

UNIVERSITATEA POLITEHNICA "POLITEHNICA" BUCURESTI

BIROUL DE DOCUMENTARE

STRADA 71, BUCURESTI

21.11.2008

Scutit de plata pentru activitatea de cercetare stiintifica si dezvoltare tehnologica realizata in cadrul proiectului de cercetare stiintifica si dezvoltare tehnologica intitulat "..."

...
...
...
...
...

Inaga . nycayn opu

BIBLIOTECA CENTRALA
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
BUCURESTI

BIBLIOTECA CENTRALA
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
BUCURESTI
506557
181 - D

C O N T I N U T

	pag.
I. Introducere	1
II. Mărunțirea și exigențele energetice actuale	3
III. Considerații generale asupra fizicii mărunțirii materialelor cristaline	7
IV. Bazele teoretice ale fizicii mărunțirii	13
V. Studiul parametrilor tehnici care caracterizează comportarea materialelor la mărunțire	20
1. Caracterizare generală și clasificare	23
2. Studiul comportării granulelor individuale de ciment la compresiune lentă	29
3. Studiul comportării granulelor individuale de ciment la șoc dinamic	40
VI. Studiul dinamicii proceselor de măcinare a cimen- terului la diferite utilaje de laborator	51
VII. Studiul cineticii mărunțirii	64
1. Istoricul problemei și lucrările fundamentale	64
2. Abordări moderne referitoare la cinetica mărun- țirii	67
3. Un nou model cinetic al procesului de mărun- țire	70
3.1. Considerații teoretice	70
3.2. Experimentări pentru verificarea modelului propus	73
3.3. Concluzii privind modelul cinetic propus	87
VIII. Concluzii	88
Bibliografie	91

I. INTRODUCERE

Industria cimentului deși cu o istorie relativ scurtă - primul brevet pentru fabricarea cimentului numit "ciment Portland" fiind al englezului Joseph Aspdin, din 1824 - a înregistrat mai ales după 1900 o dinamică spectaculoasă. România, care prin producția de ciment realizată în 1964 de cca. 14,0 milioane tone se situează în primele 20 de țări producătoare din lume, a dezvoltat la rândul ei, această industrie aproape în aceeași ritm cu țările cele mai dezvoltate. De la primele linii de cca. 500 t cl/d puse în funcțiune în anul 1900 la Comarnic și până la liniile moderne de 3000 t cl/d, cauzate cu calculatoarea de proces - s-a străduțit un drum lung și plin de creștături.

Saltul calitativ dar și cantitativ cel mai impresionant a fost realizat după 1957 când s-a pus în funcțiune prima linie de 500 t cl/d pe procedeul uscat.

Se precizează, pe baza hotărârilor A.C., că până în 1970 practic întreaga producție de ciment a țării să se realizeze pe procedeul uscat.

În fluxul tehnologic de fabricare a cimentului procesele de mărunțire apar în două faze ale sale și anume la prepararea materiei prime și la obținerea cimentului.

Fapt fiind importanța tehnologică a proceselor de mărunțire și a implicațiilor energetice pe care ele le aduc, prin lucrarea de față s-a căutat să se aprofundeze fizica acestor procese.

Lucrarea este structurată pe opt capitole, cuprinzând 19 tabele, 21 figuri și 40 de referințe bibliografice.

Capitolul I - "Introducere" - face o prezentare generală a lucrării.

Capitolul II - "Mărunțirea și exigențele energetice actuale" - face o punere în viață stabilind ponderea proceselor de mărunțire din industria cimentului în balanța energetică a țării.

Totodată în acest capitol se face și o sarcină trecere în revistă a proprietăților fizice ale materialelor care influențează comportarea acestora la mărunțire, menționându-se și direcțiile principale în care sînt orientate cercetările întreprinse pe plan mondial.

Capitolul III - "Considerații generale asupra fizicii mărunțirii materialelor cristaline", prezintă o serie de aspecte legate de ruperea materialelor proaspe și de factorii care o influențează. Se face totodată prezentarea, pe baza literaturii de specialitate, a mecanismului ruperii caracteristic în cazul operațiilor de mărunțire.

Capitolul IV - "Bazele teoretice ale fizicii mărunțirii", după ce prezintă cerințele pe care ar trebui să le satisfacă o teorie adecvată a mărunțirii și arată că, pînă în prezent, nici una din teoriile cunoscute nu-a îndeplinit aceste cerințe, face o trecere sintetică în revistă a principalelor teorii și relații existente în literatura de specialitate.

Capitolul V - "Studiul parametrilor tehnici care caracterizează comportarea materialelor la mărunțire" cuprinde, în prima sa parte o prezentare a acestor parametri tehnici.

În continuare este prezentat studiul întreprins de autor privind comportarea granulelor individuale de clincher la rupere

proziune lentă. După definirea noțiunilor folosite (granulă individuală, compresiune lentă) și prezentarea materialului utilizat în încercări, precum și a aparaturii și modului de lucru sînt date rezultatele obținute. Pe baza acestor date s-au stabilit o serie de relații matematice care descriu destul de fidel o serie de parametrii caracteristicii solicitării la compresiune lentă.

Urărindu-se același tipic, se prezintă în continuare studiul comportării granulelor individuale de clincher la șoc dinamic, dîndu-se relațiile matematice deduse de autor, relații ce caracterizează această solicitare.

Capitolul VI - "Studiul dinamicii proceselor de măcinare a clincherului în diferite utilaje de laborator" cuprinde rezultatele obținute de autor la măcinarea clincherului în trei tipuri de utilaje de laborator, respectiv în moară înclinată, în laborator și în moară orizontală, tip Bond.

După ce sînt prezentate schemele și detalele constructive ale acestor utilaje de laborator sînt evidențiate o serie de corelații între diverși parametri și procesului de măcinare. Aceste date au oferit o imagine - calitativă în primul rînd - a modului de desfășurare a măcinării în diferite ut. loje, permițînd alegerea utilajului de laborator opt_m pentru studiul cineticii mărunțirii.

Capitolul VII - "Studiul cineticii mărunțirii" face în prima sa parte o trecere în revistă a lucrărilor fundamentale, precum și a teoriilor moderne referitoare la această problemă. În partea a doua a acestui capitol, autorul prezintă un model nou, original, al cineticii procesului de mărunțire.

Modelul propus este însoțit de o prezentare detaliată a aparatului matematic ajutor. În ultima parte a capitoului sînt prezentate experimentările efectuate pentru verificarea modelului propus precum și concluziile ce se desprind din analiza modelului cinetic propus.

Capitolul VIII - "Concluzii" - cuprinde, pe de o parte, o sinteză a concluziilor trase de autor pe baza experimentărilor prezentate în lucrare, iar pe de altă parte, prezintă o serie de direcții de investigație, cu aplicabilitate practică, reieșite din această cercetare cu caracter fundamental.

Autorul ține să mulțumească în mod deosebit tov.prof.dr. ing. Ioan Drăgoi, pentru modul în care l-a îndrumat în elaborarea acestei lucrări.

Aceleași calde mulțumiri sînt adresate și tov.dr.ing. Ion Cotea pentru condițiile create autorului pentru efectuarea experimentărilor, pentru sprijinul moral acordat.

Autorul își exprimă recunoștința față de colegii de muncă pentru sprijinul de care s-a bucurat din partea lor, precum și pentru schimbul fructuos de idei și impresii în diferitele faze ale cercetării.

Autorul

II. MĂRUNȚIREA ȘI UTILITĂȚILE ENERGIEI ELECTRICE ACTUALE

Procesele de mărunțire reprezintă, în actualul stadiu al tehnologiei cimentului, unul dintre cei mai mari consumatori energetici, ele absorbind pînă la 5,4 % din energia electrică produsă pe plan mondial (1); dintre aceste procese, cele din industria cimentului sînt de departe cele mai mari consumatoare de energie, ponderea lor, din acest punct de vedere, ajungînd pînă la cea. 67 % (1,2). Industria de ciment a României a consumat în anul 1965, 1476556 kWh (3). Dacă se estimează ponderea medie a consumului de energie electrică al instalațiilor de mărunțire din această industrie la cea. 70 %, rezultă că în România s-au consumat în 1965, pe procesele de mărunțire din industria cimentului, cea. 1033589,2 kWh, adică 1,47 % din totalul energiei electrice produse în țară, respectiv 2,24 % din consumul total de energie electrică din industria republicană (3).

Aceste date pun în evidență importanța economică deosebită a proceselor de mărunțire, procese care au făcut obiectul a numeroase studii și cercetări.

În ultime vreme cercetători din numeroase țări și-au orientat cercetările către aprofundarea fizicii procesului de mărunțire, concentrîndu-se asupra unor proprietăți pe care operațiile de mărunțire le conferă materiei și care pot influența calitățile lor din punct de vedere al utilizării, cum sînt :

- modificarea structurii cristaline;
- structura suprafețelor libere formate în procesul de mărunțire și activitatea lor chimică;
- modul de dezvoltare a flurilor;
- factorul de fumă al granulelor ;

- distribuția granulometrică.

Scopul acestor studii este de a optima procesul de mărunțire, în sensul de a se obține anumite caracteristici de utilizare ale acestora cu consumuri energetice minime.

Mărunțirea este un proces tehnologic prin care se realizează reducerea dimensiunilor particulelor din care este alcătuit un material granular, cărui i se modifică astfel distribuția granulometrică și i se mărește suprafața specifică.

Comportarea materialelor la mărunțire depinde de un ansamblu de proprietăți fizice ale căror influențe calitative asupra performanțelor instalațiilor de mărunțire nu au putut fi încă stabilite cu claritate, deși ele sînt în majoritatea cazurilor evidente din punct de vedere calitativ.

Dintre proprietățile fizice ale materialelor care influențează comportarea lor la mărunțire se menționează :

- forma și dimensiunile granulelor de material la intrarea în utilajul de mărunțire. Granulele se mărunțesc cu atât mai greu cu cît sînt de dimensiuni mai mici;

- duritatea materialului - a cărei creștere corespunde unei rezistențe sporite la eforturile de fragmentare, deci unei tendințe a granulelor de material de a rămîne mai mult în zona de acțiune a organelor de mărunțire;

- abrazivitatea - care determină uzura organelor de lucru ale utilajelor de mărunțire ;

- umiditatea materialului - care trebuie să fie, pentru a se face mărunțirea în bune condițiuni fie mai mică de 1-2 %, fie mai mare de 30 %, în domeniul valorilor intermediare existînd pericolul blocării utilajelor respective cu material lipit;

- tenacitatea - a cărei creștere corespunde în multe cazuri cu îngreunări ale operației de fragmentare ;

- adhezivitatea unor materiale - care favorizează atât formarea în paralel cu mărunțirea, a unor aglomerări de particule, cât și lipirea materialului pe organele de lucru ale utilajelor de mărunțire ;

- eterogenitatea materialelor - care conștin, în majoritatea cazurilor, granule cu comportări diferite, operația de mărunțire având un caracter selectiv, fracțiunile mai greu de mărunțit stăgându-se mai mult în instalațiile respective.

O analiză detaliată a influențelor cantitative ale tuturor factorilor citiți - de exemplu asupra productivității utilajului de mărunțire sau asupra consumului specific de energie electrică pentru realizarea aceleiași operații - este foarte dificilă, astfel că, în prezent, cercetările care se întreprind pe plan mondial în acest domeniu sînt orientate în două direcții principale :

- lămurirea mecanismului rupei și stabilirea parametrilor care caracterizează acest fenomen, studii care au în vedere în special ruperea metalelor, dar care pot furniza pentru cazul materialelor mărunțite în industria cimentului, unele indicații interesante, de ordin calitativ ;
- definirea și determinarea valorilor unor parametri caracteristici ai diferitelor materiale, din punct de vedere al comportării lor la fragmentare.

III. CONSIDERAȚII GENERALE ASUPRA FIZICII MĂRUNȚIRII MATERIALELOR CRISTALINE

Ruperea materialelor a fost studiată mai întâi în legătură cu necesitatea stabilirii unor criterii de rezistență utilizabile

În practica inginerescă, pentru calculul de dimensionare, studiindu-se fenomenele care se desfășoară la nivelul structurii atomice și moleculare prin urmărirea efectelor observabile la scară macroscopică, ajungându-se la dezvoltări teoretice cu concluzii aplicabile în practică pe baza modelului de mediu continuu deformabil. Acest mod de abordare a problemei conduce însă la limitări ale criteriilor elaborate - de exemplu criteriul tensiunii normale sau tangențiale maxime, cel al lui Mohr, criteriile energetice, etc. - prin faptul că modelul teoretic utilizat nu poate cuprinde influența caracteristicilor de structură, care, astfel cum au arătat-o o serie de cercetări mai recente, sînt determinante în apariția și evoluția fenomenelor de rupere.

Avanzările științifice au devenit evidente odată cu dezvoltarea de noi tipuri de construcții de mare performanță cum sînt cele aerospațiale, construcții navale moderne, etc, în special în legătură cu necesitatea de a se încălca elementele acestora mai aproape de limite de rupere. Teoria clasică își pierde deci valabilitatea tocmai în domeniul, de interes deosebit pentru lucrarea de față, al mecanismelor intime ale rupei solidelor, ceea ce a determinat apariția unei noi discipline, cunoscută sub numele de "mecanica rupei materialelor", ale cărei origini se regăsesc în lucrările lui Griffith de la începutul celui de-al treilea deceniu al secolului trecut (4).

Din punct de vedere al structurii solidelor și al influenței sale asupra proprietăților acestora, concepția moleculară, stît de utilă în domeniul gazelor, conduce în multe cazuri la concluzii eronate. Solidele pot fi alcătuite stît din molecule propriuzise - cea foarte rar întîlnit - stît și, mai ales, din atomi, ioni, electroni, etc, dispuși în rețelele de o mare varietate, diverse

care se cilează (5) :

a) juxtapuneri de atomi fără sarcini electrice, formind cristale atomice (gaze nobile) ;

b) grupări de atomi neutri, avind electroni comuni în cadrul grupării, dar nu și atomii din grupări adiacente, situație în care se pot forma cristale moleculare tandre și cu greutate specifică redusă (sulf, sodiu, materiale organice), filamente (seleniu, arsenic), foi (grafit, molibden) și cristale diamantine, nelimitate pe nici o direcție, foarte dure;

c) grupări de atomi cu sarcini electrice, dar fără electroni comuni, formind cristale ionice simple (săruri, acizi, alcalii);

d) grupări de atomi cu sarcini electrice, avind electroni comuni în interiorul grupării, dar nu și între grupări, putându-se forma cristale ionice complexe, de dimensiuni foarte mici (diferite săruri, acizi, alcalii), structuri fibroase (asbest), plane (nică, argile, substanțe organice) și masive (diferiți silicați);

e) juxtapuneri de atomi cu sarcini pozitive și de electroni, formind cristale metalice.

În afară de primul tip de structură, în care se intervin decât forțe Van der Waals, de natură fizică, în toate celelalte apar, între particulele care formează diferitele tipuri de cristale, forțe mult mai mari, ce pot fi considerate ca fiind legături chimice.

În procesul mărunțirii materialelor din industria cimentului se întâlnesc în special structuri de tipul "c" și "d", ele punind problema învingerii a două categorii de forțe, respectiv cele dintre cristale și cele, mult mai mari, din interiorul

cristalelor. Contribuția acestora din urmă la consumul total de energie pentru realizarea fragmentării este cu atât mai mare cu cât finețea ce trebuie obținută este mai avansată, în raport cu dimensiunile cristalelor, ea fiind mai importantă în cazul măcinării materiilor prime.

Sub acțiunea eforturilor exterioare, rețelele cristaline se pot deforma ca urmare a unuia dintre următoarele procese :

- alunecarea în plane și pe direcții preferențiale ;
- meclarea, care constă în deplasarea unei părți din rețea astfel încât această să se deplaseze, în raport cu un plan - plan de meclare - într-o poziție simetrică ;
- pierderea locală a stabilității, regiunea respectivă trecând brusc într-o poziție înclinată, fenomen întâlnit în cazul solicitării la compresune a cristalelor hexagonale pe o direcție paralelă cu planul de uză.

Creșterea în continuare a eforturilor duce, după deformarea cristalelor și atingerea unor niveluri corespunzătoare de încălzire, la ruperea lor, care se poate produce în două moduri fundamentale :

- ruperea prin separare sau clivare, care implică dezfăcerea legăturilor atomice, perpendicular pe planurile în care acestea sînt cele mai slabe, sub acțiunea componentelor normale ale tensiunilor;
- ruperea prin răsfrîngere, în planuri cu densitate maximă de stoni.

Rezistența teoretică la rupere a materialelor cristaline este de ordinul de forțele de legătură interatomice, care sînt rezultantele dintre forțele de atracție și cele de respingere, conform fig.1.

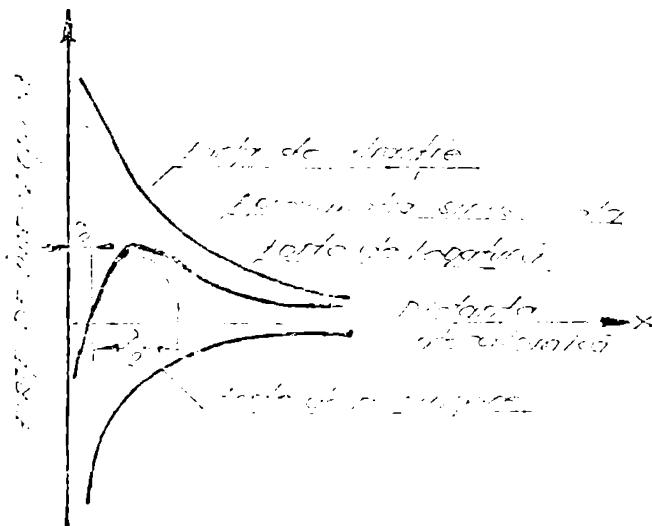


Fig. 1. - Forțe de interacțiune atomică (4)

C_0 - coordonata poziției de echilibru ;

λ - lungimea de undă a forței aproximative
sinusoidale de legătură.

Presupunându-se că energia necesară pentru desprinderea celor două fețe ale planului de separare este echivalentă cu energia superficială a celor două suprafețe formate, aceasta fiind la rândul ei egală cu lucrul mecanic al forțelor de legătură, în timpul deplasării celor două părți ale cristalului pe o distanță $\lambda/2$, corespunzătoare semiperioadei funcției sinusoidale care aproximează ecuația reală a forței de legătură, s-au calculat, pe baza determinării valorilor energiei superficiale, a modului de elasticitate și a distanței de echilibru interatomice, rezistențele teoretice normale pentru diferite materiale. Valorile găsite sînt aproape de cele determinate în mod direct pe cale experimentală numai în cazul monocristalelor care nu conțin defecți de rețea. În toate celelalte cazuri, rezistențele determinate experimental sînt mai mici decît cele teoretice. Aceste diferențe sînt atribuite în prezent, de majoritatea cercetărilor, defecțiilor de rețea ale materialelor tehnice și în

special diferitelor tipuri de dislocații, care favorizează deformaerea rețelelor (4).

Noi concepție asupra ruperii materialelor consideră că aceasta este un proces puternic localizat, la originea cărui se găsesc diferite tipuri de imperfecțiuni ale microstructurii, cum sînt micrufisurile, dislocațiile, impuritățile, etc.

La nivel microscopic se disting două tipuri caracteristice de rupere :

- ruperea fragilă sau prin separare, care apare la un nivel de tensiune bine definit, ponderea principală a consumului de energie al procesului fiind reprezentată de cel necesar pentru învingerea forțelor de coeziune ;

- ruperea ductilă, care se dezvoltă progresiv, prin deformări plastice, de la un nivel inițial al tensiunii la un nivel final superior, lucrul mecanic necesar pentru deformaerea premergătoare ruperii avînd ponderea cea mai mare în consumul energiei al procesului.

Acastă diferențiere microscopică nu este riguros corelată cu modurile structurale de rupere. Astfel, în cazul ruperii prin separare, inițierea procesului poate fi precedată de deformații plastice la nivelul microstructurii. Mai trebuie remarcat că ruperea prin separare este favorizată de blocarea dislocațiilor pe atomi interstițiali, impurități, etc.

La metale se pot observa ambele moduri macroscopice de rupere, în timp ce materialele supuse mărunțirii în industria cimentului sînt preponderent fragile.

Determinările experimentale ale rezistențelor la rupere ale diferitelor materiale, chiar dacă sînt executate după o tehnică invariabilă, conduc la rezultate diferite, a căror variabilitate se

poate explica prin faptul că ruperea, fiind cauzată de defectele microstructurale menționate, este un fenomen aleator. Această observație poate constitui și o explicație a faptului că variabilitatea rezultatelor experimentale este mult mai pronunțată în cazul ruperilor fragile decât în cel al ruperilor ductile, precedate de deformații plastice importante. S-a dezvoltat astfel o concepție probabilistică despre rupere, care, în forma sa cea mai simplă se bazează pe următoarele ipoteze :

- defectele sînt repartizate uniform în volumul de material considerat ;

- nu se produc interacțiuni între defecte ;

- existența unui singur defect de intensitate critică

poate cauza ruperea în volumul considerat.

Se demonstrează că probabilitatea de rupere este dată de relația :

$$P = 1 - e^{-cV} \quad (1)$$

în care :

V - volumul bucății de material supusă mîsurării ;

c - coeficient experimental, funcție de intensitatea și modul de aplicare a eforturilor.

Această concepție va fi utilizată pentru interpretarea unor dintre fenomenele ce apar în cadrul proceselor de mîsurare.

Pentru aplicațiile tehnice, un interes deosebit îl prezintă studiul fenomenului ruperii la nivel macroscopic, cu evaluarea cantitativă a parametrilor săi caracteristici. Întrucît ruperea materialelor se produce prin dezvoltarea unor fisuri și cavități care - deși apărute printr-un proces la nivel microscopic - ajung la dimensiuni față de care detaliile microstructurii (rețeaua cristalină, dislocațiile impurităților) apar neglijabile, procesul poate

fi tratat teoretic pe baza modelului mediu continuu cu fisuri. Problema este abordabilă prin metodele generale ale termodinamicii particularizate la studiul echilibrului energetic al fisurilor și pe această cale s-au stabilit criterii noi de rezistență (Griffith, Barenblad, Irwin, etc), care se referă mai ales la calculul pieselor metalice ieșind deci din domeniul temei lucrării de față, dar al căror studiu a evidențiat unele fenomene care vor trebui urmărite și în cercetările asupra mărunțirii rocilor. Astfel, valoarea critică a factorului de intensitate a tensiunii (definit de Griffith), capabilă de a declanșa propagarea instabilă a unei fisuri și deci ruperea, crește când dimensiunile granulelor scad și când temperatura crește și scade când crește viteza de aplicare a sarcinii și când ruperea are loc în medii active sau sub acțiunea radiației neutronice.

După Bond (6), caracteristic pentru operațiile de mărunțire este mecanismul ruperii unei bușăți de roadă de formă neregulată, prin compresiune progresivă, ale cărei faze sînt următoarele :

- sfărîmarea punctelor proeminente, în care se aplică forțele exterioare ;

- comprimarea și deformarea rocii și creșterea în masă a unei distribuții de tensiuni în funcție de formă și structură ei ;

- depășirea în anumite puncte a rezistenței de rupere, ceea ce duce la formarea de fisuri ;

- ▼ redistribuirea tensiunilor și a energiei de deformare, care se concentrează la extremitățile fisurilor, determinînd extinderea lor pînă cînd bușata de roadă cedează ;

- apariția, în paralel cu faza precedentă, a unor concentrații secundare de tensiuni, care produc amorse de fisuri și rupturi suplimentare.

Această concepție sintetizează destul de bine concluziile asupra rușii solidelor și evidențiază complexitatea fenomenelor de mărunțire a rocilor.

IV. BAZILE TEORETICE ALE FIZICII MĂRUNȚIRII

În timp ce aproape un secol, procesele de mărunțire au fost studiate sub aspectul energiei consumate în timpul măcinării. Acest mod de a privi problema este corect și logic, pentru că mărunțirea, după cum s-a arătat, este un factor decisiv în stabilirea prețului de cost al fabricării cimentului, iar energia consumată pentru aceasta este datorată în mare parte proceselor de mărunțire.

Datorită acestui fapt, numeroși cercetători au căutat să elucideze aceste fenomene și să elaboreze o teorie adecvată, care să corespundă realității. Cu toate cercetările intense desfășurate, pînă în prezent nu s-a putut elabora o teorie unitară, adecvată și verificabilă în practica industrială a mărunțirii.

