000	00102	00096	00083	00083	00075	00082	00092	00115	00115
21	19005	19400	20016	20627	13453	18290	17007	17515	21171	23245	23245
22	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000

$\rho=0,885$

00	26109	26109	26109	26109	26199	26199	26199	26199	26199	26199	26199
01	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111	00111
02	01101	01201	02102	02202	03103	03203	04104	04204	05105	05205	05205
03	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004	00004
04	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027	00027
05	00749	00760	00638	00616	00595	00605	00634	00614	00658	00682	00682
06	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
07	00540	00560	00426	00415	00594	00492	00484	00419	00487	00479	00479
08	00046	00046	00027	00039	00024	00071	00030	00074	00034	00038	00038
09	00059	00065	00033	00037	00031	00032	00030	00048	00042	00042	00042
10	00052	00063	00034	00037	00041	00048	00059	00038	00038	00052	00052
11	00045	00057	00042	00053	00044	00045	00048	00049	00050	00066	00066
12	00039	00058	00040	00031	00037	00042	00046	00047	00044	00054	00054
13	00050	00047	00051	00046	00055	00043	00056	00059	00045	00055	00055
14	00044	00036	00045	00054	00050	00042	00066	00051	00046	00037	00037
15	00056	00051	00046	00044	00045	00067	00059	00048	00053	00047	00047
16	00046	00044	00050	00049	00046	00043	00058	00041	00040	00037	00037
17	00056	00049	00059	00052	00046	00049	00049	00073	00057	00041	00041
18	00049	00041	00049	00038	00028	00032	00050	00045	00047	00037	00037
19	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
20	00000	00000	00102	00096	00083	00083	00075	00082	00092	00115	00115
21	19005	19400	20016	20627	13453	18290	17007	17515	21171	23245	23245
22	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
23	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000

ANEXA 2.2

Tabelul 1 prezintă numărul total al porilor pe clase de dimensiuni (suma pe orizontală pentru toate câmpurile analizate, pentru clasele 1 - 11) și frecvența relativă de apariție a porilor, pe clase de dimensiuni, pentru probele izotrope.

Tabelul 1

Adre- sa	Clasa	$\rho = 0,8144$		$\rho = 0,8437$		$\rho = 0,864$		$\rho = 0,885$	
		Total pe clasa	Frecv. rel. [%]	Total pe clasa	Frecv. rel. [%]	Total pe clasa	Frecv. rel. [%]	Total pe clasa	Frecv. rel. [%]
8	1	420	6,91	613	9,87	325	6,55	748	8,85
9	2	562	9,24	861	13,87	421	8,48	1122	13,27
10	3	547	8,99	806	12,98	473	9,53	1163	13,76
11	4	605	9,95	790	12,73	499	10,05	1062	12,56
12	5	633	10,41	551	8,88	438	8,82	927	10,96
13	6	637	10,48	558	8,99	510	10,27	1014	11,99
14	7	546	8,98	486	7,83	491	9,89	692	8,19
15	8	578	9,51	434	6,99	494	9,95	638	7,55
16	9	551	9,06	387	6,23	432	8,70	481	5,69
17	10	539	8,86	386	6,22	468	9,42	360	4,26
18	11	463	7,61	336	5,41	414	8,34	247	2,92
Total		6081	100	6208	100	4965	100	8454	100

ANEXA 2.3

Tabelele 2 și 3 dau dimensiunile medii ale porilor (l_{Ai}), repartiția porilor (V_{Ai} [%] – "porozitatea" – relația A.V.1) și repartiția matricei metalice V_{Ci} [%] – relația A.V.2) pentru probele izotrope.