O teorie adecvată a mărunțirii ar trebui să satisfacă o serie de cerințe între care se menționează (7) :

- să explice distribuția rezistenței particulelor de dimensiune dată precum și relația dintre rezistențele particulelor și dimensiunile lor;

- să definească distribuția după mărime a materialului rezultat, punînd în relație această distribuție cu tipul și densitatea forțelor de mărunțire;

- să explice pe deplin modul de utilizare a energiei într-un proces de mărunțire, deci să arate dacă energie, sau o parte din ea se transferă materialului, pe măsură ce diminuează acestuia crește sau, dacă energie este evacuată total sub formă de căldură;

- să dea posibilitatea calculării energiei necesare pentru reducerea unității de masă a materialului de la o dimensiune la alta ;

- să permită formularea unor concluzii cu privire la eficiența absolută a unei moeri ;

- să dea indicații pentru alegerea celui mai bun tip de moară, adecvat pentru mărunțirea unui anumit material.

După cum s-a mai arătat, pînă în prezent nici o teorie nu a reușit să dea un răspuns complet, global și științific tuturor acestor probleme. Literatura de specialitate pune la îndemînă o mulțime de teorii, de relații matematice care încearcă să abordeze una sau alta din laturile teoriei mărunțirii.

Astfel, o serie de cercetători și-au axat investigațiile pentru stabilirea unor relații de repartiție granulometrică (v. tabelul 1). Dintre ele, cel mai des utilizate sînt relațiile lui Rosin-Rammler-Sperling (cu ajutorul diagramei dublu-logaritmice a lui Bennett), cît și cele stabilite de Gaudin (cu Andreev și Lehmann) (8-12). Aceste relații au totuși doar anumite domenii de aplicare, iar discuțiile se poartă în ultima vreme în special în jurul valorilor factorilor de neuniformitate a distribuției granulometrice, pentru precizarea cărora ar putea fi utile metodele statistico-matematice (13).

Diverși cercetători au căutat să găsească corelații între suprafața specifică și granulometria însăși formulele experimentale obținute (v. tabelul 2) au fiecare un domeniu restrîns de utilizare; dintre aceste relații, cea a lui Anselm (14) este cea mai ușoară și folosește repartiția Rosin-Rammler-Sperling.

Studierea vitezei de mărunțire-variației granulometriei materialului în funcție de durata măcinării, a permis stabilirea di-

RELAȚII DE REPARTIȚIE GRANULOMETRICĂ.

Autorul (anul) Observații	Relații	Notații
Martin (1934)	$\frac{dy}{dx} = a \cdot e^{-bx}$	$y = f(x)$, funcția de repartiție granulometrică x = dimensiune a granulelor a, b = constante
Gaudin (1926) Relație confirmată de F. Bond, Mexon, Andreev (1939), Schuhmann (1940).	$y = \left(\frac{x}{k_0}\right)^m$ Caz particular: $y = 0,8 \left(\frac{x}{k_0}\right)^m$ — Taggart și F. Bond	m = constantă y = procentul de granule de dimensiuni $\leq x$ k_0 = modulul (prezentiv) dimensiunii particulelor când $y = 1$
Rosin-Rammler (1922) Relație susținută și de Andreasen, Bennett, Sperling, Spennier, Vidmajer (1953) etc.	$y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{k_0}\right)^m}$	k_0 = modulul (dimensiunea caracteristică) pentru $y = 0,632$
Svensson (1953) Cuprinde relațiile de mai sus într-o formulă generală.	$y = \frac{\int_0^x e^{-z^{\frac{1}{p}}} dz}{\int_0^\infty e^{-z^{\frac{1}{p}}} dz}$ Cazuri particulare: $p = 0 \rightarrow$ Gaudin $p = 1 \rightarrow$ Rosin-Rammler	$z = \left(\frac{x}{k_0}\right)^m$ p = dispersia fracțiilor lor grosiere de mărimea măruntă Uzual: $m = 0,5 \dots 1,1$ $p = 0,2 \dots 1,2$
Heywood (1933)	$\frac{dy}{dx} = a \cdot e^{-b \cdot x^m}$	a, b, m = constante
Wainig (1933)	$\frac{dy}{dx} = \frac{M}{x^b}$	M, b = constante
Roller (1937)	$y = a \cdot \sqrt{x} \cdot e^{-\frac{b}{x}}$	a, b = constante
Mach-Osawa (1925) Muller (1930), van der Meer (1930), van der Meer (1931), van der Meer (1932).	Relații logaritmice de repartiție granulometrică.	—
Sedlacek și Bass (1963)	Teoria matematică a mărunțirii bazată pe probabilitatea ciocnirilor.	Se introduce noțiunea de granulometrie "naturală"
Proodhant, Calcott (1955), Brown (1955)	Relații bazate pe calcul matricial	—
Nagakawa, Matsun, Sakashi și alții (1952), Grigg (1953), Fengerholt (1948), Manning și Strong (1953)	Alte relații de repartiție granulometrică.	506 552 — 1810

RELATII ÎNTRU GRANULOMETRIE ȘI SUPRAFAȚĂ SPECIFICĂ

Autorul (anul)	Relatii	Notatii
Relația teoretică „globală”	$S = \sum a_i \cdot s = \frac{k}{\rho} \cdot \sum \frac{a_i}{d}$ <p>$k = 1 \dots 16$, constantă a formei fragmentelor (după Key, pentru ciment $k \approx 7$)</p>	<p>a_i = proporția fiecărei clase granulare</p> <p>s = suprafața spec. a fiecărei clase granulare</p> <p>d = dimensiunea medie a particulelor clasei (ca medie aritmetică sau logaritmică \rightarrow L_{50})</p> <p>ρ = greutatea specifică</p>
Kihlstedt (1962)	$S = \frac{k}{\rho \sqrt{d}}$ $S = S_0 + C_x \approx \frac{k}{\rho \sqrt{d}}$	<p>d = diametrul mediu al particulelor (calculat ca d_{50} sau d_{100})</p> <p>ρ = greutatea specifică</p> <p>$k = 500 \dots 775$, coeficient de natură numerică al valorii caracteristice repartiției granulare: 80% sau 100% frecuență</p> <p>C_x; $k' = \frac{k}{\rho}$, constante</p>
Metoda lui Rosin-Rammler (formula empirică)	$S = k (2 - \log R_{30})$	<p>$k \approx 6000$, coeficient ce depinde de procedul de etalonare a aparatului.</p> <p>R_{30} = procente de reziduu în amestecul de etalonare</p>
După Zambelli (1968) Relații empirice	<p>Pentru granule fine ($< 7\mu$): $S \approx 110 \cdot d$</p> <p>Pentru materii prime în industria cimentului: $S \approx 6500 - 87 \cdot R_{009}$</p>	<p>a_i = proporții ponderale granulelor sub 7μ</p> <p>$1500 \text{ cm}^2/g < S < 20000 \text{ cm}^2/g$</p> <p>$R_{009}$ = reziduu pe sita ϕ (între 5% ... 35%)</p>
Anselmi (1950) După Rosin-Rammler (relație empirică)	$S = \frac{36,8}{d_{36,8} \cdot n \cdot \rho}$	<p>$d_{36,8}$ = dimensiunea caracteristică de frecare prin sită</p> <p>n = panta curbei Rosin-Rammler</p> <p>ρ = greutatea specifică</p>
De Venuat (1961) Relație empirică	$S \approx 7000 \left(\frac{1}{\rho} - 0,5 \right)$	<p>ρ_0 = greutatea specifică aparentă (relativă)</p>
Roller, Gates, Rosin, Rammler, etc	Alte relații empirice	

feritelor relații care încearcă să modeleze matematic cinetica proceselor de mărunțire (v. tabelul 3). Nici una dintre aceste expresii nu are o largă aplicabilitate practică, deși aprofundarea acestui aspect apare esențială pentru dinamica procesului, mai ales în vederea ameliorării randamentului de mărunțire. Dar și pentru exprimarea randamentului mărunțirii (în funcție de energiile ce intervin în proces) există foarte multe relații, dintre care cele mai importante sînt prezentate în tabelul 4.

Mărunțirea este un fenomen complex, care trebuie privit nu numai ca fiind de natură mecanică, ci și din punct de vedere termodinamic, fizico-chimic, etc. În cauza acestui mecanism complex al mărunțirii nu s-a ajuns încă la o teorie generală, științifică de stabilire a energiei consumate în operațiile de mărunțire, deși, în cursul timpului au fost propuse numeroase teorii (legi) ale mărunțirii (15-16). În tabelul 5 sînt prezentate principalele teorii de mărunțire (cele „clasice”), iar în tabelul 6 alte teorii stabilite după anul 1950. Tabelul 7 cuprinde în sinteză, principalele relații energetice privind mărunțirea.

Toate aceste teorii de mărunțire au un caracter mai mult sau mai puțin empiric, un domeniu de valabilitate destul de aproximativ delimitat și nici una nu poate fi considerată ca lege generală a procesului. În plus, după cum arată Guillot (5), toate teoriile elaborate pînă în prezent au la bază ipoteze simplificatoare față de fenomenul real al mărunțirii, neținînd seama de unele sau mai multe din următoarele constatări cunoscute sau puse în evidență de practică :

- materialele sînt în general eterogene ;
- în timpul mărunțirii apare fenomenul de aglomerare a particulelor ;

- repartițiile granulometrice reale prezintă abateri față de formele ideale propuse ;

- particolele provenite din ruperea aceluiași material nu sînt izotrope și nici similare geometrie ;

- solicitările și deformațiile diferitelor particole pînă la rupere nu sînt uniforme ;

- suprafețele de rupere nu sînt similare ;

- există deosebiri esențiale între fenomenul mărunțirii unei particole individuale și a unui ansamblu de particole, p.a.m.d.

Confirmate sau neverificate de experimentări, susținute sau contestate de diverși autori, unele sau altele dintre aceste teorii empirice pot fi totuși utilizabile pentru studiul mecanismului mărunțirii. Așa de exemplu, legea lui Kick-Kirpicev este aplicabilă, cu suficientă aproximație, pentru grade de mărunțire corespunzătoare domeniului concasării și presăcinării, iar legea lui Rittinger este utilizabilă în domeniul măcinării pînă la fineți nu prea avansate, începînd de la care apare evident fenomenul de aglomerare, definit cantitativ de Papadakis (17-18). Așa numita "teorie a treis a mărunțirii", enunțată în anul 1952 de Bond (1) se situează între "ipoteza suprafețelor" a lui Rittinger și cea a "volumelor" a lui Kick-Kirpicev. În domeniul mărunțirii la fineți foarte mari, începe să fie valabilă relația lui Kiesekelt, prezentată în tabelul 6. Formula lui C.Dimitrescu, dată în același tabel, bazîndu-se pe teoria lui Rittinger, ține seama de aptitudinea la aglomerare.

Încercările de cuprindere a mai multor teorii în formule generalizatoare, nu schimbă caracterul lor empiric. Cea mai cunoscută relație generală este cea a lui Charles (20), dată în tabelul 5. Alte încercări de generalizare se datoresc lui Schumann (v.

RELATII PRIVIND VITEZA DE MĂRUNȚIRE.

Autorul (sau) Observații	Relații	Notații
Fohrenwald (1934)	$\frac{dR}{dt} = -R \cdot f(x)$	<p>$R(x,t)$ = funcția de măcinare, reprezentând repartiția (reziduu pe o sită) a unei granule "x" după timpul de măcinare, "t".</p> <p>$\frac{dR}{dt}$ = viteza de măcinare, respectiv cantitatea de material măcinat la o sinetă dată (în procente de reziduu cumulat) în unitatea de timp.</p> <p>$f(x)$ = funcție caracteristică</p>
Zagustin (1940) Formula a fost infirmată de experimentări	$f(x) = ax;$ $R(x,t) = R_0(x) \cdot e^{-axt};$ $\frac{dR}{dt} = -R \cdot a \cdot x$	<p>a = constantă</p>
Perov, F. Bond (1950, Andreev (1959)) Formula nu s-a putut verifica experimental	$R(x,t) = R_0 \cdot e^{-ct};$ $\frac{dR}{dt} = -c \cdot R$	<p>R_0 = reziduu cumulat pe o sită la timpul $t=0$</p> <p>c = coeficient de aptitudine la măcinare.</p>
Alcavdin (1938) Formula corepunde repartiției Rosin-Rammler și s-a verificat experimental	$R(x,t) = R_0 \cdot e^{-c \cdot t^n};$ $\frac{dR}{dt} = -c \cdot n \cdot t^{n-1} \cdot R$	<p>n = exponentul funcției Rosin-Rammler (considerat constant)</p> <p>Cazuri particulare: $n=1$, viteza de măcinare e constantă $n>1$, " " " " " " crește $n<1$, " " " " " " scade</p>
Romadin	$R(x,t) = R_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{t_c}\right)^n}$	<p>t_c = intervalul de măcinare după care reziduu cumulat are 36,8% din valoarea sa inițială.</p>
Patat și Langemann (1959) Analogie cu viteza reacțiilor chimice	$\frac{dR}{dt} = -c \cdot R^n$	<p>n = ordinul de reacție</p>

EXPRESII ALE RANCIAMENTULUI DE MĂCINĂRI

(Energii ce intervin în proces)

Autorul (anul)	Relatii	Notatii
B. Beke (1962)	<p>Randamentul procesului:</p> $\eta_p = \frac{W_u}{W_u + W_t} ; W_t \gg W_u$	<p>$W = W_u + W_t + W_i - W_c$, energiile ce intervin în procesul de zdrobire.</p>
	<p>Randamentul operației:</p> $\eta_o = \frac{W_u + W_t}{W_u + W_t + W_i}$	<p>W_u = energia utilă (pentru rupe și creare de suprafețe noi; egală cu s.B.) W_t = energia pentru deformare elastică și transformată în căldură</p>
	<p>Randamentul mecanic:</p> $\eta_m = \frac{W_u + W_t + W_i}{W}$	<p>$W_t - W_u$ = energia termică degajată W_i = energia consumată pentru frecări interne</p>
	<p>Randamentul total:</p> $\eta = \frac{W_u}{W} = \eta_p \cdot \eta_o \cdot \eta_m$	<p>W_c = energia consumată pentru frecări externe (înlagare, angrenaje, etc.)</p>
H. Rose, D. Evans (1956)	<p>Randamentul morii:</p> $\eta = \frac{W_s \cdot \frac{S}{t}}{W}$	<p>W_s = consumul de energie pe unitate de suprafață specifică S = suprafața specifică nou creată t = timpul W = consumul total de putere al morii</p>
H. Kumpf (1968)	<p>Randamentul măcinării fracțiunilor granulare aseptice:</p> $\eta^1 = W_s \cdot \frac{\Delta S}{\Delta W} = k \cdot S$	<p>W_s = energia de suprafață S = suprafața specifică W = consumul specific de energie k = constantă (aptitudinea la mărunțire)</p>
	<p>Randamentul măcinării diferențiale a fracțiunilor granulare:</p> $\eta^2 = W_s \cdot \frac{dS}{dW} = f(S)$	
	<p>Randamentul măcinării colective a fracțiunilor granulare:</p> $\eta_{12} = W_s \cdot \frac{S_2 - S_1}{W} = \frac{S_2 - S_1}{\int_{S_1}^{S_2} f(S) dS}$	
R.S. Charles, J.A. Holmes	<p>Randamentul mecanic:</p> $\eta_m = k \cdot S^n$	<p>k = constantă (experimentală) n = exponent, pozitiv sau negativ (pentru $n=0$ → Rittinger)</p>
Kenneth, Schellinger	<p>Randamentul termodinamic (determinat în laborator):</p> $\eta_t = \frac{W_c - Q}{W_c} \cdot 100$	<p>W_c = cantul de energie cinetică (în kJ) Q = transferul de căldură de la moară (în kJ)</p>

TEORII „CLASICE” ALE MĂRUNTĂȚII

Autorul (anul) Observații	Relații	Notatii
<p><u>Rittinger (1907)</u> Teoria „suprafeței”, confirmată de Gross, Zimmermanley (1930), Kwong (1949), etc.</p>	$W = k_1 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = k_1 \frac{n-1}{D}$ $S = B \cdot W$	<p>W = energie consumată S = suprafața specifică nou creată D, d = dimensiunile granulelor (înainte și după mărunțirea) B = coeficientul de mărire n = $\frac{D}{d}$, raport de reducere k₁ = constantă</p>
<p><u>Kick (1935)</u> Teoria „volumului”, preconizată de Kirpichev (1874).</p>	$W = k_2 \cdot \log \frac{D}{d} = k_2 \cdot \log n$	<p>k₂ = constantă</p>
<p><u>F. Bond (1951)</u> Teoria „a treia”</p>	$W = k_3 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) = k_3 \sqrt{\frac{D-d}{D}}$ $W = W_0 \left(\sqrt{\frac{100}{k_{80}}} - \sqrt{\frac{100}{k_{80f}}} \right)$ $W_i = \frac{k_3}{\sqrt{100}} ; W_e = 10 \cdot W_i \cdot \frac{1}{\sqrt{d}}$ $W_i = \frac{W}{10} \cdot \frac{\sqrt{D} \cdot d}{\sqrt{D} - \sqrt{d}} =$ $= W \cdot \frac{\sqrt{n}}{\sqrt{n} - 1} \cdot \sqrt{\frac{d}{100}}$	<p>k₃, W₀ - constante k_{80f}, k₈₀ - dimensiuni caracteristica ale particulelor, pentru care obține o trecere de 80 printr-o sită dată. W_i - aptitudinea la rupere (work index)</p>
<p><u>R.J. Charles (1957)</u> Relație generală în formă diferențială, sugerată de Walker (1937).</p>	$dW = -C \frac{dx}{x^n}$ <p>Cazuri particulare: n = 2 → Rittinger n = 1 → Kick n = 1,5 → F. Bond</p>	<p>C = constantă x = dimensiunea granulelor n = exponent</p>

**RELATII ÎNTRU ENERGIA CONSUMATĂ
PENTRU MĂLINTIRE ȘI SUPRAFATA SPECIFICĂ,
RESPECTIV DIMENSIUNILE GRANULILOR, ȘI ALTE C.**

Autorul (anul) Observații	Relații	Notații
<u>Schumann (1922)</u> Formula generală	$W = C d^n = k \left(\frac{1}{D_{35,8}} - \frac{1}{D_{50,8}} \right)$	k = constantă C, D = coeficienți caracteristici și funcții repartirii gran.
<u>B. Gule (1952)</u> Aplică metode statistice la formula lui Schumann, pe baza repartiției granu- lulare Rosin-Rammler	$W = k \left(\frac{\sqrt{V_2}}{D_{35,8}} - \frac{\sqrt{V_1}}{D_{50,8}} \right)$	k = constantă. D _{35,8} , D _{50,8} = din caracteristicile or- lor pentru care h și g = constante de v ₁ , v ₂ = rapoartele medii pătra- dimensiunilor c- trice și ocaște c
<u>M. Popadakis (1952)</u> Introduce noțiunea de „aglomerare” opti- mizând relația lui Rittinger la moli tubulare.	$S = (1-A)^{Bc} (S_0 + d) - d$ $B = \alpha d^3; d = \frac{B \cdot W}{k g (1-A)}$ $A = 1 - \frac{1}{e^{\frac{1}{c \cdot D \cdot d^n}}}; \alpha = \frac{\pi \cdot g}{3 \cdot p \cdot n}$	A = aptitudinea la (0 < A < 1) B = aptitudinea k S ₀ = suprafața spec D = diametrul inter- d = diametrul maxi- milor de măci- p = greutatea și tătă a corpu- cinare. n = turatia maxi- mă k = constantă c = constantă
<u>Svensson și alții (1952)</u> Relație bazată pe teoria lui F. Bond.	$W = W_0 \left[\left(\frac{100}{k_m} \right)^{n'} - \left(\frac{100}{k_{mf}} \right)^{n'} \right]$ Caz particular: n' = 0,5; k _m = k ₈₀ → F. Bond	n' = 0,8... 1,3, expo- nent $\log k_m = \frac{1}{2} (\log k_{80} + \log k_{50} + \log k_{30} + \log k_{20})$
<u>Wang (1950)</u> După legea lui Kick	$W = k \cdot \frac{p^2}{r \cdot E} \cdot \frac{(n-1)(n+2)}{n}$	k = factor de prop. P = efortul de com- p. E = greutatea și modulul de e- al materialului n = $\frac{D_2}{D_1}$, raport de
<u>S.A. Halmos (1957)</u> După legea lui Kick și F. Bond.	$W = W_1 \left[1 - \left(\frac{1}{n} \right)^r \right] \cdot \left(\frac{100}{\sigma} \right)^d$ Caz particular: r = 1 → Rittinger	n = raport de re- n = exponent de d = dimensiuni granu- lulare.
<u>Kieserlitt (1957)</u> Relație valabilă la fineză avansată.	$W = k \cdot S^2$	k = constantă
<u>C. Dimitrescu (1955)</u> Formula bazată pe teoria lui Rittinger, fiind scara de aglomerare.	$S = S_2 - (S_2 - S_0) e^{-A \cdot W}$	S ₂ = suprafața spec- limită (maximă) A = aptitudine la S ₀ = suprafața spec-

RELATII ENERGETICE PRIVIND MARUNTISEA.

Autorul (anul) Observatii	Relatia	Notatii
<p><u>Griffith (1921)</u> Ca rezultat al for- telor exterioare, ener- gia de deformare ela- stica (W_e) se transforma in energie libera de suprafata (W_s).</p>	$\frac{\partial W_e}{\partial l} \geq \frac{\partial W_s}{\partial l}$ <p>1) $l > l_G \rightarrow$ fisura se propaga 2) $l < l_G \rightarrow$ fisura discontina 3) $l = l_G \rightarrow$ fisura incipienta</p>	<p>l = lungimea fisurii (la egalitatea relatiei devine "Griffith")</p>
<p><u>H. Dugoff (1932)</u></p>	$\Sigma W = 2W_s + \frac{\partial W_e}{\partial l}$	<p>ΣW = energia de extindere a fisurii (suma a energiei absorbite dezvoltate prin tensiunile interne in puncte cu defecte si a energiilor reactiilor chimice) W_e = energia cinetica l = lungimea fisurii</p>
<p><u>Mihocuzhian (1955)</u> Teoria termodinamica confirmata de incercarile lui Mittag (1953), Rebat, Lungemann (1955)</p>	$W_c + W_i = N \cdot Q$	<p>W_c = energia cinetica W_i = energia corespun- zatoare caldurii interne. Q = caldura produsă prin maruntire N = conducta termodinami- ca a maruntitului</p>
<p><u>Curry și Stribanov (1962)</u> Teoria "liberei marun- tiri."</p>	$W_{op} - W_{oa} = W_{cm} \cdot \eta_m$	<p>W_{op} = energia asociata produsului. W_{oa} = energia asociata alimentarii. W_{cm} = energia consumata de moara. η_m = randamentul me- canic al moarii.</p>

tabelul 6), Escudero Sains, Rebinder, Tatsuo Tanaka, ș.a. Astfel, Escudero Sains (21) încearcă să combine ponderat legile lui Wittinger și Kick-Kirpicev, în relație :

$$w = k_1 \left(\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \right) + k_2 \lg \frac{S_2}{S_1} \quad (2)$$

unde k_1 și k_2 sînt constante care depind de natura materialului.

Rebinder (22-27) consideră ca lege generală a mărunțirii o relație de bază a teoriei generale a dispersării și anume :

$$w_{sp} = w_1 + n \cdot k_{21} \frac{\sqrt{R}}{2E} + k_{22} \cdot \Delta S \cdot \alpha \quad (3)$$

în care :

- w_{sp} = consumul specific de energie pentru mărunțire (daN m/cm²);
- w_1 = consumul "propriu" de energie al ut. lajului de mărunțire;
- n = numărul de cicluri de deformare a materialului pînă la mărunțire;
- k_{21}, k_{22} = coeficienți de proporționalitate;
- \sqrt{R} = rezistența la rupere care condiționează procesul (daN/cm²);
- E = modulul de elasticitate al materialului ;
- ΔS = suprafața specifică nou creată (cm²/cm³) ;
- $\alpha = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^n$ gradul de dispersie al mărunțirii ;
- S_1, S_2 = suprafețe particulelor înainte și după mărunțire;
- n = exponent care depinde de condițiile mărunțirii (pentru mărunțire fină $n > 0$).