Tabelul 2

Câmp	$\rho=0.8144$			$\rho=0.8437$		
	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]
1 (x)	25.92	69.67	30.33	29.35	66.03	33.97
2 (y)	18.81	69.27	30.73	26.23	66.11	33.89
3 (x)	27.34	59.96	40.04	31.20	63.57	36.43
4 (y)	28.19	59.28	40.72	35.28	63.07	36.93
5 (x)	35.51	63.44	36.56	29.81	62.54	37.46
6 (y)	33.83	63.18	36.82	24.75	60.63	39.37
7 (x)	31.69	59.03	40.97	25.90	60.44	39.56
8 (y)	31.5	60.47	39.53	22.61	60.20	39.80
9 (x)	29.22	59.98	40.02	31.6	65.17	34.83
10 (y)	30.74	61.17	38.83	45.95	68.69	31.31
Media	29.375	62.545	37.455	30.268	63.645	36.355

Tabelul 3

Câmp	$\rho=0.864$			$\rho=0.885$		
	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]
1 (x)	25.48	47.71	52.29	12.95	34.97	65.03
2 (y)	25.53	48.5	51.5	14.49	33.81	66.19
3 (x)	33.2	52.29	47.71	15.20	43.11	56.89
4 (y)	33.58	51.72	48.28	15.93	41.79	58.21
5 (x)	31.03	46.15	53.85	14.74	40.82	59.18
6 (y)	30.01	45.52	54.48	17.17	41.63	58.37
7 (x)	26.31	44.99	55.01	15.47	40.98	59.02
8 (y)	28.07	43.78	56.22	16.71	40.71	59.29
9 (x)	30.77	52.93	47.07	13.43	41.77	58.23
10 (y)	33.82	57.66	42.34	14.33	43.73	56.27
Media	29.78	49.125	50.875	15.042	40.332	59.668

ANEXA 2.4

În tabelul 4 se prezintă numărul total de pori pe clase de dimensiuni și frecvența relativă de apariție a porilor pentru probele presate uniaxial în matrită.

Tabel 4

Adre- sa	Clasa	$\rho = 0,627$		$\rho = 0,7274$		$\rho = 0,82$		$\rho = 0,905$	
		Total pe clasă	Frecv. rel. [%]	Total pe clasă	Frecv. rel. [%]	Total pe clasă	Frecv. rel. [%]	Total pe clasă	Frecv. rel. [%]
8	1	319	7.74	254	6.54	594	8.75	398	4.31
9	2	515	12.5	396	10.2	884	13.02	708	7.67
10	3	481	11.67	374	9.63	837	12.32	893	9.67
11	4	416	10.09	345	8.89	736	10.84	1161	12.57
12	5	344	8.35	301	7.75	583	8.58	1336	14.47
13	6	312	7.57	330	8.5	650	9.57	1269	13.74
14	7	318	7.72	339	8.73	558	8.21	1023	11.07
15	8	336	8.15	390	10.05	557	8.2	903	9.78
16	9	340	8.25	344	8.86	525	7.73	703	7.61
17	10	385	9.34	425	10.95	464	6.83	526	5.7
18	11	355	8.61	384	9.89	404	5.95	315	3.41
Total		4121	100	3882	99.99	6792	100	9235	100

ANEXA 2.5

Tabelele 5 și 6 dau dimensiunile medii ale porilor (l_{Ai}), repartiția porilor (V_{Ai} [%] – "porozitatea" – relația A.V.1) și repartiția matricei metalice V_{Ci} [%] – relația A.V.2) pentru probele presate uniaxial în matrită.

Tabelul 5

Câmp	$\rho=0.627$			$\rho=0.7274$		
	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]
1 (x)	36.9	68.55	31.45	54.22	68.32	31.68
2 (y)	50.86	67.39	32.61	45.07	68.28	31.72
3 (x)	51.84	73.75	26.25	42.72	66.86	33.14
4 (y)	45.22	73.25	26.75	48.178	66.24	33.76
5 (x)	43.37	71.88	28.15	37.58	67.17	32.83
6 (y)	51.00	73.69	26.31	49.52	68.71	31.29
7 (x)	37.81	71.84	28.16	43.43	68.51	31.49
8 (y)	44.35	70.52	29.48	45.87	67.2	32.80
9 (x)	39.29	68.10	31.9	48.02	38.19	31.81
10 (y)	49.95	67.56	32.44	49.97	68.1	31.90
Media	45.059	70.653	29.34	46.45	67.758	32.24

Tabelul 6

Câmp	$\rho=0.82$			$\rho=0.905$		
	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]	l_{Ai} [μm]	V_{Ai} [%]	V_{Ci} [%]
1 (x)	15.73	30.72	69.28	8.45	27.22	72.78
2 (y)	21.45	32.66	67.34	11.57	29.88	70.12
3 (x)	13.49	31.27	68.73	9.15	31.27	68.73
4 (y)	19.56	31.60	68.40	11.05	32.25	67.75
5 (x)	15.40	34.77	65.23	8.39	28.96	71.04
6 (y)	20.70	35.45	64.55	10.88	27.02	72.98
7 (x)	14.68	35.80	64.20	8.76	29.29	70.71
8 (y)	18.04	37.11	62.89	10.82	29.83	70.17
9 (x)	8.15	21.67	78.33	8.77	29.77	70.23
10 (y)	8.81	20.83	79.17	13.37	40.28	59.72
Media	15.6	31.188	68.812	10.12	30.577	69.42

ANEXA 3

SUBROUTINE PELL2AN1 (C,SIGMB,QB,VGRAD,SIGMA,QA,P,DELTAT,
NT6,LPARA,ISTRA,STRAT)

C

C

ANALYSE MECANIQUE: [FONDER.LAGAMECA]

C-----

C0 ELL2AF ELL2A
C1 PURPOSE ELASTO-PLASTIC CONSTITUTIVE EQUATION
C1 AXISYMETRIC STATE, ISOTROPIC HARDENING
C1 J1,J2 ELLIPTIC YIELD SURFACE
C3 RET. ARG. C(4,4) = COMPLIANCE TENSOR
C3
C3 SIGMB(4) = CAUCHY STRESSES IN THE INCREMENTED
C3 CONFIGURATION
C3 QB(1) = STATE VARIABLES IN THE INCREMENTED
C3 CONFIGURATION
C3 CALL ARG. VGRAD(2,2) = DISPLACEMENT GRADIENTS BETWEEN
C3 UP-DATED AND INCREMENTED
C3 CONFIGURATIONS
C3 SIGMA(1) = CAUCHY STRESSES IN THE REFERENCE
C3 CONFIGURATION
C3 QA(1) = STATE VARIABLE IN THE REFERENCE
C3 CONFIGURATION
C3 P(1) = VECTOR OF MATERIAL PARAMETERS
C3 DELTAT = TIME STEP
C3 NINTV = NB. OF SUB INTERVALS IN STRESS INT
EGRATIO
C3 NT6 = LOGICAL UNIT NO. OF PRINTER
C3 IJUMP = 0 IF STIFFNESS MATRIX AND INTERNAL
C3 FORCES COMPUTED
C3 = 1 IF INTERNAL FORCES COMPUTED ONLY
C3 DELEPS = PERTURBATION OF STRAIN COMPONENTS
C3

C6 USE DSQRT

C9

- Mise a jour M. SAVA JUILLET 1996

CLELL2A ELASTO-PLASTIC CONST EQU FOR PLANE STRAIN ISOTROPIC HARDE
NING

C-----

C

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

C

DIMENSION C(4,4),VGRAD(2,2),SIGMA(4),SIGMB(4),P(*),
QA(*),QB(*),ISTRA(*),LPARA(*),STRAT(*)

LOGICAL TESTMINI ,TEST1, TEST2

DATA ZERO /0.D0/, ONE /1.D0/, TWO /2.D0/, HALF /0.5D0/,

THREE/3.D0/,THIRD /0.333333333D0/TWOTRD/.66666666666

667D0/,

FOUR /4.D0/,SIX /6.D0/,DNINE /9.D0/

C

```

NINTV = LPARA(5)
ITYLA = LPARA(7)
IJUMP = ISTRAT(1)
DELEPS= STRAT(1)

C
C
IF (IJUMP.NE.0) CALL ANNULD(C,16)

C
C
E      = P( 2)
ANU    = P( 3)
ROO    = P( 4)
ROI    = P( 5)
ROC    = P( 6)
ROD    = P( 7)
C      ROC    = P( 8)
A01    = P( 8)
A02    = P( 9)
A03    = P(10)
A04    = P(11)
A05    = P(12)

C
A11    = P(13)
A12    = P(14)
A13    = P(15)
A14    = P(16)
A15    = P(17)

C
AK1    = P(18)
AK2    = P(19)
AK3    = P(20)
AK4    = P(21)
AK5    = P(22)

C
AN1    = P(23)
AN2    = P(24)
AN3    = P(25)
AN4    = P(26)
AN5    = P(27)

C
AP1    = P(28)
AP2    = P(29)
AP3    = P(30)
AP4    = P(31)
AP5    = P(32)

C
C      ROO    = QA(5)
C      IF (ROO.LT.ROI) THEN
C          E=E/100
C      END IF