Pornind de la formula lui Charles, Tatsuo Tanaka (25)

propune relația probabilistică :

$$\frac{dS}{dN} = c_1 d^\alpha = k \cdot P_c \cdot P_r \cdot P_a \cdot d^\alpha \quad (4)$$

unde :

c_1, α, k = constante ;

P_c = probabilitatea ciocnirii particulelor ;

P_r = probabilitatea depășirii rezistenței de
rupere ;

P_a = probabilitatea propagării fisurii ;

d = dimensiunea medie a particulelor.

În sfârșit, o relație asemănătoare ca formă cu cea calorimetrică, propune Wittag (24):

$$W = G \cdot \bar{V}_m \cdot d \quad (5)$$

în care :

G = cantitatea materialului mărunțit ;

\bar{V}_m = rezistență specifică medie de mărunțire ;

d = dimensiunea medie finală a granulelor.

Teoriile energetice privind mărunțirea (v. tabelul 7) nu elucidază suficient condițiile propagării fisurii, mecanismele de solicitare, energiile mecanice și nemecanice ce intervin în proces, etc. În legătură cu energia de suprafață, însăși această noțiune - care e valabilă și măsurabilă în lichide - nu este pentru solide decât o mărime extrapolată făcând apel la legăturile ionice nesaturate care, la limite solid-aer, produc tensiuni de suprafață. O serie de cercetători s-au străduit să calculeze și să determine experimental (16), pe cale fizică, valorile acestei energii de suprafață pentru diverse materiale, însă diferanțele obținute sînt de două ordine de mărime, ceea ce probează că studiul teoretic este în

această direcție încă departe de realitate.

V. STUDIUL PARAMETRILOR TEHNICI CARE CARACTERIZEAZĂ COMPORTAREA MATERIALILOR LA MĂRUNȚIRE

1. Caracterizarea generală și clasificare

Complexitatea fenomenului ruperii solidelor, în care intervin numeroși factori legați atât de proprietățile lor macroscopice cât și de cele de structură, a făcut ca mulți cercetători să se orienteze către definirea unor caracteristici noi ale materialelor, legate direct de specificul operației de mărunțire. Încă din 1972, Kumpf (26) a făcut propunerea de a se aduna toți parametrii specifici ai materialelor, din punct de vedere al tehnicii fragmentării, într-un atlas similar cu cel existent pentru proprietățile termomecanice, astfel ca pentru orice nou material să fie posibilă caracterizarea comportării sale pe baza unui număr mic de probe de laborator. Cu toate că au existat o serie de încercări pe această linie, cercetătorii din acest domeniu nu au reușit încă să se pună de comun acord asupra acestor parametri, pe de o parte datorită insuficienței datelor experimentale, iar pe de altă parte datorită modului diferit de abordare a problemei.

Din multitudinea acestor încercări se desprinde cea realizată de Haese, care suscită și ea unele controverse și discuții, dar care se pare că este cea mai completă clasificare făcută pînă în prezent. După Haese (27), parametrii tehnici care caracterizează comportarea materialelor la mărunțire sînt :

- mărimi care se pot determina prin mărunțirea materialelor în condiții determinate și anume : efortul specific de rupere, probabilitatea de rupere, funcția granulometrică, energia specifică

de mărunțire, aptitudinea la aglomerare, creșterea suprafeței specifice, eficiența fragmentării;

- mărimi care se determină cu aparate de încercare în laborator, în condiții prescrise, cum sînt aptitudinea la măcinare și gradul de concentrare.

Clasificarea citată este susceptibilă de obiecțiuni, în special deoarece reflectă concepția conform căreia aptitudinea la măcinare determinată în laborator poate fi tratată ca o mărime caracteristică independentă, cu valoare absolută, în timp ce o analiză mai aprofundată a acestui parametru conduce la necesitatea de a se stabili și modul în care el se corelează cu performanțele utilajelor industriale care urmează să se dimensioneze pe baza lui. Totuși, lista propusă de măsuri cuprinde toate caracteristicile importante din punct de vedere al tehnicii mărunțirii, astfel că ea poate constitui o bază de orientare asupra problematicii respective, cu observația că gradul de concentrare nu prezintă interes imediat în domeniul măcinării din industria cimentului.

Pe de altă parte trebuie subliniat faptul că Kumpf (26) a subliniat cu hotărîre faptul că baza aprofundării proceselor de mărunțire o constituie studiul mărunțirii granulelor individuale.

Avînd în vedere aceste considerații, și autorul a început cercetările sale prin efectuarea unui studiu asupra comportării granulelor individuale de clincher la diferite solicitări mecanice (compresiune lentă și șoc dinamic).

2. Studiul comportării granulelor individuale de clincher la compresiune lentă

2.1. Noțiunea de mărunțire a unor granule individuale de clincher definește solicitarea la compresiune (sau șoc dinamic)

și din rugozitatea particulelor care nu se inducționează reciproc. De
urmă, în cursul solicitării granulelor individuale nu intervin
pierderi de energie datorată frecării dintre particole, mărunțirea
granulei individuale consumând cantitatea minimă de energie,
cantitate reprezentând limite maximă, teoretică, până la care se
poate acționa pentru reducerea energiei electrice la mărunțire.

În industrie, acest gen de solicitare se realizează în
concasoare și mori cu valțuri - la măcinarea grosieră - și în mori
cu impact - la mărunțirea fină a materialelor.

2.2. Prin concursivitatea lentă se definește solicitatea la
care viteza de avans a platoului precel este cel mult de ordinul
centimetrilor pe secundă.

2.3. Materiai folosite. Pentru studiul comportării granu-
lilor individuale de clincher la compresiune lentă s-au folosit
două tipuri de clincher :

- clincher tip I - un clincher portland normal (de la I.L.
Levo)
- clincher tip II - un clincher ferroportland, de tip Ferreri
(de la C.L.A. Medgidia)

Compoziția chimică oxidică - exprimată prin moduli - pre-
cum și cea mineralogică - determinată prin microscopie optică și
analiză röntgenografică - pentru cele două tipuri de clinchere
folosite, sînt prezentate în tabelul 8.

Tabelul nr. 8

Compoziția chimică	Clincher I	Clincher II
M_{Si}	1,65	1,90
M_{Al}	2,03	0,88
S_k	98,28	95,65

Compoziția mineralogică		
C_{3S}	60 - 65	50 - 55
C_{2S}	10	20 - 25
C_3A	15	5
C_4AF	10	15 - 20

2.4. Aparatura utilizată. Pentru solicitarea granulelor individuale de clincher la compresiune lentă s-a utilizat o presă tip 10/90, caracterizată printr-o rigiditate avansată, presă acționată de un electroacuator de 0,5 kVa, cu turația reglabilă. Experimentările s-au executat la viteza minimă de rotație a platoului, respectiv de 1 mm/min.

2.5. Mod de lucru. Încercările la compresiune lentă s-au făcut pe granule individuale de clincher, având diametrul cuprins între 1 mm și 7 mm. Pentru fiecare din aceste dimensiuni s-au făcut încercări pe câte 50 de granule individuale. Granulele de clincher au fost spălate cu etanol, uscate în etuvă la 50°C, cin-

tărite și supuse la compresiune. După sfărâmare, s-a ales de fiecare dată (cu ajutorul unei sterolipse), fragmentul cel mai mare, care, apoi, s-a spălat cu metanol, s-a uscat în etuvă la 50°C și s-a cântărit.

2.6. Rezultatele obținute. În urma încercărilor la compresiune lentă a granulelor individuale de clincher s-au obținut seturi de date pe baza cărora s-au analizat și stabilit următoarele corelații :

- corelația dintre forța de sfărâmare, diametrul granulei și raportul de reducere :

$$F = f_1(d, i)$$

- corelația dintre energia specifică de mărunțire, diametrul granulei și raportul de reducere :

$$w = f_2(d, i)$$

2.6.1. Noțiuni folosite

a) Pentru mase :

- M_1 = masă inițială a granulei de clincher, (g)
- M_2 = masă celei mai mari fracțiuni rezultate în urma sfărâmării granulei de masă M_1 , (g) ;
- M^0 = masă granulei "bază de raportare", luată convențional, ca fiind masă minimă din setul de date luate în considerare, (g) ;

b) Pentru diametre :

- d_1 = diametrul inițial, al granulei de clincher de masă M_1 (mm) ;
- d_2 = diametrul corespunzător fracțiunii de masă M_2 (mm) ;

✓.

d^m = diametrul granulei "bază de raportare", co-
rrespondent granulei de masă m^m , (mm) ;

e) Pentru celelalte mărimi principale :

F = forța de sfărîmare, reprezentînd forța la care
se realizează sfărîmarea primară a granulei,"
(N) ;

l = deplasarea platanului preseii, corespunzător
forței de sfărîmare F, (mm) ;

d) Pentru celelalte mărimi, cerivate, obținute prin cal-
cul :

i = raportul de reducere, definit de raportul din-
tre diametrul inițial al granulei și diametrul
frecțiunii celei mai mari, rezultate în urma
sfărîmării primare :

$$i = \frac{d_1}{d_2} \quad (6)$$

i' = "diametrul adimensional", definit de raportul
de similitudine geometrică între diametrul ini-
țial al granulei de clincher și diametrul gra-
nulei "bază de raportare" :

$$i' = \frac{d_1}{d^m} \quad (7)$$

w = energie specifică de mărunțire a fiecărei grana

$$w = 1,4 \cdot 10^{-2} \frac{F \cdot l}{m^m} \quad (\text{mm}^2/\text{g}) \quad (8)$$

2.6.2. Dispersiunea sphaerilor. Abaterile care influențează
procesul, generînd un cîmp relativ întins de împrăștiere a resul-
tatelor sînt neuniformitatea geometrică a granulelor și variația

densității acestora.

Pentru eliminarea distorsiunilor introduse de forma geometrică s-au ales pentru determinare granule apropiate de formă de sferă, iar pentru eliminarea erorilor introduse de variația densității, raportul de reducere i a fost calculat ca raport al maselor granulei inițiale, respectiv al celei noi mari fracțiunii rezultate după sfârșire (considerându-se că în interiorul granulei densitatea ei este constantă):

$$i = \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{M_1}{\pi \cdot \rho} \cdot \frac{\pi \cdot \rho}{4M_2} \right)^{1/3} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{1/3} \quad (6')$$

Pentru eliminarea abaterilor introduse de variația "pe verticală" (cel mai importantă), s-a recurs la un "diametru adimensional", un raport de similitudine geometrică, calculat după relația :

$$i' = \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{1/3} \quad (7')$$

Pentru mărirea preciziei de observare și ordonare a datelor s-a recurs la intervale de grupări mici. În scopul alegerii optime a intervalului de grupare după diametrul granulei, s-a folosit formula lui H.D. Sturges :

$$k = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,322 \lg N} \quad (9)$$

unde :

k = mărimea intervalului de grupare (mm);

x_{\max} = mărimea maximă a variabilei de grupare ($x_{\max} = 7\text{mm}$);

x_{\min} = mărimea minimă a variabilei de grupare ($x_{\min} = 1\text{mm}$);

N = număr de valori (deja pentru fiecare lot)

./.

Înlocuindu-se datele în relația (9) se obține $k = 1,01$ mm. S-a ales $k = 1,0$ mm, aceasta fiind și diferența dintre dimensiunile a două ciururi consecutive folosite la sortare.

2.6.3. Stabilirea corelației dintre forța de sfărâmare, diametrul granulei și raportul de reducere. Plecându-se de la considerentele precedente (v. pct. 2.6.2), în locul relației

$$F = f(d, i)$$

s-a căutat o relație de forma :

$$F = f(i^0, 1)$$

S-au obținut relații pentru următoarele valori (considerate fixe și caracterizând sfărâmarea primară) ale raportului de reducere : $i_1 = 1,1$; $i_2 = 1,2$; $i_3 = 1,3$; $i_4 = 1,4$; $i_5 = 1,5$ și $i_6 = 1,6$.

În cazul grupărilor după aceste valori ale raportului de reducere, variația acestuia (calculată după coeficientul de variație v_1) a fost sub 20 %, generând grupări cu grad de omogenitate ridicat.

Pentru calculul de regresie multiplă, avându-se în vedere că fenomenul este, prin esența sa stohastic, s-a căutat eliminarea factorului aleator prin medierea valorilor forței de sfărâmare pentru aceeași viteză sau pentru valori apropiate ale "diametrului dimensional" i^0 . În cazul abaterilor granulare, perechile respective de puncte au fost eliminate prin metoda statistico-matematică, cu creșterea corespunzătoare a coeficientului de regresie.

Pentru punerea în evidență a factorului sistematic necesar în procesul studiat, valorilor mediate ale forței de sfărâmare și ale "diametrului dimensional" i^0 li s-a atribuit frecvența de

de apariție f .

Rezultatele obținute în cadrul încercărilor efectuate pe cele două tipuri de clinchere sînt prezentate în tabelele 9-10 și în figurile 2-3.

Se constată, în cazul clincherului de tip I că, pe intervalul studiat, variația forței de sfărîmare funcție de "diametrul sdimensional" (pentru fiecare raport de reducere) relevă, din punct de vedere structural, o ușoară dar sistematică regiune de inflexiune. Din punct de vedere analitic se impune constatarea că variația se poate încadra, cu o foarte bună aproximație, într-o formulă de tipul :

$$y = ax^b$$

Pentru clincherul de tip II, la observațiile de mai sus se adaugă că intervalul de variație al "diametrului sdimensional" este mai mare și, ca urmare, se accentuează regiunea de inflexiune.

Colocîndu-se datele din tabelele 9 și 10 și aplicînd metoda celor mai mici pătrate, se obțin rezultatele din tabelul 11.

Pentru a exprime variația forței de sfărîmare s-a propus, aflat și verificat forma

$$F_1 = a(l^0)^b$$

./.

Tabelul nr.11

Raportul de reducere	Clincher tip I		Clincher tip II	
	Expresia analitică a forței de sfărîmare, F	Coeficient de corelație(%)	Expresia analitică a forței de sfărîmare, F	Coeficient de corelație(%)
1,1	$F=157,04(1')^{1,19}$	97,87	$F=97,40(1')^{1,08}$	96,71
1,2	$F=150,53(1')^{1,49}$	98,36	$F=84,60(1')^{1,27}$	98,78
1,3	$F=128,21(1')^{1,61}$	99,21	$F=108,70(1')^{1,17}$	98,57
1,4	$F=125,69(1')^{1,64}$	98,34	$F=35,40(1')^{1,20}$	97,02
1,2	$F=124,55(1')^{1,78}$	98,75	$F=117,20(1')^{1,40}$	98,46
1,6	$F=124,57(1')^{2,05}$	99,40	$F=106,80(1')^{1,77}$	99,90

Analizîndu-se datele referitoare la clincherul de tip I se remarcă creșterea parametrilor a și b odată cu creșterea raportului de reducere i. Prin corelarea acestor parametri cu valorile corespunzătoare ale raportului de reducere i, prin același calcul de regresie se obține forma generală a variației forței de sfărîmare cu raportul de reducere și "diametrul sferic":

$$F = 130(1)^{-0,25}(1')^{1,11(1)^{1,25}} \quad (H) \quad (10)$$

Avîndu-se în vedere faptul că pentru granula "basă de

Tabel centralizator cuștină și varianta parametrilor F, i' și d
la diferite valori ale lui i - clincher

Nr. cr.	i = 1,1			i = 1,2			i = 1,3			i = 1,4			i = 1,5			i = 1,6						
	F	i'	d	F	i'	d	F	i'	d	F	i'	d	F	i'	d	F	i'	d				
-	[N]	-	[mm]	[N]	-	[mm]	[N]	-	[mm]	[N]	-	[mm]	[N]	-	[mm]	[N]	-	[mm]				
1	180	1,10	2,00	195,6	1,10	2,00	150	1,10	2,00	5	151	1,10	2,00	5	160	1,10	2,00	5	120	1,00	1,82	1
2	175	1,76	3,20	205	1,41	2,57	219,9	1,43	2,60	4	230,6	1,45	2,70	Ø	210	1,40	2,55	3	255	1,35	2,48	2
3	490	2,60	4,73	350	1,80	3,28	245	1,53	2,79	2	447,7	2,14	3,90	13	220	1,50	2,73	4	263	1,45	2,64	3
4	570	2,72	4,95	480	2,41	4,39	287	1,74	3,17	2	574	2,60	4,73	5	280	1,60	3,91	1	430	1,66	3,39	1
5	600	3,23	5,88	465	2,81	5,12	320	1,80	3,28	3	600	2,70	4,92	2	370	1,80	3,28	4				
6				545	3,35	6,10	550	2,55	4,64	6	910	3,20	5,83	2	575	2,40	4,37	2				
7							600	2,65	4,83	6					660	2,52	4,59	1				
8										2					720	2,62	4,77	5				
9															790	2,74	4,99	4				
10																						

la diferite valori ale lui λ - clincher II

Nr. ord.	$\lambda = 1,1$			$\lambda = 1,2$			$\lambda = 1,3$			$\lambda = 1,4$			$\lambda = 1,5$			$\lambda = 1,6$		
	F [N]	λ'	d [mm]	F [N]	λ'	d [mm]	F [N]	λ'	d [mm]	F [N]	λ'	d [mm]	F [N]	λ'	d [mm]	F [N]	λ'	d [mm]
1	195	1,60	2,77	295,33	1,18	1,74	295,33	1,1	1,62	112	1,1	1,62	136	1,1	1,62	130	1,15	1,63
2	290	2,97	4,37	180	1,76	2,59	236	1,65	2,43	5	1,2	1,77	236	1,75	2,58	150	1,2	1,77
3	330	4,07	6,00	155	1,85	2,73	210	1,6	2,65	2	1,75	2,58	300	1,93	2,84	270	1,67	2,46
4				232	2,08	3,06	278	2,15	3,168	6	2,12	3,12	363	2,1	3,09	1050	3,65	5,38
5				312	3	4,42	389	3	4,42	8	3	4,42	500	3,1	4,57			
6				432	3,8	5,60	440	3,6	5,3	2	3,4	5,01	620	3,6	5,3			
7				445	4	5,89	542	4	5,39	8	3,54	5,22	1250	4,3	6,3			
8				570	4,1	6,04					3,7	5,45	486					
9				600	4,1	6,50					3,85	5,67	580					
10											4,1	6,04	583					
11											4,3	6,34	355					

Fig.2. Variația parametrilor F , i' și d la diferite valori ale lui i - clincher I

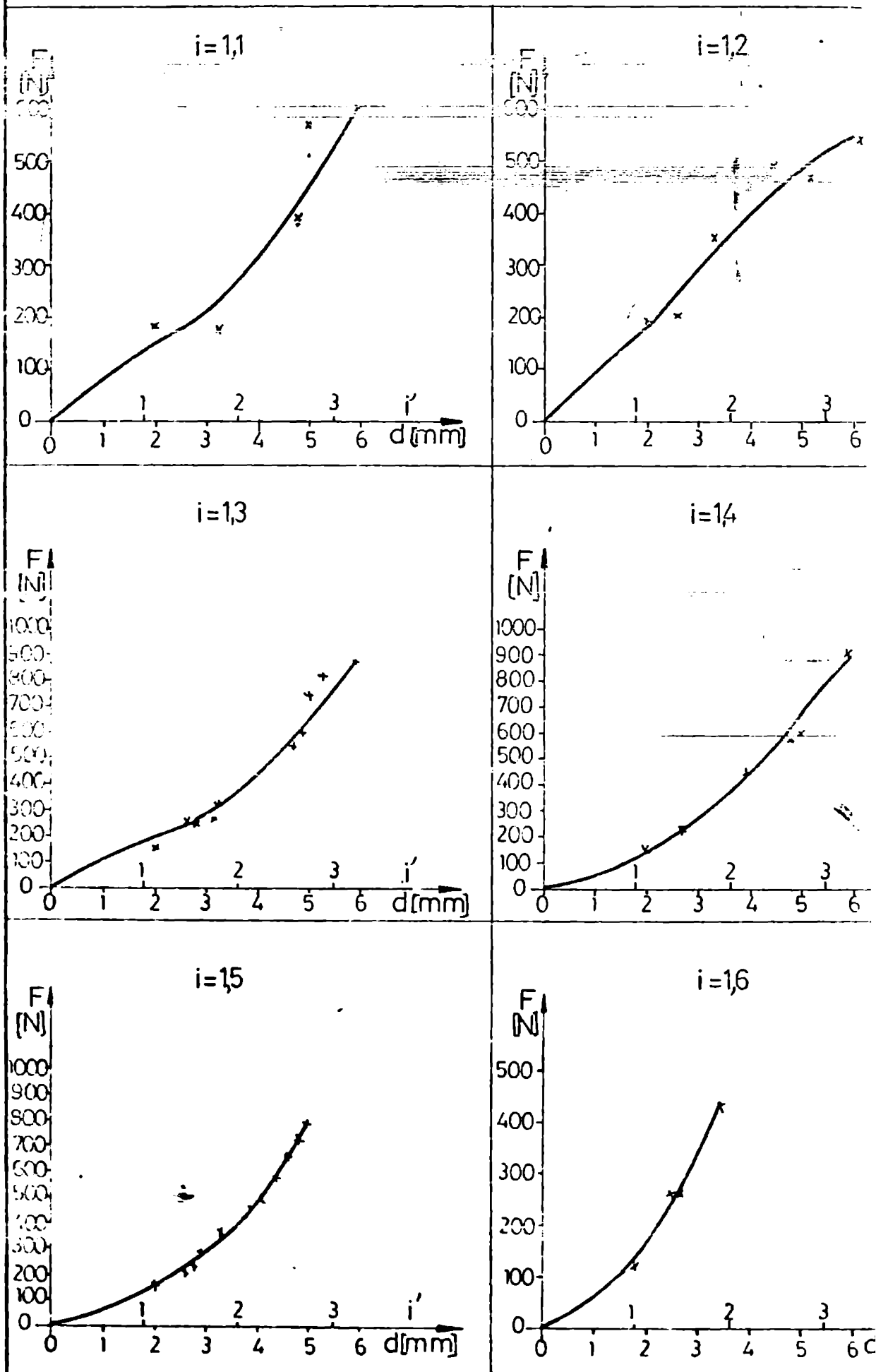
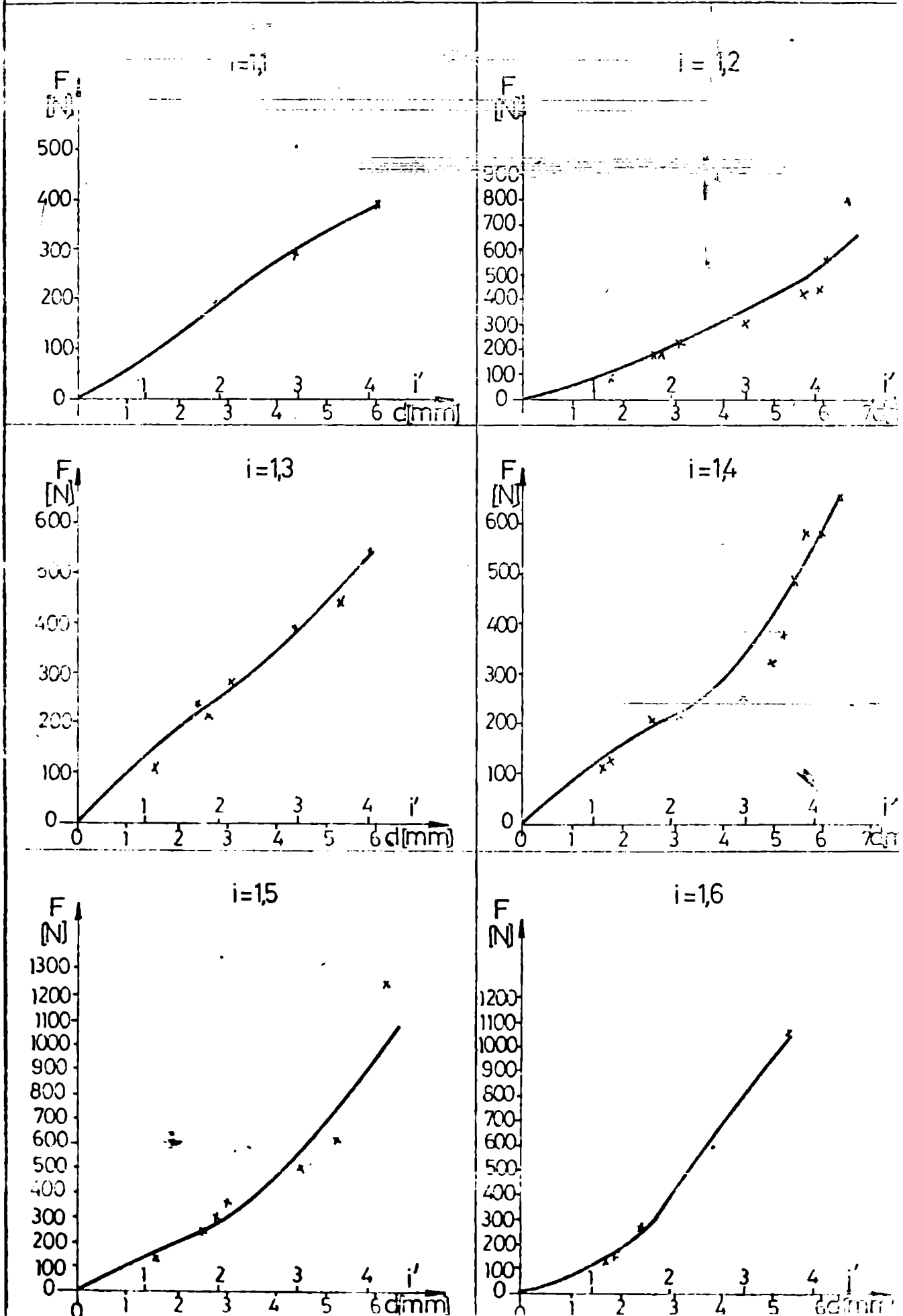


Fig. 3. Variația parametrilor F, i' și d la diferite valori ale lui i - clincher II'



raportare" $F^{\text{II}} = 120 \text{ N}$ și $i^{\text{II}} = 1,6$ și efectuându-se calculele respective se obține forma generalizată de variație a forței de afirare :

$$\frac{F}{F^{\text{II}}} = \left(\frac{i}{i^{\text{II}}} \right)^{-0,25} \left(\frac{d}{d^{\text{II}}} \right)^{1,56} \left(\frac{1}{i^{\text{II}}} \right)^{1,25} \quad (11)$$

Procedându-se în mod similar cu clincherul de tip II se obține forma generală de variație :

$$F = 62,7 (i)^{0,67} (d)^{0,98} (1/i)^{0,74} \quad (12)$$

Aplicându-se și în acest caz datele referitoare la granulele "bază de raportare", respectiv $F^{\text{II}} = 110 \text{ N}$ și $i^{\text{II}} = 1,5$ și efectuându-se calculele respective se obține forma generalizată pentru acest tip de clincher :

$$\left(\frac{F}{F^{\text{II}}} \right) = \left(\frac{i}{i^{\text{II}}} \right)^{0,67} \left(\frac{d}{d^{\text{II}}} \right)^{1,2} \left(\frac{1}{i^{\text{II}}} \right)^{0,75} \quad (13)$$

Cu aceste relații se pot construi nomenclure, în coordonate logaritmice, pe ordonată fiind $\frac{F}{F^{\text{II}}}$ iar pe abscisă $i' = \frac{d}{d^{\text{II}}}$ obținându-se drepte cu ordonata la origine și panta funcție de raportul $(1/i^{\text{II}})$ (v. fig. 4-5).

Suprafețele $\frac{F}{F^{\text{II}}} = f \left[\left(\frac{i}{i^{\text{II}}} \right), \left(\frac{d}{d^{\text{II}}} \right) \right]$ obținute în urma încercărilor pe cele două tipuri de clincher sînt prezentate în fig. 6-7. Aceste suprafețe au fost trasate pe baza analizei datelor experimentale prin metoda celor mici pătrate.

Concluzionându-se cele prezentate, înă secum se poate da o relație de similitudine generală care să permită calcularea forței de afirare, pentru un tip oarecare de clincher, în funcție de diametrul granulei și de raportul de reducere, plecînd de

La niște date cunoscute :

$$\left(\frac{F}{F^0}\right) = \left(\frac{l}{l^0}\right)^n \cdot \left(\frac{d}{d^0}\right)^p \cdot \left(\frac{1}{1^0}\right)^p \quad (14)$$

unde :

$\frac{F}{F^0}$ = raport de similitudine al forțelor de sfărâmare ;

$\frac{l}{l^0}$ = raport de similitudine al raportelor de reducere;

$\frac{d}{d^0}$ = raport de similitudine geometrică ;

n, n, p = puteri ale raportelor de similitudine, depinzând de tipul de clincher utilizat. În cazul celor două tipuri de clincher utilizate, valorile acestora sînt prezentate în tabelul nr.12.

Tabelul nr.12

Clincher tip I		Clincher tip II	
n = 0,25	n = 0,67		
n = 1,36	n = 1,20		
p = 1,25	p = 0,75		

2.6.4. Variația energiei specifice de mărunțire funcție de dimensiunea granulată și de raportul de reducere. Energia specifică de mărunțire s-a calculat cu formula (8), observînd că la sfărîmarea, variația forței F este foarte rapidă, caiar în condițiile deplasării extreme de lente a porsonului preseii (1 mm/min). Ca urmare nu se poate face planimetrarea suprafeței integralei

$$W = \int_0^l \frac{F}{l} dl$$

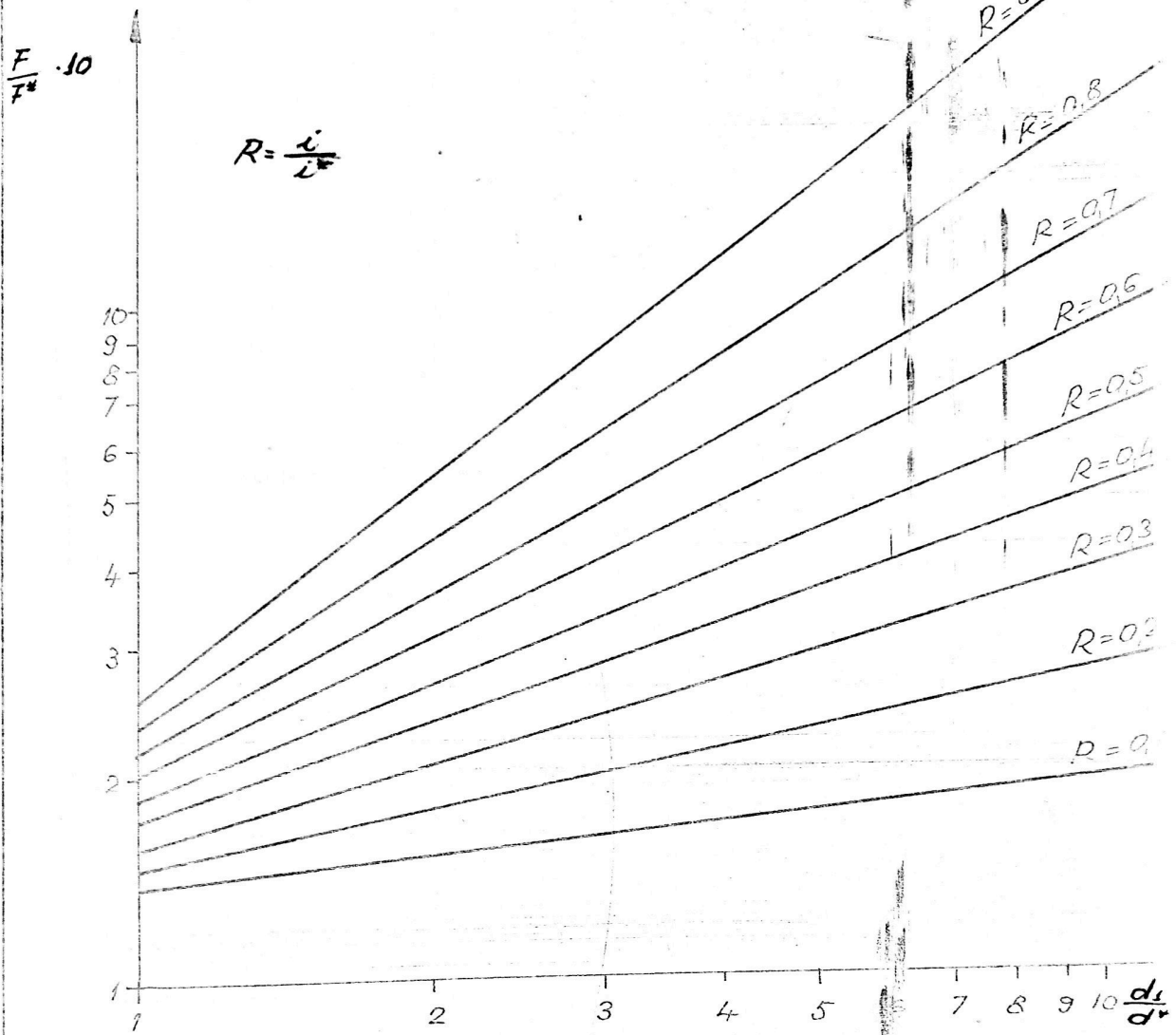
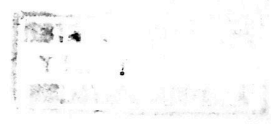


Fig. 4 - Nomogramă pentru determinarea
forței de sfărîmarea pe baza
similitudinii (chîncher \bar{I})



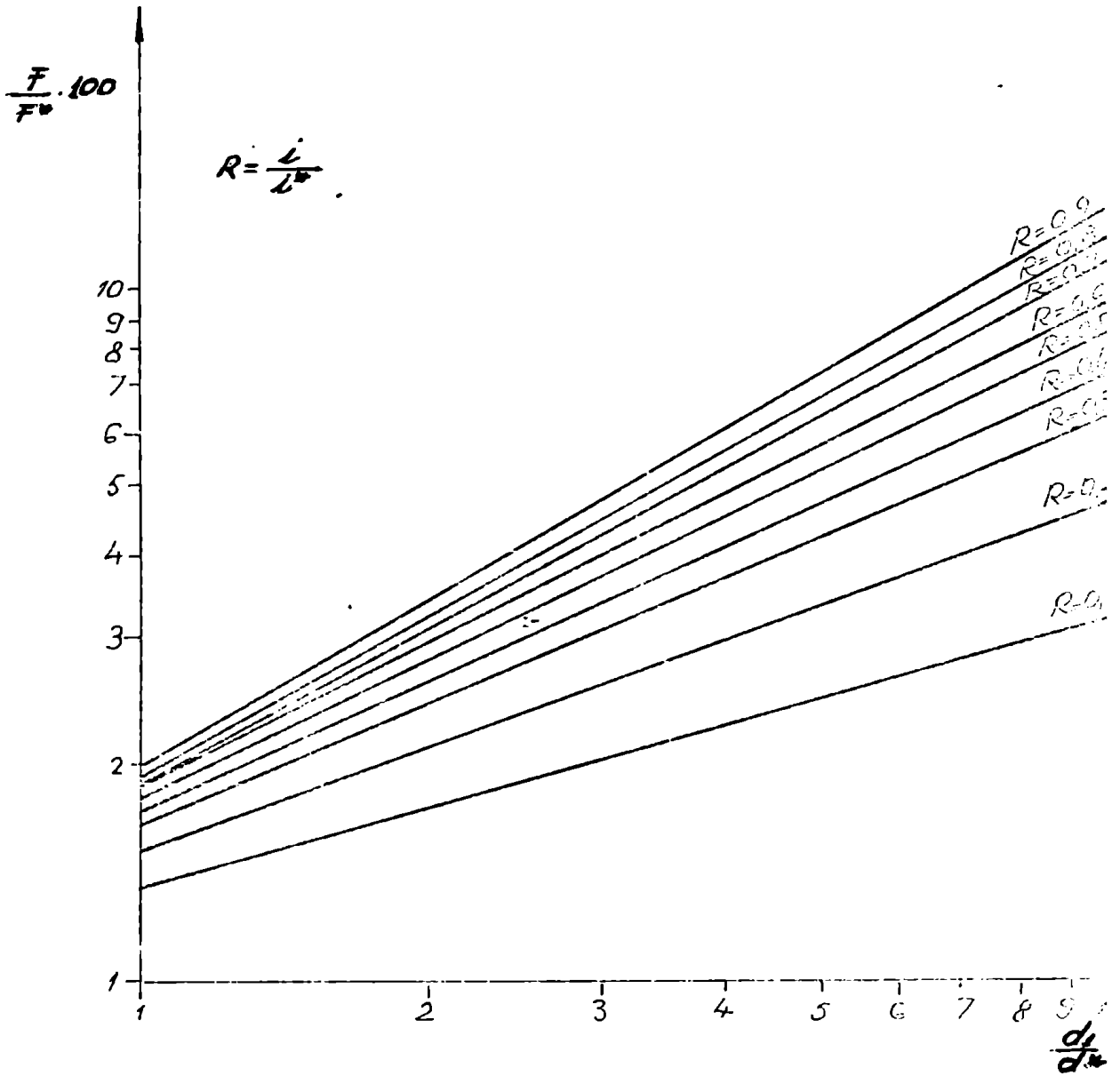


Fig 5. Nomogramă pt. determinarea
forței de sfărîmare pe la
sîntitudinii (chîncher II)

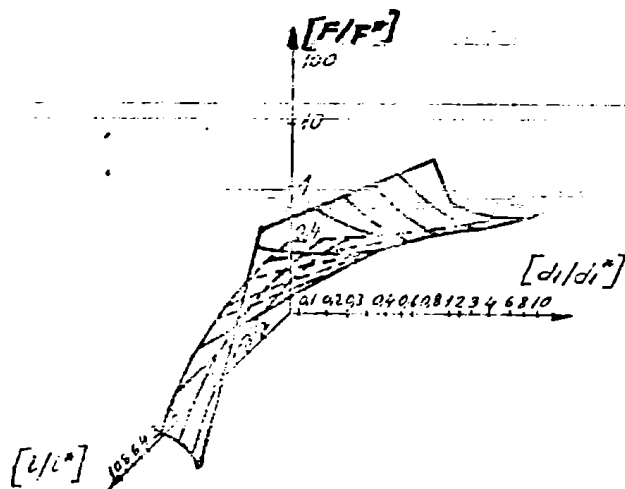


Fig. 6 - Reprezentarea suprafeței
 $\frac{F}{F^*} = f\left(\frac{l}{l^*}, \frac{d_1}{d_1^*}\right)$ - clincher I

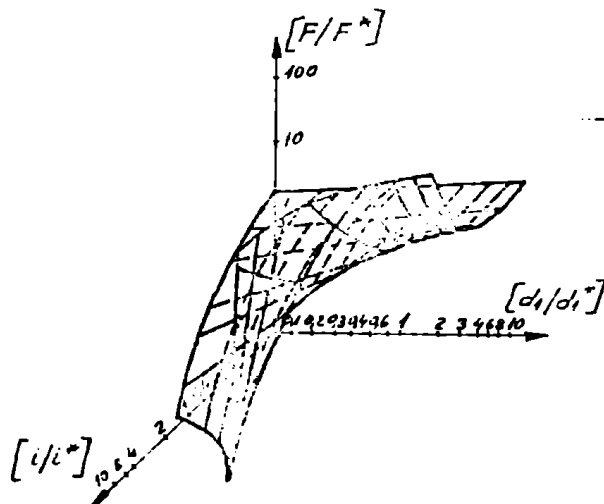


Fig. 7 - Reprezentarea suprafeței
 $\frac{F}{F^*} = f\left(\frac{l}{l^*}, \frac{d_1}{d_1^*}\right)$ - clincher II

ei se ia, cu o bună aproximație, suprafața egală cu cea a unui triunghi având bază egală cu l și înălțimea cu F .

Pe baza datelor obținute (v.fig.8-9) se pot face următoarele constatări :

- energia specifică de mărunțire este dependentă de diametrul granulei, scăzând puternic cu creșterea acestuia și tinzând spre o aplatizare la valori mari ale diametrului ;

- variația energiei specifice de mărunțire cu raportul de reducere este mai puțin pronunțată, observându-se totuși o accentuare a curbării și o creștere importantă a valorilor energiei specifice de mărunțire în domeniul diametrelor mici, cu creșterea raportului de reducere. În domeniul diametrelor mari (6-7)mm, energia specifică de mărunțire, pentru fiecare raport de reducere este sensibil constantă ;

- variația densității eliocherului induce doar o variație în structura fină a corelației energiei specifice de mărunțire cu diametrul granulei.

2.6. j. Concluzii la studiul comportării granulelor individuale de clincher la compresiune lentă. Pe baza experimentărilor efectuate se pot trage următoarele concluzii :

- forța de sfărâmare depinde în mod hotărâtor de mărimea granulei, variație ce dă sensul general al curbei ce descrie fenomenul și de raportul de reducere, care dă panta generală a curbei, eventualele puncte de inflexiune - structura fină a variației - putând fi puse pe seama variațiilor de densitate în interiorul actului de încărcări;

- energia specifică de mărunțire este strâns legată de dimensiunea granulei, crescând puternic odată cu scăderea acesteia.

Influența raportului de reducere asupra valorii energiei specifice de mărunțire este mai pronunțată în deceniul dimensiunilor granulare mici.

3. Studiul comportării granulelor individuale de clincher la șoc dinamic

3.1. Pentru studiul comportării granulelor individuale de clincher la șoc dinamic s-au folosit nouă tipuri de clincher scopind practic întreaga gamă de clinchere fabricate în România (v. tabelul 13).

Tabelul nr. 13

Nr. crt.	Tipul clincherului	Compoziția chimică				Caracteristicii modulare		
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	M _{Si}	M _{Al}	g _k
-	-	%	%	%	%	-	-	%
1.	Clincher tip I (Tg. Jiu I)	21,23	6,20	6,71	65,78	1,63	0,94	92,98
2.	Clincher tip II (Tg. Jiu II)	20,69	6,44	7,89	64,98	1,44	0,82	92,12
3.	Clincher tip III (Tg. Jiu III)	20,22	6,57	6,85	66,36	1,51	0,96	95,68
4.	Clincher tip IV (Tg. Jiu)	19,19	6,27	9,86	64,68	1,19	0,64	97,78
5.	Clincher tip V (Alced)	22,55	4,82	5,70	66,93	2,14	0,85	92,40
6.	Clincher tip VI (Leva)	22,16	6,73	3,81	67,30	2,10	1,77	95,32
7.	Clincher tip VII (Fieni C 1-2)	20,15	7,57	3,73	68,55	1,78	2,03	101,8
8.	Clincher tip VIII (Fieni C7)	20,03	7,06	4,61	67,48	1,61	1,70	99,22
9.	Clincher tip IX (Medi 019)	21,14	5,42	4,78	68,66	1,73	0,89	95,36

Fig. 8 Variația parametrilor w, i și d la diferite valori ale lui i - clincher-I -

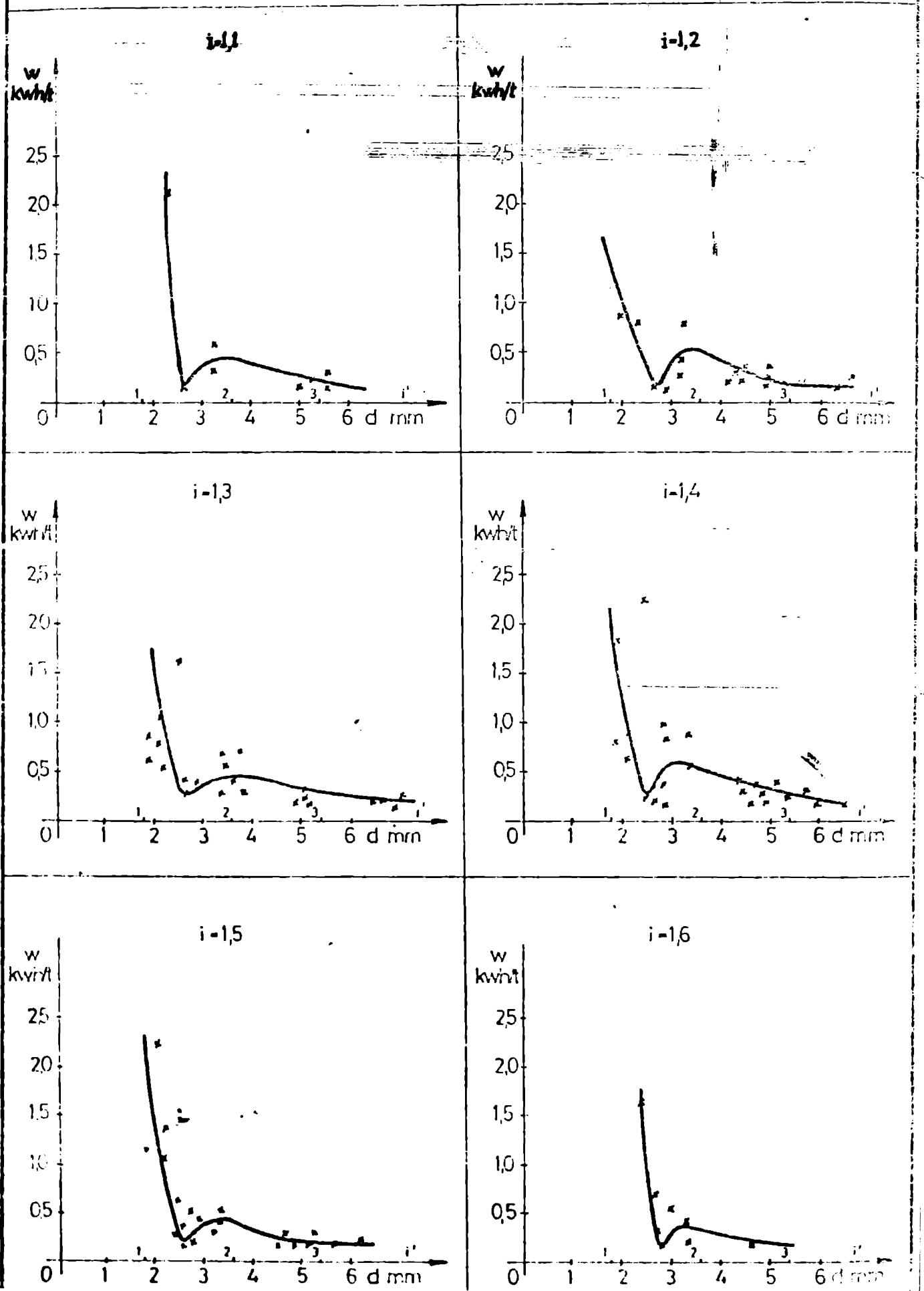
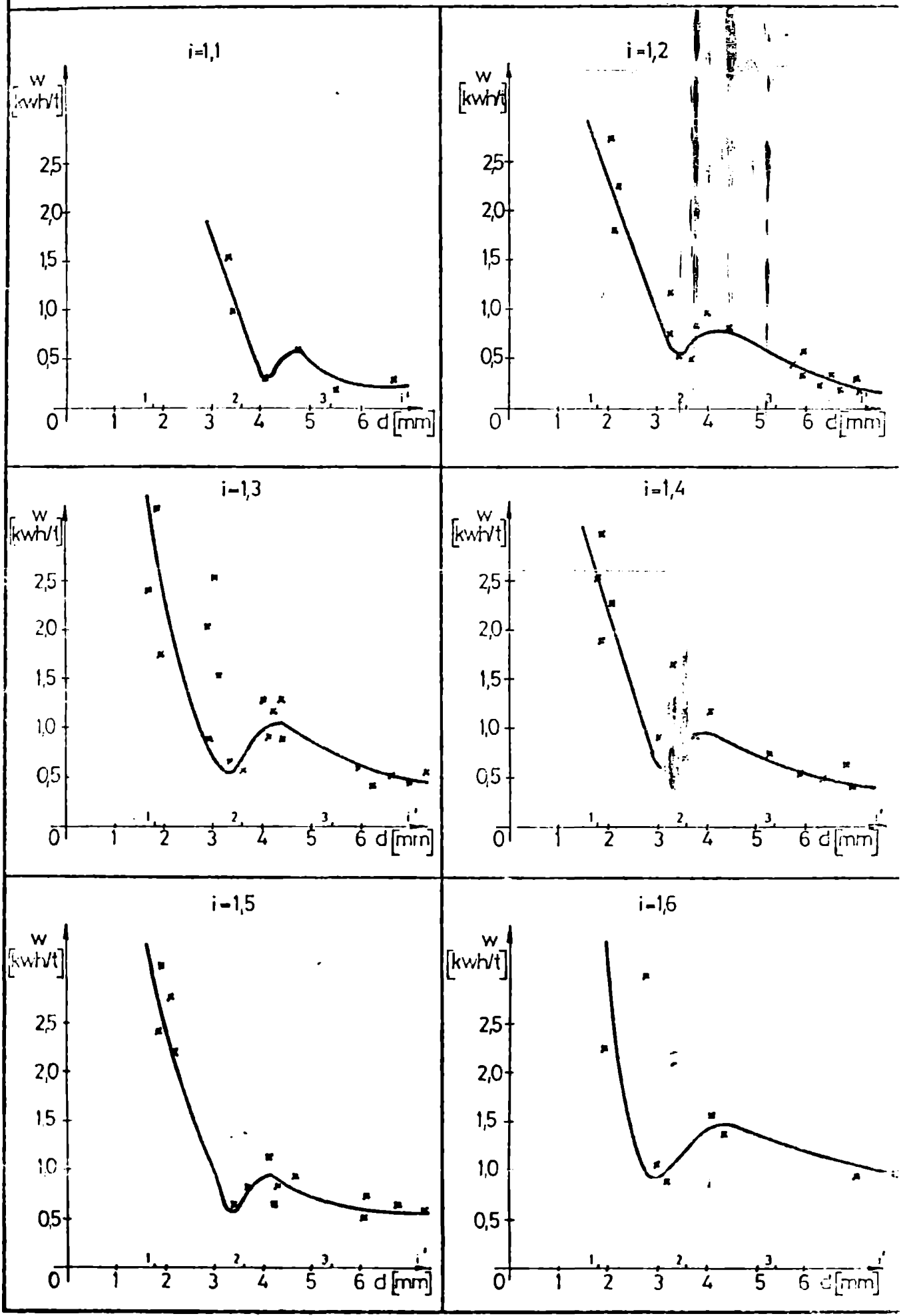
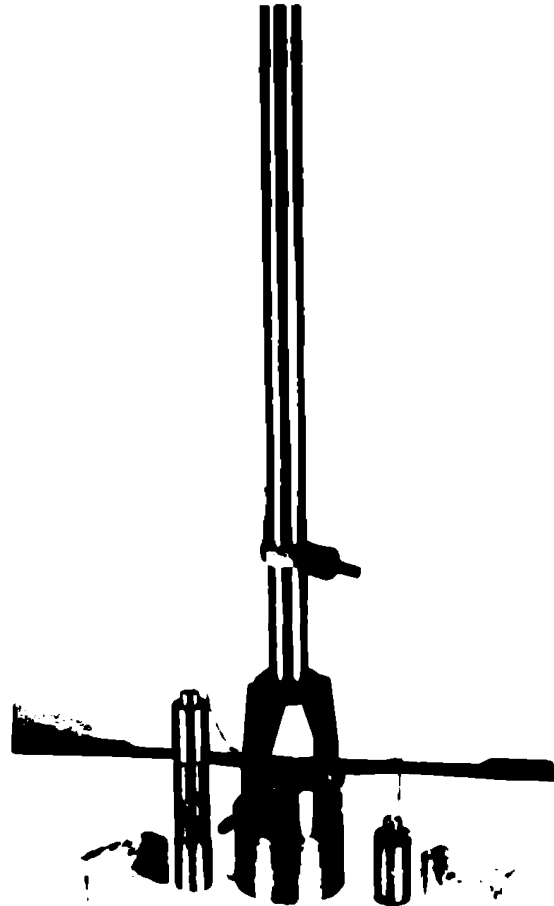