```

```

C
C
DT= DELTAT/NINTV
NLOOP=1
IF (IJUMP.NE.0) NLOOP=5
C
DO 2200 ILOOP=1,NLOOP
C
C
PERTURBATION LOOP
C
YIELD = QA(2)
DISSIP= QA(3)
VOLUM = QA(4)
ROO    = QA(5)
AI0    = QA(6)
AI1    = QA(7)
AK     = QA(8)
AN     = QA(9)
AP     = QA(10)
C
SIG1=  SIGMA(1)
SIG2=  SIGMA(2)
SIG12= SIGMA(3)
SIG3=  SIGMA(4)
C
C
INITIAL VOLUMIC AND DEVIATORIC STRESSES
C
SIGM=  (SIG1+SIG2+SIG3)/3
SIGD1= SIG1-SIGM
SIGD2= SIG2-SIGM
SIGD3= -SIGD1-SIGD2
C
C
COMPUTE TOTAL STRAIN INCREMENTS
C
V1 = VGRAD(1,1)
V2 = VGRAD(2,2)
V12= VGRAD(1,2)
V21= VGRAD(2,1)
V3 = QA(1)
C
IF (ILOOP.EQ.2) V1=V1+DELEPS/DELTAT
IF (ILOOP.EQ.3) V2=V2+DELEPS/DELTAT
IF (ILOOP.EQ.4) THEN
                    V21=V21+HALF*DELEPS/DELTAT
                    V12=V12+HALF*DELEPS/DELTAT
END IF
IF (ILOOP.EQ.5) V3=V3+DELEPS/DELTAT
C
C
INCREMENT DE DEFORMATION PAR SOUS-INTERVALLE
C
DEPS1= V1*DT

```

```

DEPS2= V2*DT
DEPS3= V3*DT
DEPS12= (V12+V21)*DT
TWODR= (V12-V21)*DT
DEPSM= (DEPS1+DEPS2+DEPS3)/3
C   write (*,*) 'passage dans loi 60'
C
C   COMPUTE THE DEVIATOR OF CAUCHY STRESS IN THE UP-DATED
C   CONFIGURATION
C
C   DO 200 INTV= 1,NINTV
C
C   COMPUTE THE INCREMENT OF VOLUMIC AND DEVIATORIC CAUCHY STRE
SS
C   FOR A PURELY ELASTIC RESPONSE - JAUMANN CORRECTION
C
AUX = DABS(SIG1)+ DABS(SIG2)+ DABS(SIG3)+ DABS(SIG12)
IF ((AUX.GT.1.0E+6).OR.(DEPSM.GT.0.03)) THEN
ISTR(20) = 1
WRITE(*,202) AUX
202 FORMAT(' STRESS OVERFLOW OR DEPSM SUPERIOR OF 0,03: ',E10.4
)
RETURN
ENDIF
C
VOLUM = VOLUM * EXP( THREE*DEPSM )
ROOI = ROO
ROO = ROO * EXP(- THREE*DEPSM )
C
C   TEST POUR SAVOIR SI DEPASSEMENT D'UNE CONTRAINTE
C   OU D'UN INCREMENT DE DEFORMATION
C
C   FIN DU TEST
C
RO=ROO-ROO
IF (ROO.LT.ROI) RO=ROI-ROO
C
C   ROP = ROO - ROC
C   IF (ROO.LT.ROC) THEN
C           AIO = 0
C           ELSE
AIO = (A01*RO+A02*RO**2+A03*RO**3
      +A04*RO**4+A05*RO**5)
C   END IF
AII = (A11*RO+A12*RO**2+A13*RO**3+A14*RO**4+A15*RO**5)
AK  = (AK1*RO+AK2*RO**2+AK3*RO**3+AK4*RO**4+AK5*RO**5)
AN  = (AN1+AN2*RO+AN3*RO**2+AN4*RO**3+AN5*RO**4)
AP  = (AP1+AP2*RO+AP3*RO**2+AP4*RO**3+AP5*RO**4)
C