Fig 9 Variația parametrilor w, i și d la diferite valori ale lui i -clincher-II-



3.2. Aparatura utilizată. Granulele de clincher au fost supuse solicitării la șoc dinamic cu ajutorul dispozitivului din fig. 10. Acesta permite modificarea greutății berbecului precum și a înălțimii de cadere a acestuia.

Fig. 10 - Dispozitiv de solicitare la șoc dinamic.



Prin variația greutății berbecului, precum și a înălțimii de cadere a acestuia s-au aplicat energii de șoc de 0,245 Nm; 0,490 Nm; 0,980 Nm; 1,270 Nm și 1,905 Nm.

3.3. Mod de lucru. Asupra granulelor de clincher (luate în loturi de câte 100) s-au aplicat energii de șoc variind între 0,245 - 1,905 Nm. În urma fiecărei solicitări s-au recuperat întregul fracțiunile zeroate în scopul traserii curvelor $T = f(\phi)$.

3.4. Rezultate obținute. În cadrul încercărilor la șoc dinamic s-au obținut seturi de date de care s-a analizat și

stabilit corelația dintre energia de șoc și factorul R - un parametru caracteristic procesului de mărunțire.

3.4.1. Notatii folosite :

T = trecerea prin diverse ciururi, (s) ;

d = dimensiunea ochiului ciurului, (mm) ;

E = energie de șoc aplicată (Nm) ;

S_m = integrale curbei granulometrice rezultate în urma sfărâmării granulelor de clincher, (mm²) ;

S_g = suprafața totală pentru domeniul granulometric respectiv (mm²) ;

R = parametru caracteristic pentru procesul de mărunțire, definit prin relația :

$$R = \frac{S_m}{S_g}$$

3.4.2. Stabilirea corelației dintre energia de șoc și factorul R. Pe baza datelor experimentale s-a calculat factorul R pentru fiecare tip de clincher, la fiecare granulație și la fiecare valoare a energiei de șoc aplicate. Variația factorului R în funcție de energia de șoc aplicată este prezentată în fig. 11-12.

Din examinarea datelor experimentale se constată că :

- în general, factorul R scade odată cu creșterea dimensiunilor granulare, iar, pentru aceeași dimensiune, crește odată cu creșterea energiei de șoc aplicate;

- creșterea accentuă a valorilor factorului R este mult mai accentuată în domeniul energiilor mici, marcând o tendință asimptotică corespunzătoare unui nivel energetic de peste 1,20 Nm. Această tendință se situează, în raport de dimensiunile granulelor în jurul valorii de 0,850 Nm, la frecvențele mici (4-6 mm) și 0,650 Nm, la

Fig. 11 Variația factorului R în funcție de energia de șoc aplicată

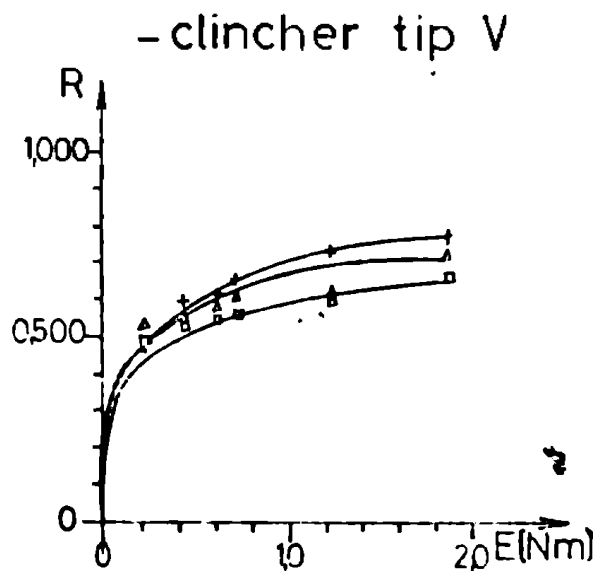
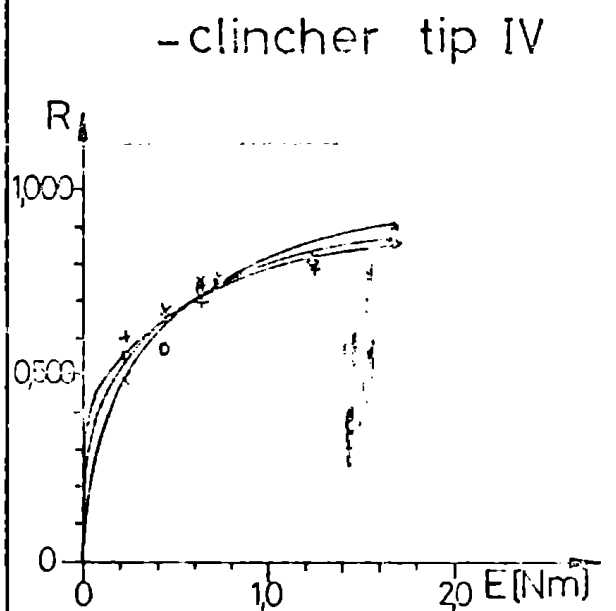
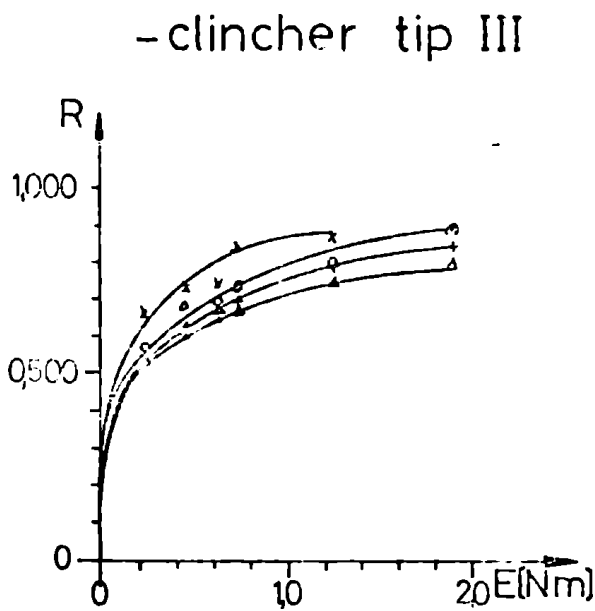
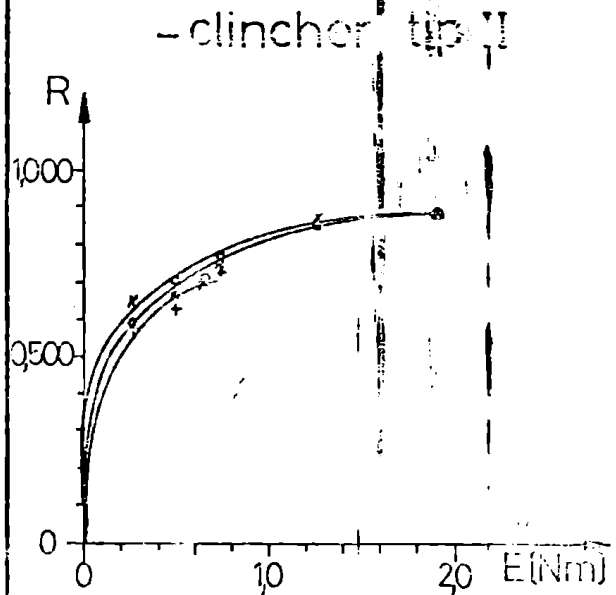
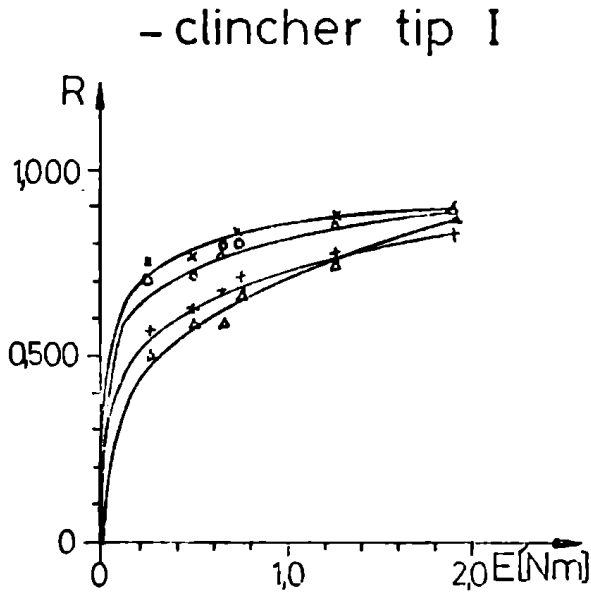
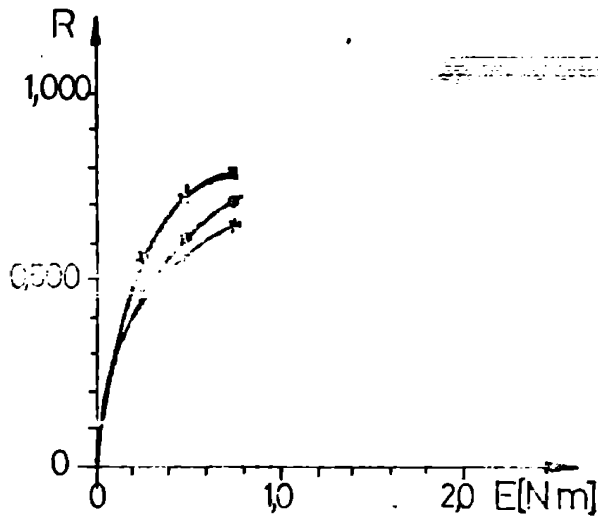
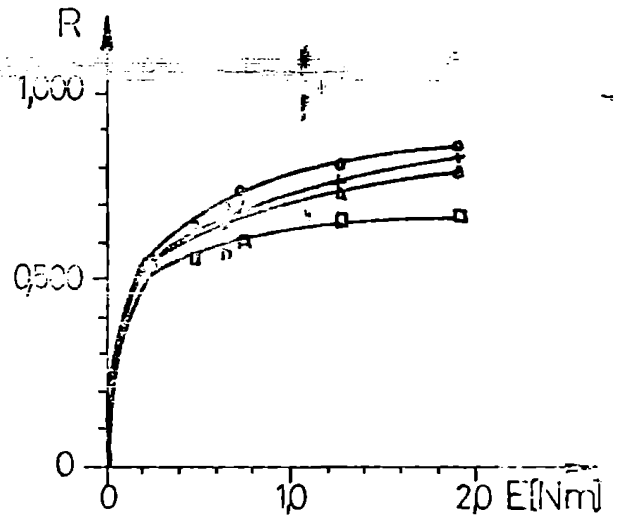


Fig. 12 Variația factorului R în funcție de energia de șoc aplicată

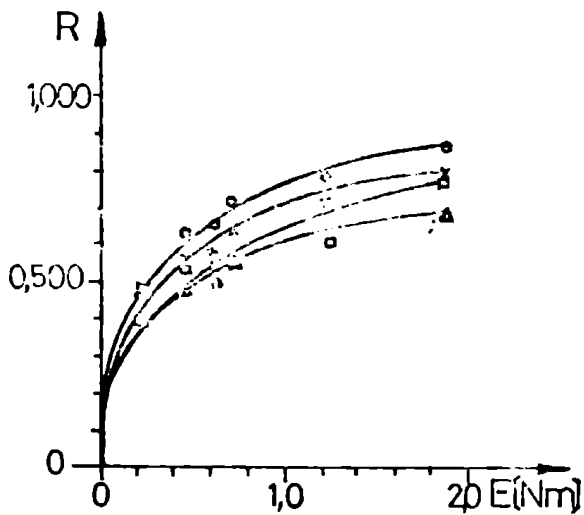
- clincher tip VI



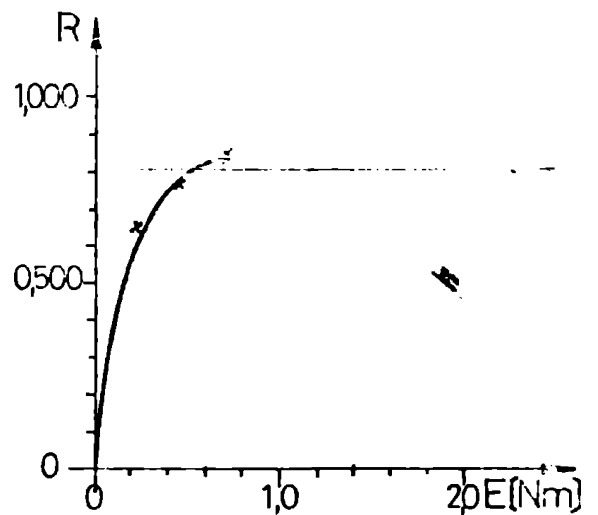
- clincher tip VII



- clincher tip VIII



- clincher tip IX



Legendă

- x x x Frațiunea 4-5 mm
- o o o Frațiunea 5-6 mm
- + + + Frațiunea 6-7 mm
- Δ Δ Δ Frațiunea 7-8 mm
- □ □ Frațiunea 8-10 mm

fracțiunile mari (3-10 mm). Peste nivelul de 1,20 mm variația factorului R este mai puțin semnificativă în raport cu proveniența clicherelor, remarcându-se în unele cazuri și o accentuată îngustare a limitelor de variație.

- apare deci evidentă concluzia, cu implicații practice, că nu este justificată depășirea unui anumit nivel al energiei de șoc, valoarea acestui prag depinzând de dimensiunile granulelor și de compoziția clicherului.

Alceindu-se de la detale experimentale s-a încercat să se stabilească expresia analitică a corelației dintre energia de șoc și factorul R, corelație care s-a dovedit a fi de forma :

$$E = a R^b$$

Analizându-se, într-o primă etapă, influența granulației fiecărui tip de clicher utilizat s-a ajuns la expresiile matematice prezentate în tabelul nr.14.

Tabelul nr.14

Tipul clicherului	Fracțiunea granulată				
	4-5 mm	5-6 mm	6-7mm	7-8mm	8-10mm
I	$E=5,22 R^{10,1}$	$E=4,53 R^{7,6}$	$E=4,84 R^{5,1}$	$E=4,28 R^{4,0}$	-
II	$E=3,19 R^{5,2}$	$E=2,93 R^{4,6}$	$E=3,60 R^{4,6}$	-	-
III	$E=3,80 R^{6,2}$	$E=3,33 R^{4,7}$	$E=3,75 R^{4,3}$	$E=5,49 R^{4,9}$	-
IV	$E=2,06 R^{3,2}$	$E=2,65 R^{3,7}$	$E=4,46 R^{5,6}$	-	-
V	-	-	$E=4,78 R^{4,2}$	$E=15,6 R^{6,1}$	$E=31,57 R^{6,2}$
VI	$E=1,56 R^{3,2}$	$E=2,22 R^{3,1}$	$E=3,76 R^{3,6}$	-	-

	1	2	3	4	5
VII -	$E=2,92 R^{4,0}$	$E=4,41 R^{4,7}$	$E=6,64 R^{6,6}$	$E=31,57 R^{7,5}$	
VIII -	$E=2,72 R^{3,3}$	$E=3,44 R^{3,1}$	$E=6,11 R^{3,4}$	$E=6,64 R^{6,6}$	
IX	$E=1,56 R^{4,2}$	-	-	-	

În faza următoare a cercetării s-a căutat să se elimine influența granulăției, pentru a se putea stabili corelația dintre energie de șoc și factorul R în funcție de tipul de clincher. Expresiile analitice ale funcției $E = f(R)$ sunt prezentate în tabelul nr.15.

Tabelul nr.15

Tipul clincherului	Expresia funcției $E=f(R)$	Coefficient de corelație, (%)
I	$E = 4,895 R^{6,2}$	98,710
II	$E = 3,040 R^{4,7}$	97,669
III	$E = 3,960 R^{5,0}$	99,018
IV	$E = 3,480 R^{4,7}$	97,575
V	$E = 12,86 R^{5,6}$	99,559
VI	$E = 12,310 R^{3,3}$	99,977
VII	$E = 6,060 R^{5,2}$	99,418
VIII	$E = 4,650 R^{3,6}$	99,454
IX	$E = 3,730 R^{5,3}$	99,667

Pe baza tuturor datelor experimentale s-a căutat, în final o expresie generală care să rețea corelația dintre energia de șoc și factorul R, găsiindu-se :

$$E = 2,94 R^{4,2} \quad (15)$$

VI. STUDIUL DYNAMICII ÎN REGIMUL DE MĂRI A
EMULSIUNII ÎN DISTRIBUȚIILE DE LĂNGHELE

1. Utilajele de laborator folosite

Studiul dinamicii proceselor de micinare a clincherului s-a făcut, în marele, pe următoarele utilaje de laborator :

- moară înclinată ;
- moară de laborator ;
- moară orizontală, tip bond.

Caracteristicile celor trei mări folosite sînt :

a) Moara înclinată - are schema prezentată în fig.13 iar detale constructive în tabelul nr.10.

Tabelul nr.10

Nr. crt.	Caracteristici tehnice	U.m.	Valori
1.	diametrul interior al tubului morii	mm	250
2.	Inclinarea tubului morii	grade	15
3.	Număr de camere	buc.	1
4.	Volumul interior al morii	dm ³	116,93
5.	Durații ale ciclului morii	rot/min	42,0; 43,2; 49,0; 50,2; 70,0
6.	Motor electric :		
	-putere	kV	10
	-turație	rot/min	1460

b) moara de laborator 570 x 270 mm - a fost folosită pentru a se compara rezultatele obținute cu ea și cele obținute cu moara inclinată. Pentru a se putea compara rezultatele s-a ales o moară similară ce diametru, volum interior, încărcătură de corpuri de măcinare și masa de material introdus, cu moara inclinată.

c) moara originală, tip 2000 - s-a folosit deoarece este utilajul de laborator unanim acceptat pe plan mondial pentru determinarea aptitudinii la măcinare a clincherului. Schema acestui mări este prezentată în fig. 14, iar datele și tehnice în tabelul 17.

Tabelul nr. 17

No. ord.	Caracteristicii tehnice	Unit.	Valori
1.	Dimensiuni interioare :		
	- diametru	mm	305
	- lungime	mm	305
2.	Volum interior	dm ³	22,5
3.	Turații ale corpului mării	rot/min	50, 55, 60, 65, 70
4.	Motor electric :		
	- putere	kW	0,75
	- turație	rot/min	1500

2. Mod de lucru

Dinamica proceselor de măcinare în cele trei utilaje de laborator s-a studiat prin urmărirea, în timp, a trecerii pe site

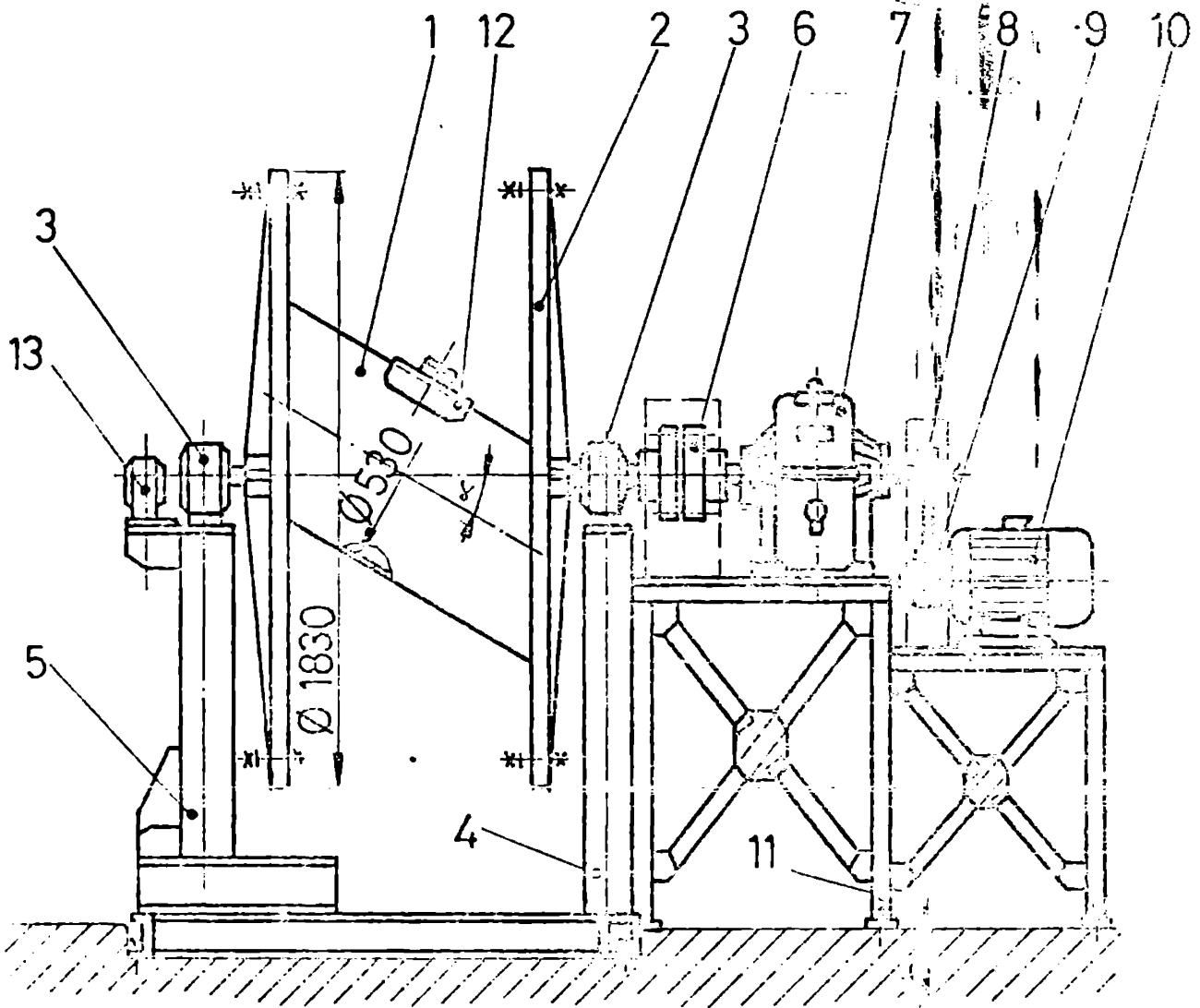
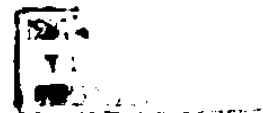


Fig.13 MOARA TUBULARĂ ÎNCLINATĂ DE LA I.C.P.I.L.A.

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1 - Corpul tubular al morii înclinate. | 8 - Roată de curea trapezoidală |
| 2 - Funduri cu volanți. | 9 - Roată de curea trapezoidală. |
| 3 - Lagăre. | 10 - Motor electric. |
| 4 - Suport fix | 11 - Cadru de susținere. |
| 5 - Suport deplasabil. | 12 - Capac. |
| 6 - Cuplaj elastic. | 13 - Contor de turație. |
| 7 - Reductor. | |



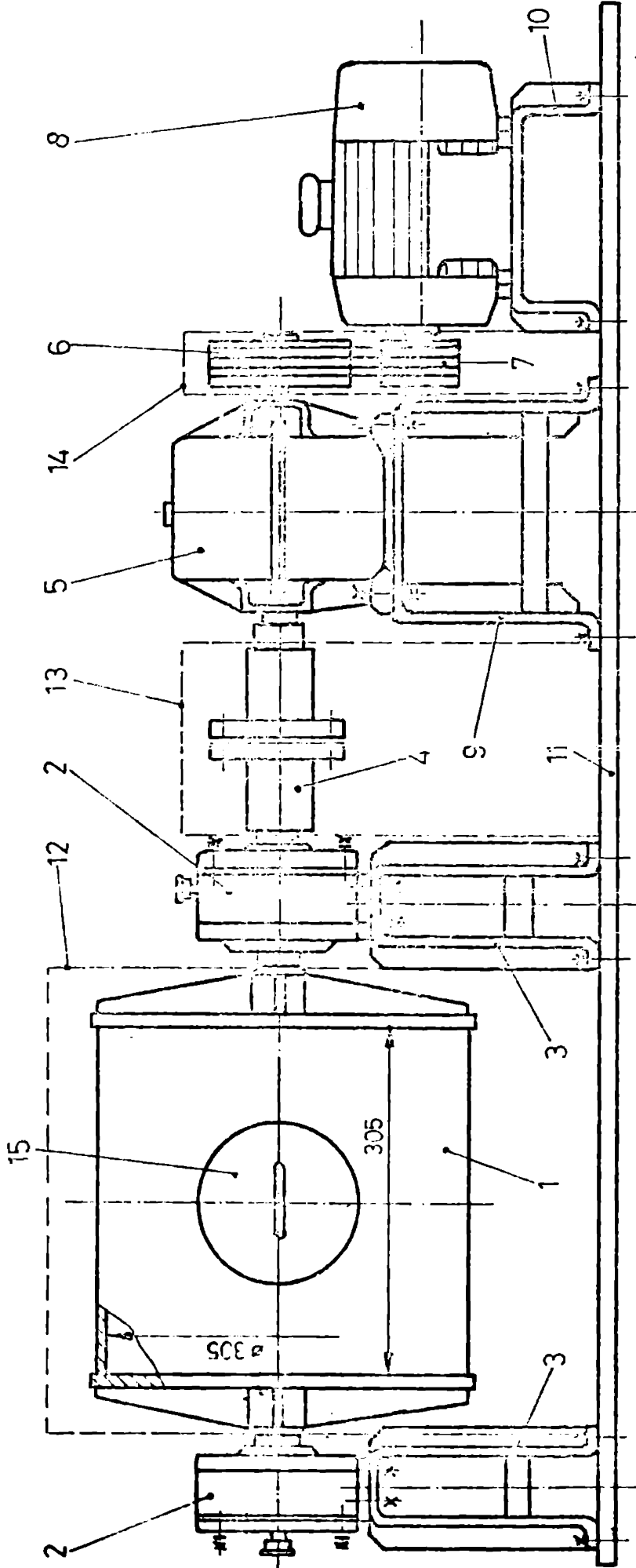


Fig. 14 MOARĂ TUBULARĂ $\phi 305 \times 305$ mm CU BILE (TIP F.C. BOND) DE LA I.C.P.I.L.A.

- 1.- Corpul morii.
- 2.- Lagăre.
- 3.- Suportii morii.
- 4.- Cuplaj elastic.
- 5.- Reductor

- 8.- Motor electric.
- 9.- Suportul reductorului.
- 10.- Suportul motorului.
- 11.- Placă de bază

12,13,14.- Abcărători

de 0,09 mm. Pe baza rezultatelor obținute s-au calculat următorii parametri :

- cantitatea G_1 de material măcinat de la începutul procesului :

$$G_1 = \frac{G_0 T}{t} \quad (16)$$

notații :

G_0 = cantitatea inițială de material introdus în moară (g) ;

T = trecerea pe site de 0,09 mm (s) ;

t = durata măcinării (min).

- cantitatea G_2 de material măcinat în intervalul de timp

$t_n - t_{n-1}$:

$$G_2 = \frac{G_0 T_1}{t_1} - \frac{G_0 T_2}{t_2} = G_0 \left(\frac{T_1}{t_1} - \frac{T_2}{t_2} \right) \quad (17)$$

notații :

T_1, T_2 = treceri pe site de 0,09 mm la două momente succesive ale măcinării, (s) ;

t_1, t_2 = durate succesive ale măcinării, (min)

-Viteza de măcinare a fracțiunii mai mari de 0,09 mm, v_1 :

$$v_1 = \frac{G_1}{t} \quad (18)$$

-viteza de măcinare pe intervalul de timp $t_n - t_{n-1}$, v_2 :

$$v_2 = \frac{G_2}{t_2} \quad (19)$$

notații :

G_2 = cantitatea de material măcinat între două momente succesive ale măcinării (g) ;

t_2 = intervalul de timp considerat între două momente succesive ale măcinării, (min).

3. Desfășurarea experimentărilor

În cadrul experimentărilor, studiul dinamicii măcinării clincherului s-a făcut în următoarele condiții :

- în moare înclinată : s-a păstrat constantă masa încărcăturii de material ($G_0 = 20000$ g) și coeficientul de umplere cu corpuri de măcinare ($\varphi = 25$ %) și s-a variat viteză mării ($n_1 = 42,0$ rot/min; $n_2 = 48,5$ rot/min; $n_3 = 49,8$ rot/min; $n_4 = 56,1$ rot/min; $n_5 = 70,0$ rot/min);

- în moare de laborator : s-a făcut măcinarea în condiții similare celor din moare înclinată ($G_0 = 20000$ g, $\varphi = 25$ % și $n = 48,5$ rot/min);

- în moare bondu : a) s-a păstrat constant coeficientul de umplere cu corpuri de măcinare ($\varphi = 21$ %, respectiv $\varphi = 32,5$ %) și s-a variat masa încărcăturii de material ($G_0^1 = 1257$ g; $G_0^2 = 2010$ g; și respectiv $G_0^3 = 2482$ g);

b) s-a păstrat constantă masa încărcăturii de material ($G_0 = 1257$ g) și s-a variat coeficientul de umplere cu corpuri de măcinare a mării (20 %, 22,5 %, 25 %, 27,5 %, 30,0 %, 32,5 %).

4. Rezultatele experimentărilor

Pe baza rezultatelor experimentărilor s-a înregistrat stabilirea următoarelor variații :

- variația vitezei de măcinare a frecinței mai mari de 0,09 mm în funcție de durata de măcinare : $F_1 = v_1(t)$;

- variația vitezei de măcinare pe parcursul procesului :
 $f_2 = v_2(t)$;

- variația vitezei de măcinare în diferitele momente ale procesului, în funcție de cantitatea de material măcinat de la începutul măcinării : $f_3 = v_2(G_1)$;

- variația vitezei de măcinare în diferite momente ale procesului, în funcție de cantitatea de material măcinat în perioada respectivă : $f_4 = v_2(G_2)$;

- variația vitezei de măcinare a fracțiunii mai mari de 0,09 mm, în funcție de trecerea prin sita de 0,09 mm : $f_5 = v_1(t)$;

- variația trecerii prin sita de 0,09 mm, în funcție de durata măcinării : $f_6 = X(t)$;

- variația cantității de material măcinat, în funcție de durata procesului : $f_7 = G_1(t)$.

Aceste variații, pentru cazurile cele mai reprezentative, sînt prezentate în fig. 15. Pe baza datelor experimentale, se pot trage următoarele concluzii :

- viteza de măcinare a fracțiunii mai mari de 0,09 mm, după ce atinge un maxim - în prima parte a măcinării - decrescătoare cu avansarea procesului, indiferent de utilajul de laborator utilizat și de condițiile specifice de lucru.

În cazul măcinării în moare înclinată, această viteză crește cu turația (excepție făcînd turația supercritică $n_2=70,0$ rot/min la care viteza de măcinare a fracțiunii mai mari de 0,09 mm este minimă).

Comparînd rezultatele obținute în moare $\emptyset 250 \times 250$ mm cu cele, în condiții similare, în moare înclinată, se constată că viteza de măcinare a fracțiunii mai mari de 0,09 mm este mai mare în cazul morii înclinate.

În cazul măcinării în moara Bond, viteza de măcinare a acestei fracțiuni crește cu creșterea masei de material - la același coeficient de umplere - și, în general, cu coeficientul de umplere cu corpuri de măcinare, la aceeași masă a încărcăturii de materiole.

- viteza de măcinare în diferite momente ale procesului, înregistrată, în toate cazurile, o tendință de scădere după ce, în prima parte a măcinării, prezintă un maxim ;

- viteza de măcinare în diferite momente ale procesului, în funcție de cantitatea de material măcinat în perioada respectivă, are o alură liniară, ușor convexă, crescând cu creșterea cantității de material măcinat, la un $\varphi = \text{ct.}$, la moara Bond și ne depinzând de turația la moara înclinată ;

- celelalte corolații nu prezintă particularități deosebite față de datele prezentate în literatură.

VII. STUDIUL CINETICII MĂCINĂRII

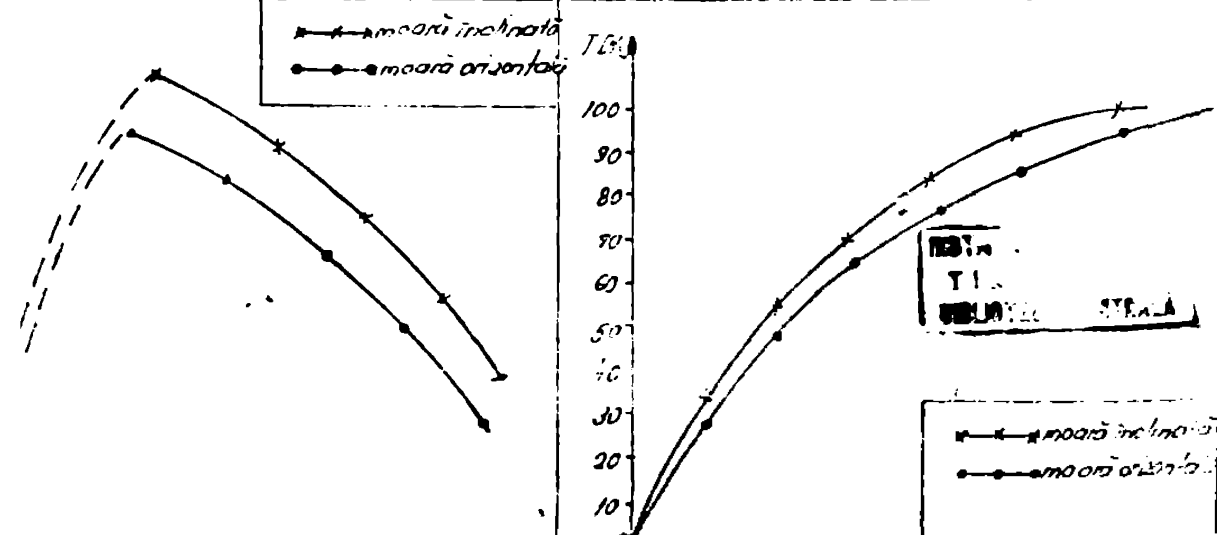
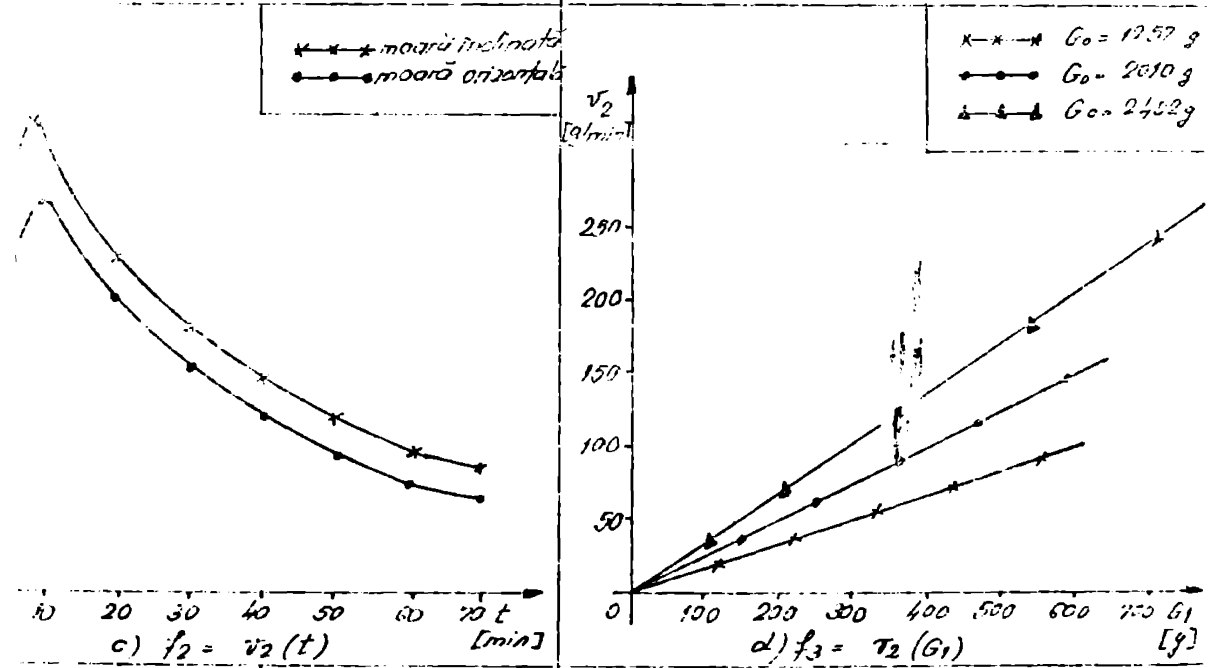
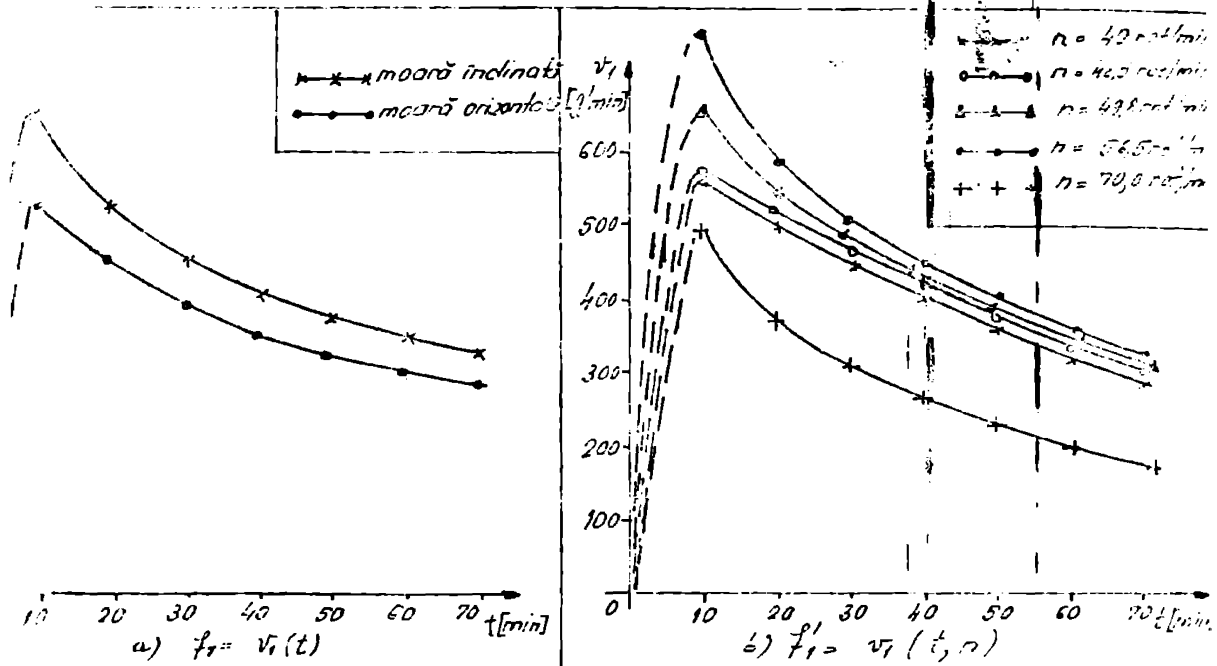
1. Istoricul problemei și lucrările fundamentale

Printre cele mai vechi concepții asupra cineticii mărunțirii figurează cele ale lui Fahrenwald (28). Acestea consideră ca variabilă fundamentală greutatea M a materialului care trece în timpul t , prin site cu ochiul având dimensiunea x . Această greutate M - exprimată, de exemplu în procente din greutatea totală a materialului - este o funcție de variabilă t :

$$M = M(x, t)$$

Fahrenwald a studiat variația lui M și a lui $\partial M / \partial t$ în

15 REPREZENTAREA GRAFICA A DIFERITELOR CORELATII STABILITE LA STUDIUL DINAMICII PROCESELOR DE MACINARE IN UTILAJE DE LABORATOR



funcție de timp, la măcinarea cuarțului într-o moară cu bile. El a ajuns la concluzie că derivata $\partial u / \partial t$ nu rămâne constantă decât în primele minute ale măcinării și numai pentru cele mai fine particule.

În aceeași ordine de idei, Arditer și Shranty (29), (30), Fuersteman și Somasundaran (31) au studiat evoluția în timp a tranșelor provenite din măcinarea unei cantități inițiale relativ mici de material. Ei au ajuns să prezese relația care leagă u , x și t în primele minute ale măcinării și pentru granulile având dimensiunea mai mică decât a "alimentării". Această relație se poate scrie :

$$u(x,t) = e \left(\frac{x}{e} \right)^\alpha \cdot t \quad (20)$$

Zagustin și Alyevdin (13) au presupus că în timpul măcinării, în momentul t , variația greutatei particulelor de dimensiune x este proporțională cu această greutate. Acest lucru se poate exprima matematic :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = e(1 - x) \quad (21)$$

sau :

$$u(x,t) = 1 - [1 - u(x,0)] e^{-et} \quad (22)$$

Roberts (32), prin experimentările sale a arătat că această relație este valabilă numai cu condiția ca t să nu depășească o anumită limită.

Pentru a extinde valabilitatea acestei scheme, Alyevdin a propus o formulare mai complexă a expresiei de mai sus :

$$u(x,t) = 1 - [1 - u(x,0)] e^{-et^n} \quad (23)$$

Deși studiul său nu se referă în mod direct la acest subiect, trebuie totuși menționată contribuția lui Griffith (33)

sare a introdus pentru prima dată noțiunea de "probabilitatea unei granule de a fi măcinată în timpul trecerii printr-o instalație de mărunțire". Griffith a admis că această probabilitate depinde de o putere "a" a dimensiunii particolei. Utilizând această noțiune și un model matematic împrumutat din teoria cineticii gazelor, el a obținut o lege a distribuției ponderale, a cărei ecuație se scrie sub forma :

$$n = 1 - I \left(\frac{b}{\sqrt{a-1}} \cdot \frac{1}{x}, a - 2 \right) \quad (24)$$

Această expresie prezintă o mare analogie cu funcția propusă de Svensson și Burkes pentru repartizarea curbelor granulometrice.

2. Teorii moderne referitoare la cinetica mărunțirii

Contribuțiile aduse de diverși cercetători la elucidarea aspectelor legate de cinetica mărunțirii, se pot împărți în două categorii :

- esinilarea mărunțirii cu o succesiune de concasări simple;
- esinilarea mărunțirii cu o reacție chimică.

2.1. Esinilarea mărunțirii cu o succesiune de concasări simple

Rowdant și Collett (34) au considerat mărunțirea ca o succesiune de concasări simple, această interpretare prezentând ca particularitate faptul că durata măcinării intervine doar indirect. Autorii consideră măcinarea ca o sumă de concasări simple. Pornind de la acest model fizic, se ajunge la unul matematic, operând cu diferențe finite și cu probabilități (de măcinare). Rous-

ția de bilanț, scrisă sub formă matricială, se prezintă astfel :

$$\Delta_1^M = [\Delta_{FP} + (I - F)] \Delta_0^M = D \Delta_0^M \quad (25)$$

Notații :

Δ_0^M și Δ_1^M = matrici coloană ale fracțiunii ... înainte și după măcinare ;

F = matrice diagonală (a_j) a probabilităților de măcinare ;

Δ_{FP} = matricea triunghiulară (n, n) a lui Δ_1^M ;

$F_{ij}^j = (i > j)$ = greutatea granulelor din intervalul i care provin dintr-o concasare simplă din intervalul j .

cu ipoteza lui Meloy și Bergstrom (30), conform căreia concasările simple sînt identice, ecuația (25) devine :

$$\Delta_1^M = J^n \Delta_0^M \quad (26)$$

unde n reprezintă numărul de concasări. Acest număr n de concasări este o funcție crescătoare de timp și poate fi determinat prin compararea curbei granulometrice după măcinarea într-o perioadă de timp determinată, cu o familie de curbe de parametru n , trasate inițial.

Loveday (36), Morst și Krosch (37), Melisali (38) aduc îmbunătățiri acestui model. Lynch face în (39) o expunere sintetică a acestei teorii.

Modelul este ușor de arătat în sensul analogiei cu realitatea dar operează cu ipoteze simplificatoare (cum este cea a concasărilor simple identice), ceea ce conduce în final la o aproximație destul de depărtată de realitate. De de altă parte, modelul

datele laborice, nu poate urmări determinările experimentale ("a concenșrilor simple"), iar timpul nu apare ca variabilă explicită a distribuției granulometrice obținute după măcinare.

2. Analogia mărunțirii cu o reacție chimică

O serie de cercetători între care Patet și Langemann (40) au încercat să reprezintă evoluția în timp a distribuției granulometrice prin ecuații analoge cu cele care guvernează reacțiile chimice de descompunere.

Adăugându-se o analogie cu cinetica reacțiilor chimice se poate scrie o ecuație generală de formă :

$$-\frac{dQ}{dt} = k Q^n \quad (27)$$

în care :

n = ordin de reacție ;

k = constanta de viteză

În multe cazuri în literatură se admite că $n = 1$ (reacțiile sînt de ordinul 1).

Deși pe această cale se obțin unele rezultate interesante, analogia formală dintre cele două fenomene conduce la rezultate contradictorii. Apar astfel abateri de la ipoteza ordinului 1 de reacție cît și de la invariante "constantelor de reacție" k .