```

```

      TWOG = E/(ONE+ANU)
      G     = HALF*TWOG
      COMPR = E/(ONE-TWO*ANU)
C
      DS1E = TWOG*(DEPS1-DEPSM)+TWODR*SIG12
      DS2E = TWOG*(DEPS2-DEPSM)-TWODR*SIG12
      DS12E= G*DEPS12+HALF*TWODR*(SIG2-SIG1)
      DS3E =-DS1E-DS2E
      DSME = COMPR*DEPSM
C
      S1IN2 = SIGD1+DS1E
      S2IN2 = SIGD2+DS2E
      S12IN2= SIG12+DS12E
      S3IN2 =-S1IN2-S2IN2
      SMIN2 = SIGM+DSME
C
      AJ2 = (S1IN2*S1IN2+S2IN2*S2IN2+S3IN2*S3IN2+TWO*S12IN2*S12IN2
)
      AJ1 = THREE*SMIN2
C
      SD2 = DSQRT(AJ2)
C
      IF (AUX.LT.1.0E-40) THEN
C
      WRITE (*,*) 'TRAJET ELASTIQUE',E
      GO TO 150
      END IF
      IF ((AJ1.LT.AI0).OR.(AJ1.GT.AI1)) GOTO 100
      F = SD2 - AK*(-AJ1-AI0)**AN*(AI1+AJ1)**AP
C
      IF (F.LE.ZERO) THEN
      YIELD = ZERO
      GO TO 170
      END IF
C
100 CONTINUE
C
      S1IN3 = S1IN2
      S2IN3 = S2IN2
      S3IN3 = S3IN2
      S12IN3 = S12IN2
      AJ1E = AJ1
      UU = 0
      VV = 0
      TESTSOLU=0
      PRECISION = 1E-30
C
      SEPARATION = -(AN*AI1+AP*AI0)/(AN+AP)
C
      COEFF = TWOG/COMPR
C

```

```

      IF (SEPARATION.GE.AJ1E) THEN
        AJ1MIN = -AI1
        AJ1MAX = SEPARATION
        TEST = ABS(AI1-SEPARATION)
      ELSE
        AJ1MIN = SEPARATION
        AJ1MAX = -AI0
        TEST = ABS(AI0-SEPARATION)
      END IF

C
      AJ1Nm1 = AJ1MAX - ABS(AJ1MAX-AJ1MIN)/5
      AJ1N   = AJ1MIN + ABS(AJ1MAX-AJ1MIN)/5

C
60  CONTINUE

C
C
C
      DIF0 = -AJ1N-AI0
      DIF1 = AI1+AJ1N

C
      U = 3*AK**2*(-AN*DIF0**(2*AN-1)*DIF1**(2*AP)+AP*DIF0**(2*AN)
        *DIF1**(2*AP-1))
      FXN = SD2*U-AK*(DIF0**AN*DIF1**AP)
        *(U+(AJ1N - AJ1E)*COEFF)

C
C
      DIF0 = -AJ1Nm1-AI0
      DIF1 = AJ1Nm1+AI1

C
      U = 3*AK**2*(-AN*DIF0**(2*AN-1)*DIF1**(2*AP)+AP*DIF0**(2*AN)
        *DIF1**(2*AP-1))

C
      FXNm1 = SD2*U-AK*(DIF0**AN*DIF1**AP)
        *(U+(AJ1Nm1 - AJ1E)*COEFF)

C
      IF (ABS(AJ1N-AJ1Nm1).LE.(TEST/1.0E10)) GO TO 70

C
C
C
      Methode de la secante

C
      AJ1Np1 = AJ1N-(AJ1N-AJ1Nm1)*FXN/(FXN-FXNm1)

C
C
      If (AJ1Np1.LE.AJ1MIN) AJ1Np1=AJ1MIN
      If (AJ1Np1.GE.AJ1MAX) AJ1Np1=AJ1MAX

C
      AJ1Nm1= AJ1N
      AJ1N   = AJ1Np1

C
      UU = UU + 1
      IF (UU.GT.30) THEN
        TESTSOLU=1