Limitarea acestor aproximații, deși analogia mărunțirii cu o reacție chimică reprezintă, în anumite momente ale măcinării o modelare destul de fidelă, marele un pas înainte față de teoria precedentă, totuși, nu reușește să descrie suficient de exact procesul pe toată durata sa.

3. Un nou model cinetic al procesului de mărunțire

3.1. Considerații teoretice

Plecându-se de la studiul evoluției unei distribuții granulometrice ipotetice în timpul procesului de mărunțire (v. fig. 1b) se poate realiza un model cinetic complex cuprinzând ecuațiile cinetice ale unor reacții succesive. Astfel "reactantul A" trece în "produsul B", care trece "în produsul C", ș.a.m.d., în funcție de numărul de intervale considerate utile de a între în studiu A_1, \dots, C reprezentând fracțiuni granulometrice cuprinse între intervale de diametre determinate :

$$d_{A_{\max}} - d_{A_{\min}} ; d_{B_{\max}} - d_{B_{\min}} ; \text{etc}$$

În funcție de evoluția în timp a formei distribuției granulometrice diferențiale se pot alege intervalele $d_{\max} - d_{\min}$ egale sau nu, important fiind să se ocopere cu diviziuni tot intervalul $d_{\text{iniț.}} - d_{\text{final}}$ (unde $d_{\text{iniț.}}$ reprezintă diametrul celei mai mari granule înainte de măcinare și d_{final} reprezintă diametrul celei mai mici granule la sfârșitul măcinării).

Trecându-se la scrierea ecuațiilor cinetice, se obține, pentru un "model tri-reacții", ecuația :



și pentru o reacție de ordinul I (dedusă în studiile lui Petet și Langemann), sistemul de ecuații diferențiale (2) :

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -k_1^1 A \\ \frac{dB}{dt} = k_1^1 A - k_1^2 B \\ \frac{dC}{dt} = k_1^2 B \end{cases} \quad (29)$$

cu soluțiile (30), în cazul alimentării monodisperse ($B_0 = C_0 = 0$):

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 e^{-k_1^1 t} \\ B_1 &= \frac{k_1^1 A_0}{k_1^2 - k_1^1} (e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^2 t}) \\ C_1 &= A_0 \left(1 - \frac{k_1^1 e^{-k_1^2 t} - k_1^2 e^{-k_1^1 t}}{k_1^2 - k_1^1} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

Reprezentarea grafică a acestor expresii este dată în fig.

17.

În cazul alimentării polidisperse, se obține sistemul de soluții:

$$\begin{aligned} A_2 &= A_1 = A_0 e^{-k_1^1 t} \\ B_2 &= B_1 + B_0 e^{-k_1^2 t} = \frac{k_1^1 A_0}{k_1^2 - k_1^1} (e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^2 t}) + B_0 e^{-k_1^2 t} \\ C_2 &= C_1 + C_0 + B_0 (1 - e^{-k_1^2 t}) = A_0 \left(1 - \frac{k_1^1 e^{-k_1^2 t} - k_1^2 e^{-k_1^1 t}}{k_1^2 - k_1^1} \right) + \\ &+ C_0 + B_0 (1 - e^{-k_1^2 t}) \end{aligned} \quad (31)$$

./.

[2] A

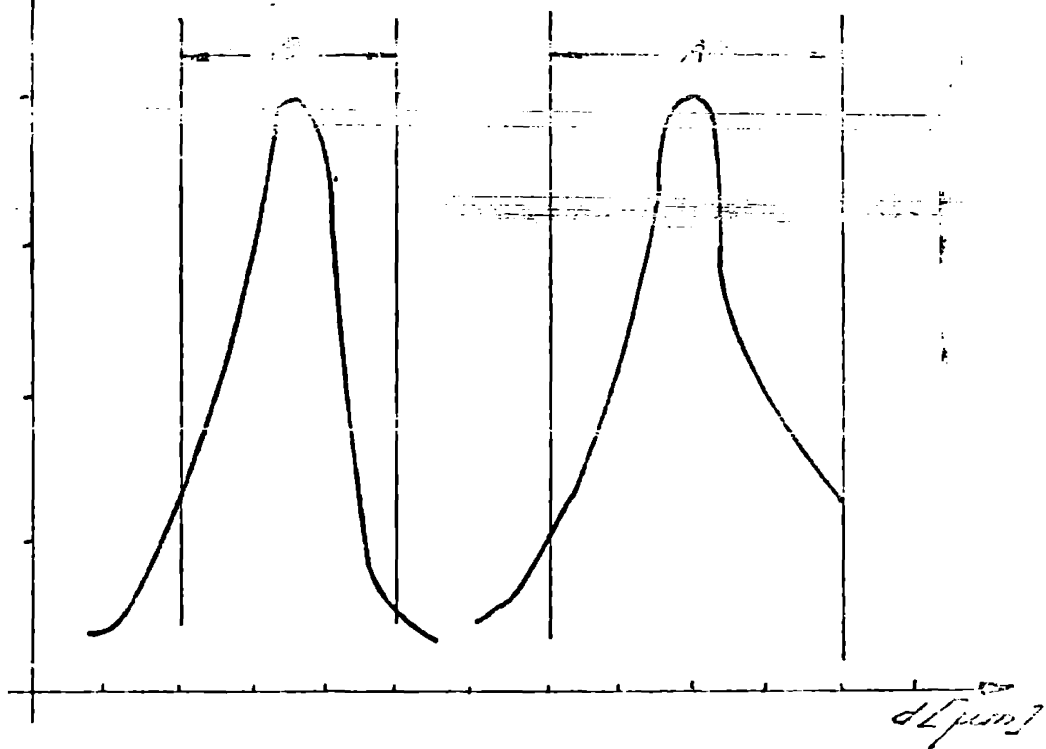


Fig 16 Distribuții granulometrice ipotetice în timpul măcinării.

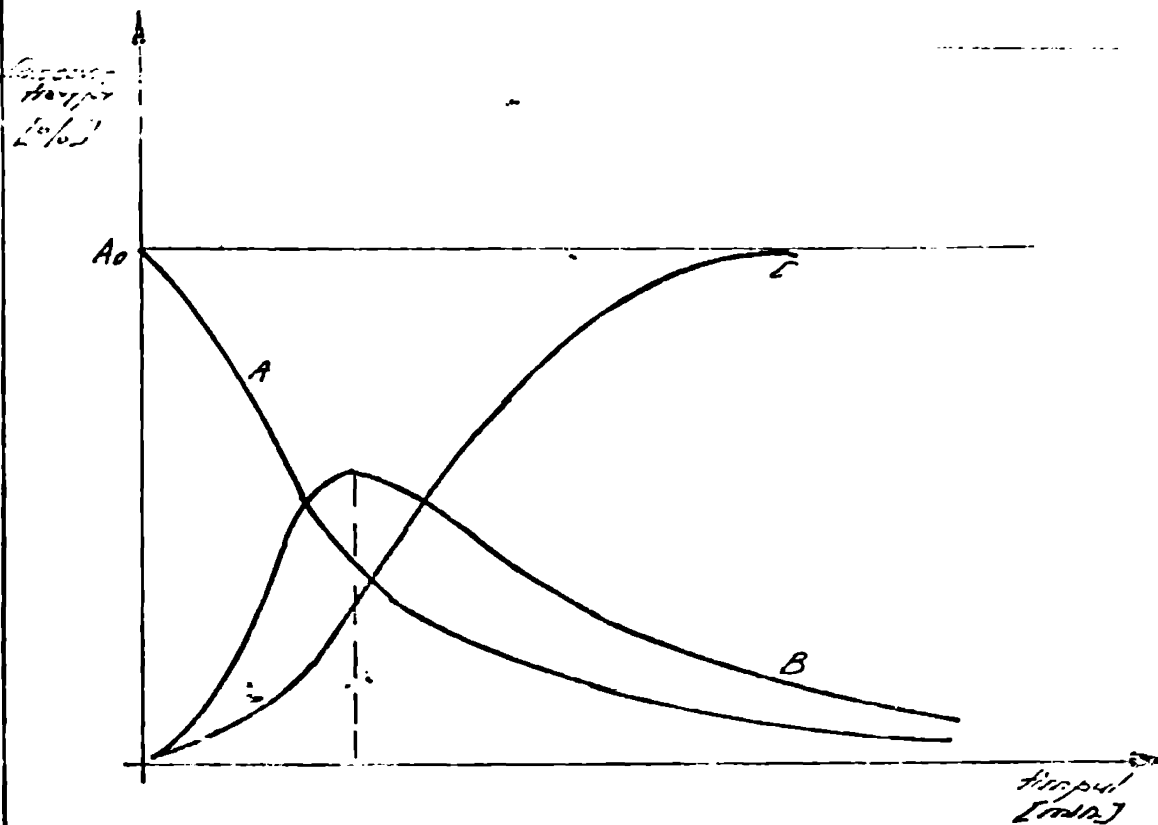


Fig 17 Curbele cinetice în cazul reacțiilor succesive de ordin I.

Împărțirea intervalului granulometric în trei (în cazul de față) sau mai multe intervale se face convenabil și arbitrar, în sensul decelării diferențelor de mecanică funcție de dimensiune.

Pe baza cunoștințelor cinetice și ținându-se seama de reprezentarea lor grafică (v.fig.17), se pot desprinde câteva aspecte caracteristice ale modelului propus :

3.1.1. "Reactantul A" - se consumă conform unei reacții tipice de ordinul I. Se regăsește astfel situația ecuației cinetice propuse de Retet și Langemann.

3.1.2. "Produsul în reacționar B" - viteza sa de formare va fi la începutul procesului mai mare decât viteza de consum, ducând la o acumulare de "produs B". Ulterior viteza de formare va fi depășită de viteza de consum, ducând în final la dispoziția "produsului B".

3.1.3. "Produsul final C" - se caracterizează printr-o "perioadă de inducție", în timpul căreia viteza crește continuu, reacția prezentând un caracter de autoaccelerare. În timp, viteza de formare a "produsului final" atinge o valoare staționară maximă, sesizând ulterior usturită consumării "reactantului".

3.1.4. Modelul cinetic propus este mai complet decât cele anterioare, reflectând mai fidel fenomenele reale care au loc în timpul mărunțirii. Acest model consideră că în timpul mărunțirii au loc schimbări în mecanismul de reacție, atât intrinsec, prin modificarea "energiilor de acționare", adică a "energiilor specifice minime de sfărâmare", care sînt funcție de dimensiunea granulărilor, cât și extrinsec, prin modificarea spectrului încălzit-

rii cu bile in lungul morii (deci și pe axa timpului și "vis-a-vis" de "reacții" de diferite dimensiuni).

3.1.5. Avându-se în vedere că perioada de inducție (care poate întârzie mult desfășurarea procesului de formare a "produsului final") se confundă cu timpul necesar ca substanța intermediară B să atinga "concentrația" maximă, ea poate fi redusă prin adăos controlat de A. Adăosul optim va fi cel corespunzător condițiilor de maxim, adică $[B]_{\max}$. Un adăos mai mare nu are aici un sens, deoarece în aceste condiții formarea "produsului C" va prezenta la început o scădere pronunțată a vitezei de reacție și nu atinge aceeași viteză maximă staționară.

Adăosul optim se calculează din condiția :

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{\max.} = 0 \quad (32)$$

respectiv :

$$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{\max.} = A_0 \frac{k_1^1}{k_1^2 - k_1^1} (-k_1^1 e^{-k_1^1 t} + k_1^2 e^{-k_1^2 t}) \quad (33)$$

de unde :

$$\tau_{\max.} = \frac{1}{k_1^2 - k_1^1} \ln \frac{k_1^2}{k_1^1} \quad (34)$$

Avându-se în considerare semnificația cinetică a constante-
lor de viteză, dată de legea lui Arrhenius, adaptată pentru procesul încălzirii de stat și lanțurilor, exprimată :

$$[B]_{\max.} = \frac{k_1^1}{k_1^2} [A]_{\max.} \quad (35)$$

poate fi scrisă ca :

$$[B]_{\max.} = \frac{A^1 \cdot e^{-E_A^1/RT}}{A^2 \cdot e^{-E_A^2/RT}} \quad (36)$$

unde $A^{1,2}$ sînt factorii preexponențiali pentru constantele k_1^1 și k_1^2 iar $E_A^{1,2}$ sînt energiile de sfîrșire pentru "reacțiile" consecutive de ordinul I. În acest caz factorii preexponențiali sînt aproximativ egali, ceea ce conduce la ecuația aproximativă :

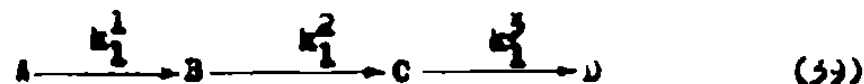
$$[B]_{\max.} = \exp. [-(E_A^1 - E_A^2)/RT][A]_{\max} \quad (37)$$

ceea ce arată că, concentrația maximă a "produsului intermediar" depinde în primul rînd de diferența dintre energiile de activare caracteristice celor două procese consecutive :



3.1.6. Se pot concepe, pe același principiu, modele cu patru componenți cu reacții succesive și concurente, cu reacții de echilibru în funcție de caracteristicile materiei prime și condițiile tehnologice.

Astfel, în cazul unei reacții succesive, de forma :



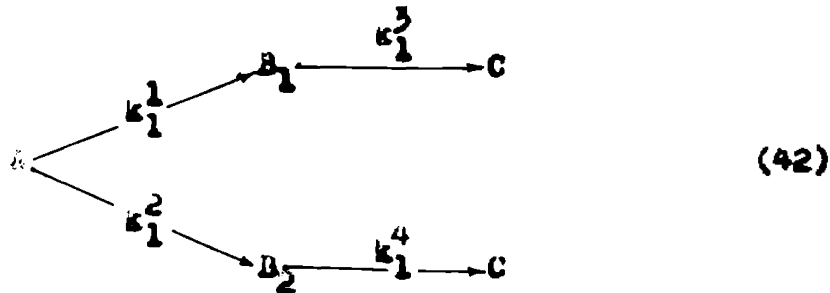
sistemul de ecuații este :

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -k_1^1 A \\ \frac{dB}{dt} = -k_1^1 A - k_1^2 B \\ \frac{dC}{dt} = k_1^2 B - k_1^3 C \\ \frac{dD}{dt} = k_1^3 C \end{cases} \quad (40)$$

cu soluțiile (se consideră direct cazul alimentării palidisperse):

$$\begin{aligned}
 A_3 &= A_1 = A_0 e^{-k_1^1 t} \\
 B_3 &= B_1 = \frac{k_1^2 A_0}{k_1^2 - k_1^1} (e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^2 t}) \\
 C_3 &= C_0 e^{-k_1^3 t} + B_0 \frac{k_1^2}{k_1^2 - k_1^1} (e^{-k_1^2 t} - e^{-k_1^3 t}) \quad (41) \\
 D_3 &= A_0(1 - e^{-k_1^1 t}) - A_0 \frac{k_1^1}{k_1^2 - k_1^1} (e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^2 t}) - \\
 & - A_0 \frac{k_1^2 k_1^1}{k_1^2 - k_1^1} \left(\frac{e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^3 t}}{k_1^2 - k_1^1} - \frac{e^{-k_1^2 t} - e^{-k_1^3 t}}{k_1^3 - k_1^2} \right) + \\
 & + B_0(1 - e^{-k_1^2 t}) - B_0 \frac{k_1^2}{k_1^2 - k_1^1} (e^{-k_1^2 t} - e^{-k_1^3 t}) + \\
 & + C_0(1 - e^{-k_1^3 t}) + D_0
 \end{aligned}$$

În anumite cazuri impuse de practică, procesul de mărunțire se poate conduce după o cinetică a reacțiilor succesive combinate cu cele concertate, după scheme:



generind sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} \frac{dB_1}{dt} = k_1^1 A - k_1^3 B_1 \\ \frac{dB_2}{dt} = k_1^2 A - k_1^4 B_2 \end{cases} \quad (43)$$

dar :

$$A = A_0 \cdot e^{-(k_1^1 - k_1^2)t} = A_0 \cdot e^{-k_1^1 t} \quad (44)$$

și :

$$\begin{cases} \frac{dB_1}{dt} = k_1^1 A_0 \cdot e^{-k_1^1 t} - k_1^3 B_1 \\ \frac{dB_2}{dt} = k_1^2 A_0 \cdot e^{-k_1^1 t} - k_1^4 B_2 \end{cases} \quad (45')$$

Soluțiile sistemului sînt :

$$\begin{aligned} B_1 &= B_{10} \cdot e^{-k_1^3 t} + A_0 \frac{k_1^1}{k_1^3 - k_1^1} (e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^3 t}) \\ B_2 &= B_{20} \cdot e^{-k_1^4 t} + A_0 \frac{k_1^2}{k_1^4 - k_1^1} (e^{-k_1^1 t} - e^{-k_1^4 t}) \end{aligned} \quad (45)$$

Menținerea bilanțului de material pe componente conduce la ecuațiile :

$$A + B_1 + B_2 + C = A_0 + B_{10} + B_{20} + C_0 \quad (46)$$

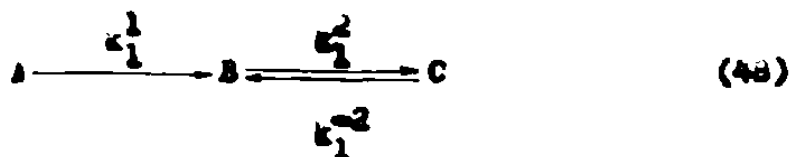
și :

$$\begin{aligned}
 C = & C_0 + B_{10}(1 - e^{-k_1^3 t}) + B_{20}(1 - e^{-k_1^4 t}) + \\
 & + A_0(1 - e^{-k_1 t}) + A_0 \frac{k_1^1}{k_1^3 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_1^3 t}) + \\
 & + \frac{k_1^2}{k_1^4 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_1^4 t}) \quad (47)
 \end{aligned}$$

În domeniul maruntirii fine sau a amuzitor materiale unde pot apare probleme de animerare (adică "reacții inverse"), se poate concepe un model cinetic care să combine reacțiile succesive, în prima etapă cu o reacție de echilibru în etapa a doua.

Înstrîndu-se aceleași notații, modelul cinetic propus

este :



Iar pentru "produsul intermediar B" și "produsul final C" se obține sistemul de ecuații :

$$\begin{cases}
 \frac{dB}{dt} = k_1^1 A_0 e^{-k_1 t} - k_1^2 B + k_1^2 C \\
 \frac{dC}{dt} = k_1^2 B - k_1^2 C
 \end{cases} \quad (49)$$

și, în final :

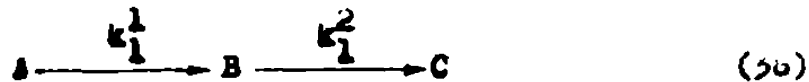
$$\begin{aligned}
 B = & B_0 e^{-(k_1^2 + k_1^2)t} + A_0 \frac{k_1^1 - k_1^2}{k_1^2 + k_1^2 - k_1^1} e^{-k_1 t} + \\
 & + (A_0 + B_0 + C_0) \frac{k_1^2}{k_1^2 + k_1^2} (1 - e^{-(k_1^2 + k_1^2)t}) \quad (50)
 \end{aligned}$$

și :

✓.

$$\begin{aligned}
 C = C_0 + A_0(1 - e^{-k_1 t}) \frac{k_1^2}{k_1^2 + k_1'^2 - k_1} + \\
 + B_0(1 - e^{-(k_1^2 + k_1'^2)t}) - \\
 - (A_0 + B_0 + C_0) \frac{k_1}{k_1^2 - k_1'^2} (1 - e^{-(k_1^2 - k_1'^2)t})
 \end{aligned}
 \tag{51}$$

ceea ce arată că, "concentrația maximă a produsului intermediar" depinde în primul rând de diferența dintre energiile de activare caracteristice celor două procese consecutive :



3.2. EXPERIMENTĂRI PENTRU VERIFICAREA MODELULUI DEZONNE

3.2.1. Condiții experimentale

Avându-se în vedere, pe de o parte rezultatele experimentărilor prezentate la cap.VI, iar pe de altă parte faptul că procesele de mărunțire desfășurate într-o moară înclinată pot fi mai ușor comparate cu cele dintr-un reactor chimic, experimentările pentru verificarea modelului cinetic propus s-au desfășurat într-o moară înclinată (v.cap.VI, pct. 1).

S-a pornit de la două distribuții de fracțiuni granulometrice și s-a urmărit evoluția acestor distribuții în timp.

Procesul de mărunțire a fost asimilat cu o succesiune de reacții chimice consecutive (model tricomponent și tetraocomponent pentru structura fină a variației "produsului intermediar").

Structura distribuției fracțiunilor granulometrice s-a

obținut prin cernerea pe site de control cu ochiurile de $45\ \mu\text{m}$, $63\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$, $125\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$ și $250\ \mu\text{m}$.

Fracțiunea granulometrică $0-45\ \mu\text{m}$ a fost numită "produs C", cea între $45 - 90\ \mu\text{m}$, ca "produsul intermediar B", iar fracțiunea mai mare de $90\ \mu\text{m}$, "reactantul A". În plus s-a studiat variația structurii "fine" a "produsului intermediar B" prin împărțirea în fracțiunea B_1 ($45 - 63\ \mu\text{m}$) și B_2 ($63 - 90\ \mu\text{m}$).

3.2.2. Rezultatele experimentărilor

În cadrul experimentărilor s-au făcut două încercări, pornind de la distribuții inițiale diferite :

- în cazul 1, la alimentare există 22,29 % "reactant A", 27,2 % "produs intermediar B" și 50,21 % "produs C";
- în cazul 2, la alimentare există 23,47 % component A, 26,47 % component B și 50,06 % component C.

Rezultatele, adică variația "concentrației" A, B și C în timp se pot urmări în tabelul 18 și fig. 18-19. Din tabelul 19 și fig. 20-21 se observă că variația "concentrației" $B = B(t)$ ascunde variația specifică a componentelor înglobate ($45-63\ \mu\text{m}$ și $63 - 90\ \mu\text{m}$). Conținutul celor deduse teoretic anterior se observă :

- perioade de inducție inițială la formarea fracției fine ;
 - punctele de inflexiune respectiv timpii la care se observă maximul intermediarilor B_1 și B_2 ;
 - maximul pentru intermediarii B_1 și B_2 ;
 - consumul continuu de material grosier.
- pentru viteza de consum a materialului grosier "reactanț

EVOLUȚIA REPARTIȚIEI GRANULOMETRICE
ÎN TIMP LA MĂCINAREA ÎN MOARA
ÎNCLINATĂ

DE IARIE (in)	Fracțiuni granulometrice		
	C $0 \div 45 \mu m$	B $45 \div 90 \mu m$	A $> 90 \mu m$
0	50,21	27,5	22,29
5	58,26	27,4	14,34
10	60,90	30,04	9,06
15	65,88	28,7	5,42
20	70,87	25,12	4,01
25	73,85	22,78	3,37
30	85,18	12,66	2,16
0	38,06	36,47	25,47
5	66,73	22,23	11,04
10	69,76	22,59	7,65
15	68,9	24,64	6,46
20	73,6	22,93	3,47
25	75,3	22,74	1,96

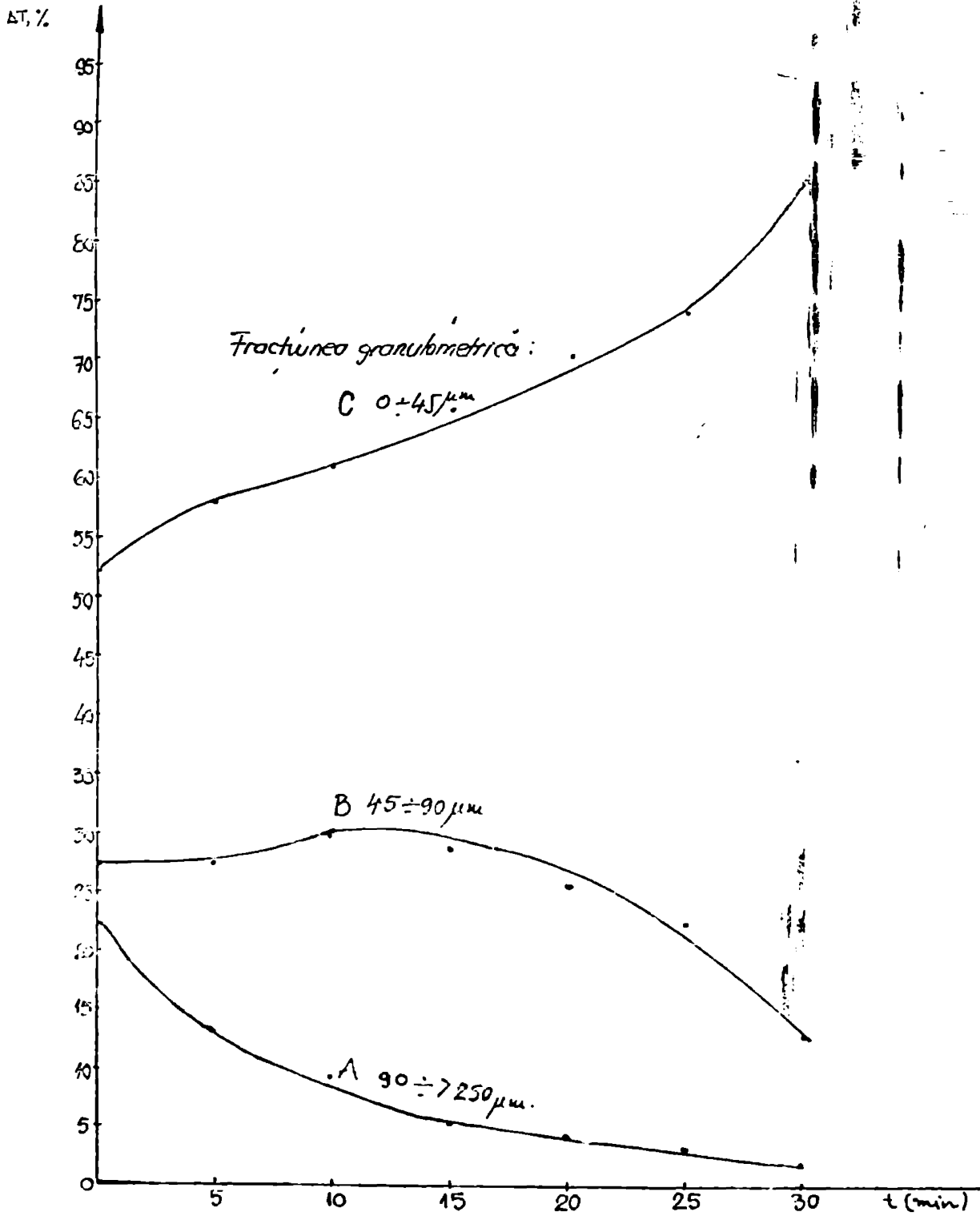


Fig 18 Evoluția în timp a repartiției fracțiunilor granulometrice la măcinarea în roata înclinată (exp 1).

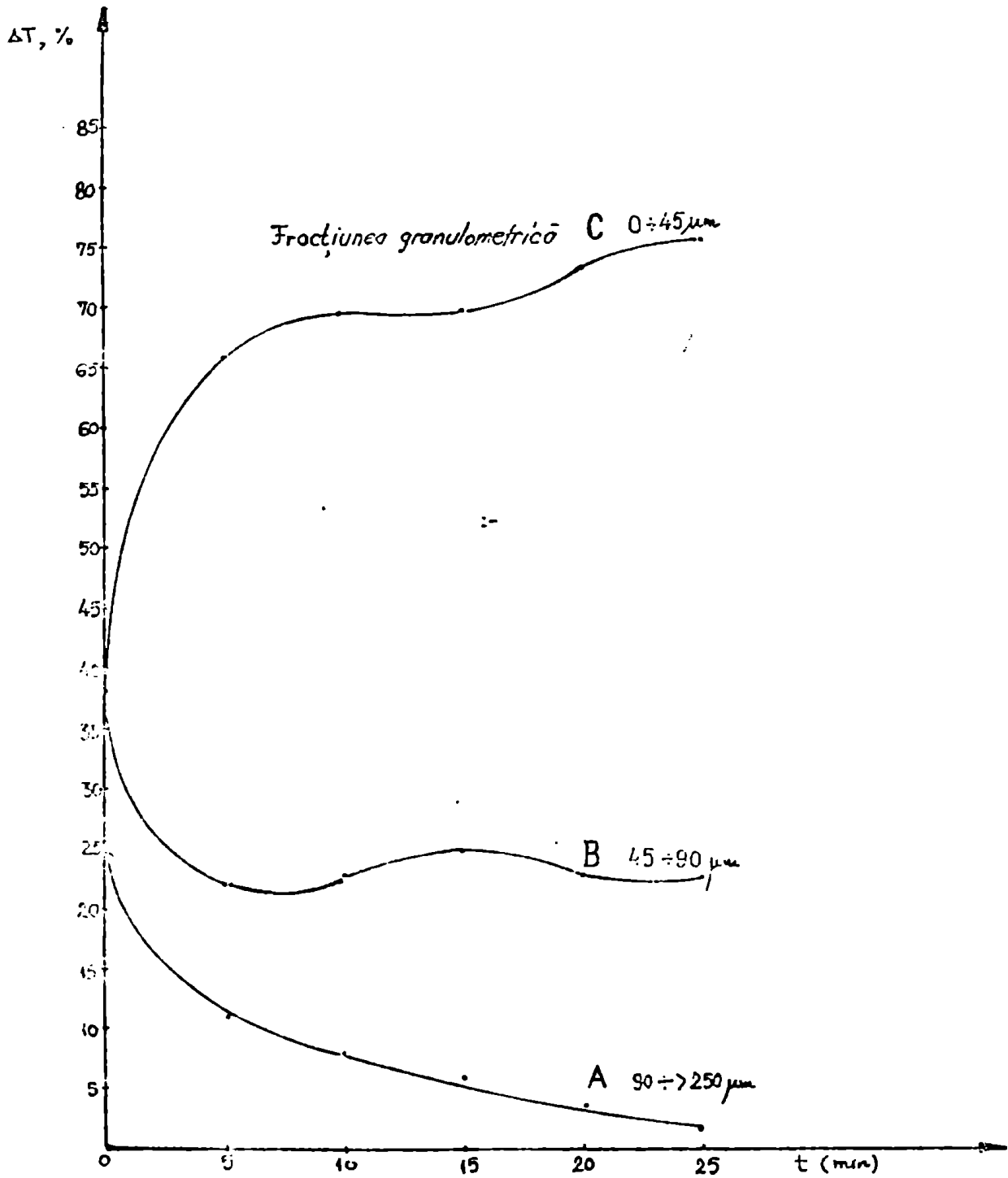


Fig. 10 Evoluția în timp a fracțiunilor granulometrice ale dinococului la măcinarea în moara înclinată ($\times 2$).

STRUCTURA FINĂ A REPARTIȚIEI
GRANULOMETRICE ÎN TIMP LA
MĂCINAREA ÎN MOARA ÎNCLINATĂ

TIMP DE MACINARE (min)	FRAȚIUNI GRANULOMETRICE							
	0 ÷ 45 μm	45 ÷ 63 μm	63 ÷ 90 μm	90 ÷ 125 μm	125 ÷ 160 μm	160 ÷ 200 μm	200 ÷ 250 μm	> 250 μm
0	50,21	14,02	13,48	12,15	5,88	2,86	1,05	0,35
5	58,26	12,85	14,54	10,42	1,97	1,43	0,27	0,23
10	60,9	16,96	13,05	7,12	1,22	0,51	0,1	0,11
15	65,88	16,85	11,87	4,26	0,5	0,42	0,11	0,21
20	70,87	16,21	8,91	2,82	0,38	0,41	0,13	0,27
25	73,85	14,03	8,75	1,98	0,32	0,37	0,16	0,54
30	85,18	4,1	8,55	1,42	0,18	0,2	0,17	0,19
0	38,06	20,03	16,44	16,27	4,58	3,6	0,62	0,4
5	66,73	14,15	8,08	8,72	1,45	0,69	0,14	0,04
10	69,76	7,57	15,02	6,4	0,42	0,71	0,06	0,06
15	68,9	14,32	10,32	5,42	0,62	0,29	0,08	0,05
20	73,6	14,73	8,2	3,07	0,15	0,11	0,07	0,07
25	75,3	15,85	6,89	1,58	0,1	0,1	0,07	0,11

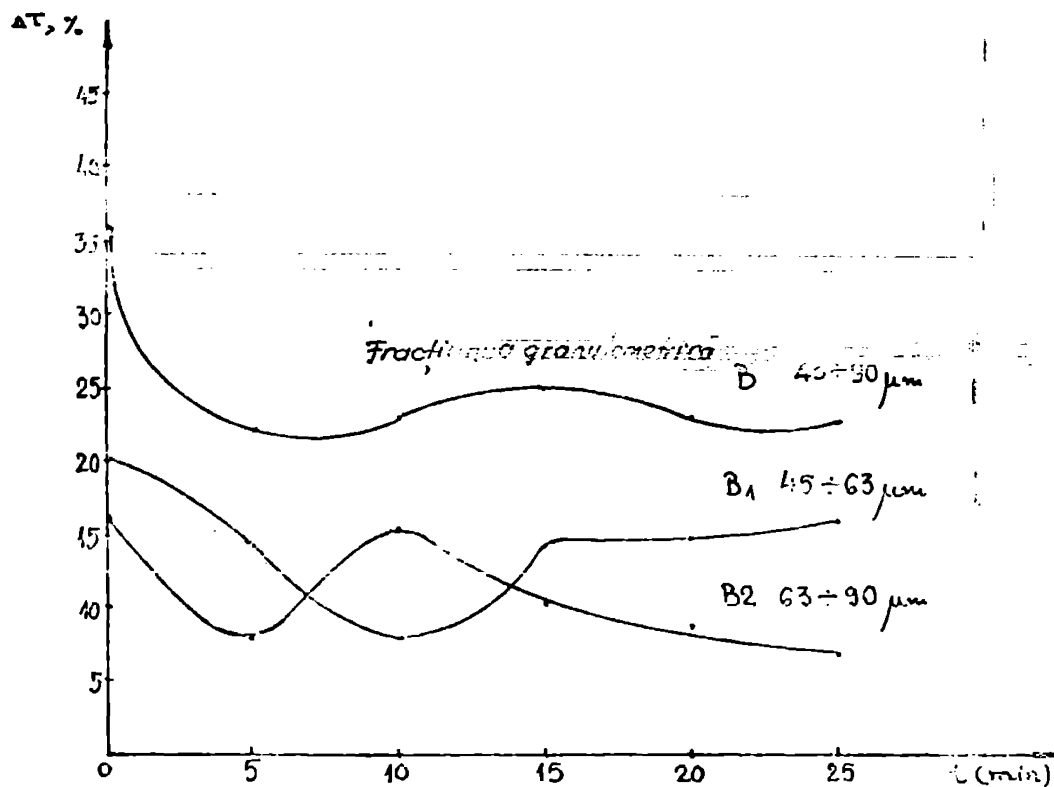


Fig. 20. Evoluția în timp a structurii fracțiunii 45 ÷ 90 μm la măcinarea în moara înclinată (exp 2).

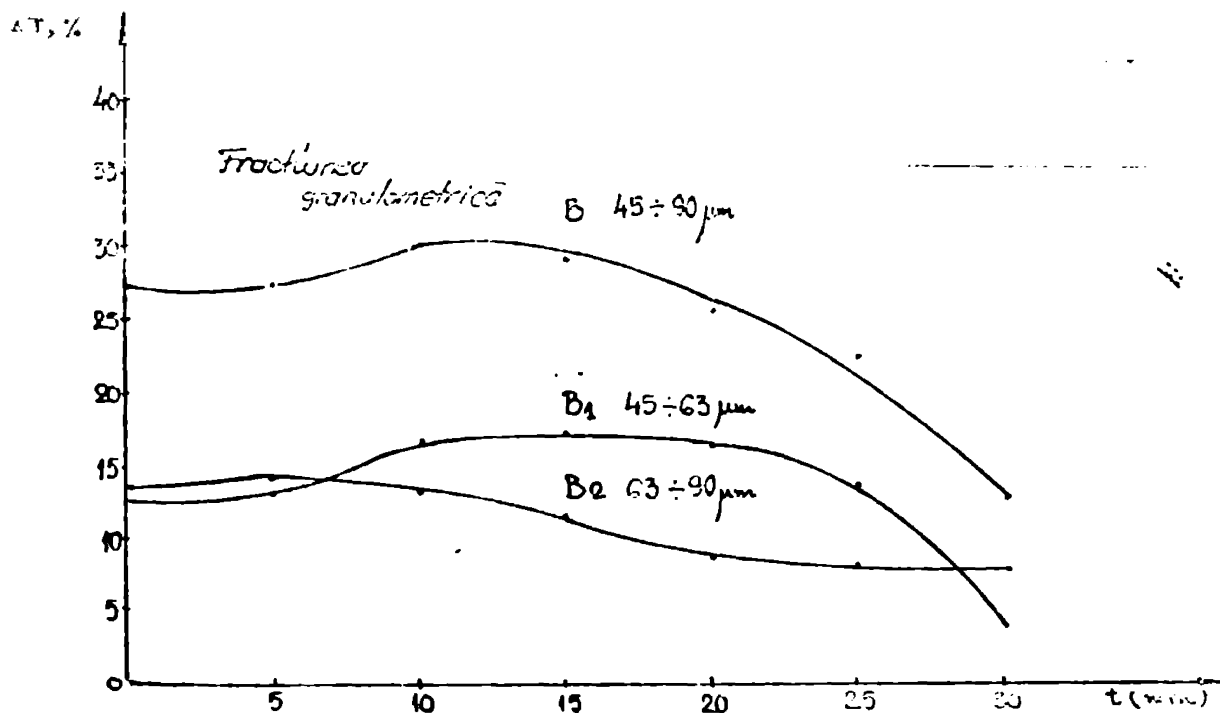


Fig. 21. Evoluția în timp a structurii fracțiunii 45 ÷ 90 μm la măcinarea în moara înclinată (exp 1).

s-a calculat constanta de viteză k_1 cu metoda integrală. Valoarea obținută este :

$$k_1 = k_1^1 + k_1^2 = 0,092 \text{ min}^{-1}$$

Determinarea constantei de viteză s-a făcut din ecuația integrală

$$A = A_0 e^{-k_1^1 t} \quad (22)$$

sare dă valoarea aritetică, iar metode timpilor de înjumătățire, cu relația :

$$T_{1/2} = \frac{1}{k_1} \ln 2 \quad (23)$$

de o valoare apropiată, $k_1^1 = 0,4 \text{ min}^{-1}$.

Se observă de asemenea, deplasarea maximului de "concentrație" de la dimensiuni mari la cele mici, în timp.

Așa cum prevede și modelul propus, adăosul inițial de component intermediar micșorează sau elimină perioada de inducție a variației "concentrației", viteza de formare a materialului fin obținându-se maximă pentru un adăos mai mare de intermediar δ (cazul al doilea).

Fracția fină C, provenind de la uoi intermediari, μ_1 și μ_2 , cu constante de viteză deosebite, evoluează în timp după variația intermediarilor μ_1 și μ_2 , astfel că prima porțiune a curbei este tributară transformărilor fracțiunii $0,3-0,4 \mu_1$ în fracțiunea $0-0,5 \mu_2$, (perioada de inducție, creștere a vitezei, punct de inflexiune, aplatizare), alura celei de-a doua porțiuni fiind identică.

3.3. Concluzii privind modelul cinetic propus

Analiza cineticii măcinării în cadrul experimentărilor efectuate a condus la concluzia că este oportună alimentarea cu o distribuție granulometrică determinată precis.

După cum s-a arătat anterior, pentru acest model cinetic, care reflectă destul de bine fenomenul măcinării, în cazul cunoașterii constantelor de viteză și a energiilor de activare (calculate pe baza solicitărilor la compresiune lentă), se poate determina adăosul optim de material intermediar de dimensiuni, conducând la eliminarea perioadei de inducție la formarea materialului fin și obținerea unei viteze uniforme și maxime pentru acest proces, fapt ce ar avea repercursiuni asupra caracteristicilor tehnico-tehnologice ale morii (ex. scurterea lungimii corbelor morii etc).

Studiul privind cinetica procesului de măcinare evidențiază posibilitatea măririi vitezei de formare a fracțiunii fine, - ceea ce se traduce în economii de energie electrică sau creștere a producției - printr-o selecționare controlată a morii, nu numai din punct de vedere gravimetric ci și din cel al repartiției granulometrice.

Experimentările efectuate, precum și modelele matematice elaborate arată că există o distribuție granulometrică optimă, adică o proporție unică, optimă din punctul de vedere al maximizării vitezei de formare a "finului" și că această proporție poate fi determinată experimental sau analitic.

În cazul concret al exploatarei industriale, această concluzie se traduce prin necesitatea stringentă a păstrării unei proporții fixe între cantitatea de material grosier și cea a con-

tituții de material cu dimensiuni granulare intermediare. De regulă în această postură se găsește "griful", respectiv alimentarea cu material proaspăt o noară.

În consecință, condiție aritată înseamnă impunerea unui valori fixe optime a coeficientului de recirculare a materialului prin noară, definit ca :

$$\gamma = \frac{G}{L} \quad (74)$$

Se poate realiza fie prin reglarea debitului de grif G (înă în relație cu finețea obținută), fie prin reglarea debitului L de alimentare cu material proaspăt. Evident, trebuie respectată imperios, condiția uniformității alimentării sub aspect granulometric.

VIII. CONCLUZII

În cadrul acestei lucrări, s-au urmărit următoarele :

- studiul comportării granulelor de clincher la diferite solicitări (compresione lentă și șoc dinamic);
- studiul repartiției granulometrice rezultate în urma măcinării clincherului în diferite utile de laborator ;
- elaborarea, pe baza datelor acumulate, a unui model cinetic al proceselor de măcinare.

În urma acestor studii și urmărindu-se găsirea unor soluții privind îmbunătățirea parametrilor actualelor instalații de măcinare și conceperea principiilor a unor noi instalații de măcinare, cu randamente energetice superioare la măcinare și cu consumuri energetice scăzute, s-a ajuns la următoarele concluzii :

1. Este nejustificată depășirea unui anumit nivel al ener-

gici de șoc, nivel a cărui valoare depinde atât de granulația materialului cât și de compoziția sa chimică, dar care, în cazul clincherului se situează în jurul valorii de 1,2 km. Analizându-se în continuare comportarea la șoc dinamic a clincherului, s-au stabilit relații analitice între energia de șoc și integrala curbei granulometrice (deci indirect a finității obținute la mărunțire).

4. Pe baza încercărilor la compresiune lentă s-a ajuns la concluzia că poate fi calculată energia utilă necesară pentru mărunțirea prin compresiune lentă, în funcție de dimensiunea granulară a clincherului și de granulația obținută, dacă se dispune de un set de date provenite din încercarea unui eșantion. Energia astfel calculată reprezintă energia maximă utilă necesară mărunțirii. Au fost obținute corelații metastatice între forța de sfărâmare necesară, diametrul granulelor și raportul de reducere, trasându-se diagrame ce pot fi folosite în proiectarea utilajelor de mărunțire.

5. Există pentru fiecare material o distribuție granulometrică diferențială optimă din punct de vedere al vitezei de formare a finului, de alimentare a morii, determinabilă experimental sau analitic dacă se cunosc energiile de sfărâmare a materialului și constantele de viteză de formare și consum a fracțiunilor granulometrice. Această condiție se traduce în păstrarea constantă a unui raport optim cinetic dintre - în cazul unei mori industriale cu recirculare - debitul de grăș și cel de alimentare cu material proaspăt.

6. S-a elaborat un model pentru descrierea cineticii proceselor de mărunțire, care reprezintă o contribuție originală la

descifrarea și modelarea matematică a acestor procese.

2. Pe baza rezultatelor și studiilor întreprinse în cadrul acestei teme de cercetare fundamentali se propun ca direcții de investigație aprofundată, cu aplicabilitate practică, următoarele :

- stabilirea, pe baza mecanismelor investigate în cadrul solicitărilor la compresiune lentă și șoc dinamic, a solicitărilor optime, sau a raportului optim dintre ele, pentru diferite materiale tehnologice și alegerea corespunzătoare a utilajelor de mărunțire ;

- experimentarea industrială a unui nou sistem de reglare a conducerii morilor cu bile, bazat pe menținerea unui raport optim între debitul de apă și debitul de material proaspăt ;

- proiectarea unei instalații de măcinare principial nouă, al cărei caracter de nouitate îl constituie un alimentator-cortator, conform mecanismului cinetic elaborat în cadrul acestei lucrări, care să permită alimentarea morii cu o distribuție granulometrică optimă din punct de vedere a vitezei de măcinare.

B I B L I O G R A F I E

- (1) Schöuert, A. : Zee. G. nr.1/1979
- (2) Aerie, J.P. : Ciments, betons, plâtres, chaux, nr.6/1976.
- (3) x x x : Anuarul statistic al R.S.G.R. pe anul 1984.
- (4) Ciolacu, D. : Mecanica rupei materialelor, Bucuresti, 1977.
- (5) Guillet, R. : Le problème du broyage et son évolution. Paris, 1950.
- (6) Bond, R.C. : Trans. of the Inst. of Chem Engng. vol. 55 nr.2/1957.
- (7) Rose, H.H. : Symposium Zerkleinern, 1971.
- (8) Andreev, G.V. ș.a. : Probleme izmelceni i drobnenie poleznih iscopenih, Moskva, 1961.
- (9) Beko, M. : Zee. G. nr.12/1978.
- (10) Romadin, V.K. : Prepararea prafului de carbune, HIA, 1959.
- (11) Lindeau, R. : Bazele tehnologiei ceramicii și a refractarelor, Ed. tehnică, 1966.
- (12) Bond, R.C. : Pitt and Quarry, nr.1/1962.
- (13) Beko, M. : Principles of comminution, Budapest, 1954.
- (14) Anselm, W. : Zerkleinerungstechnik und Stebb, Düsseldorf, 1949.
- (15) Huber Fann : Revista micelor, nr.2/1962.

- (16) Pankrotov, S.A., U.S.S.R. : Wiss.Ztschr. T.H., Magdeburg, 1965.
- (17) Papadakis, K. : Z.K.G. nr.4/1963.
- (18) Papadakis, K. : Revue des materiaux de construction, nr. 5/1957.
- (19) Bond, F.C. : A.S.M.E., New York, 1952.
- (20) Charles, H.J. : Min. Engineering, New York, 1957.
- (21) Escudero-Sains, J. : Génie chimique, nr.08/1962.
- (22) Rebinder, P.A. : Ind. A.S. (U.S.S.R.) 1941.
- (23) Tanaka, Tatsuo : Ind. and Engng. Chem. nr.4/1966.
- (24) Rittag : Chemische - Ing. Chemie, Berlin, 1935.
- (25) Rebinder, P.A. : Fiziko-tiniceskaja mehanika, Moskva, 1958.
- (26) Knapf, H. : Berg - und Hüttenmännische Zeits., nr.117, 1972.
- (27) Hesse, U. : Z.K.G. nr. 3/1973, nr.1/1979.
- (28) Tillé, R., Panou, J. : Symposium Zerkleinern, 1966.
- (29) Seilich, L., Sebe-rossu, D., Abeler, M. : Cuptoare și utilaje în industria silicțiilor, București, 1973.
- (30) Arbitor, H., Harris, C. U.S.S.R. : Trans. Amer. Inst. Mining. Metallurg. Petroleum Engr. nr. 244/1969.
- (31) Fuerstenau, D.W., Somasundaram, P. : Aufbereitungs-Technik, nr.5/1964.
- (32) Roberts, L.J. : Trans. A.I.M.E. nr. 187/1950.
- (33) Griffith, L. : Canadian Journal of Research, nr.6 sect. A/1945.
- (34) Dredbent, S.R., Calicott, G. : Phil. trans. Roy. Soc. London, nr.249 1956.

- (35) Deloy, R., Bergeson, J. : Proc. 7th Int. Min. Proc. New York, 1954.
- (36) Loveday, B. : J. Min. Inst. in. 68 (p.111-121).
- (37) Larst, E., Priesch, L. : AIME. annu. ext. cover, Map. 70-B-27
- (38) Melisli, S. : Proc. 7th Int. Min. Proc. (Congr. New York 1954.
- (39) Lynch : Mineral crushing and grinding circuits, 1977.
- (40) Retst, E., Leugemann, H. : Chemie - Ing. techn. nr. 9/1952. nr. 1/1952.