```

```

        write(*,*) 'WARNING new test pas trouve',AJ1N,AJ1Nm1
        ,AJ1MAX,AJ1MIN
        ,FXN,FXNm1
C      .      ,ABS(AJ1Nm1-AJ1N),UU,AI1,AI0,(AI1+SEPARATION),SEPARAT
ION
C      READ (*,*)
        GO TO 70
        END IF
        GO TO 60
70     CONTINUE
C      AJ1=(AJ1Nm1+AJ1N)/2
        AJ1 = AJ1N
80     CONTINUE
C
        SMIN2 = AJ1 / 3
C
        DIF0 = -AJ1-AI0
        DIF1 = AI1+AJ1N
C
        IF ((DIF0*DIF1).EQ.0) THEN
            S1IN2 = 0
            S2IN2 = 0
            S3IN2 = 0
            S12IN2 = 0
            GO TO 150
        END IF
C
        U =3*AK**2*(-AN*DIF0**(2*AN-1)*DIF1**(2*AP)+AP*DIF0**(2*AN)
        *DIF1**(2*AP-1))
C
        COEFF = U + (AJ1-AJ1E)*COEFF
C
        S1IN2 = U * S1IN3/COEFF
        S2IN2 = U * S2IN3/COEFF
        S3IN2 = -S1IN2-S2IN2
        S12IN2 = U * S12IN3/COEFF
C      DLAMBDA = (AJ1E-AJ1)/COMPR/U
C      DISSIP=DISSIP+DLAMBDA
150 YIELD= ONE
C
C
C
C      COMPUTE CAUCHY STRESS AND STATE VARIABLES IN THE INCREMENTE
D
C      CONFIGURATION
C
170 SIGD1 = S1IN2
        SIGD2 = S2IN2
        SIG12= S12IN2
        SIGD3 = S3IN2

```

```

      SIGM = SMIN2
C
      SIG1 = SIGD1+SIGM
      SIG2 = SIGD2+SIGM
      SIG3 = SIGD3+SIGM
C
C      FIN DE BOUCLE SUR LES SOUS-INTERVALLES
C
200  CONTINUE
C
C      CAUCHY STRESSES IN THE INCREMENTED CONFIGURATION
C      STATE VARIABLES IN THE INCREMENTED CONFIGURATION
C
      IF (ILOOP.GT.1) GOTO 1200
C
      SIGMB(1)= SIG1
      SIGMB(2)= SIG2
      SIGMB(3)= SIG12
      SIGMB(4)= SIG3
C      IF (YIELD.EQ.ONE) WRITE (6,3210) AJ1,AJ2,YIELD
C
C      IF (ITYLA.EQ.1) THEN
C          DISSIP = ALAMA
C      END IF
C
      QB(1) = QA(1)
      QB(2) = YIELD
      QB(3) = DISSIP
      QB(4) = VOLUM
      QB(5) = ROO
      QB(6) = AI0
      QB(7) = AI1
      QB(8) = AK
      QB(9) = AN
      QB(10)= AP
      QB(11)= QA(11) + (VGRAD(1,1)+VGRAD(2,2)+QA(1))*DELTAT
C
      GOTO 2200
1200 CONTINUE
C
C      COMPLIANCE MATRIX
C
      ICOL=ILOOP-1
      C(1,ICOL)=(SIG1-SIGMB(1))/DELEPS
      C(2,ICOL)=(SIG2-SIGMB(2))/DELEPS
      C(3,ICOL)=(SIG12-SIGMB(3))/DELEPS
      C(4,ICOL)=(SIG3-SIGMB(4))/DELEPS
2200 CONTINUE
C

```



```
C      CALL DPRINT (C,4,4,4,8HC ELL2A  )
C      -----
C
C      IF (TESTSOLU.EQ.1) WRITE(*,*) 'WARNING : CRITERE DIVERGENT
C      ,
C      RETURN
C
C      END
```