

UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Ingineria Sistemelor Biotehnice
Departamentul de Sisteme Biotehnice



Ing. Dipl. Cristian-Bogdan CIOBANU

Rezumatul tezei de doctorat

***CERCETĂRI PRIVIND PROCESUL DE MĂRUNȚIRE A
CLINCHERULUI ÎN FABRICILE DE CIMENT ÎN
VEDEREA REDUCERII EMISIILOR DE PULBERI***

Conducător științific
Prof. Dr. Ing. Gheorghe VOICU

București (2023)

CUPRINS

Cuvânt înainte	4	5
Listă de notații și simboluri	5	7
Capitolul 1		
1. Importanța temei și obiectivele tezei de doctorat	7	12
1.1. Importanța temei abordate. Considerații generale privind procesul de fabricare a cimentului	7	12
1.2. Aspecte privind protecția mediului în fabricile de ciment	9	16
1.3. Obiectivele tezei de doctorat	11	21
Capitolul 2		
2. Aspecte privind proprietățile fizice ale materiilor prime utilizate în industria cimentului	11	23
2.1. Scurt istoric a cimentului Portland	11	23
2.2. Caracteristicile fizico-chimice și mineralogice ale materiilor prime și auxiliare pentru obținerea clincherului	12	23
2.3. Rețete de fabricație	13	27
2.4. Factorii care influențează procesul de obținere a clincherului	14	30
2.5. Concluzii	14	31
Capitolul 3		
3. Tehnologii și utilaje pe fluxul de obținere a clincherului	15	33
3.1. Schema tehnologică (flux tehnologic) generală de obținere a cimentului	15	33
3.2. Scheme tehnologice de obținere a clincherului	15	40
3.3. Utilaje folosite pe fluxul tehnologic de obținere a clincherului	16	44
3.4. Construcția și funcționarea morilor cu bile pentru mărunțirea clincherului	16	53
3.4.1. Construcția morilor cu bile din industria cimentului	16	53
3.4.2. Regimul tehnologic al morilor de clincher	18	63
3.4.3. Necesarul de putere pentru acționarea morilor tubulare cu bile	20	67
3.5. Concluzii	20	69
Capitolul 4		
4. Stadiul actual al cercetărilor privind procesul de lucru al morilor cu bile din industria cimentului	21	71
4.1. Sinteza cercetărilor teoretice privind procesul de lucru al morilor cu bile din industria cimentului	21	71
4.1.1. Bazele teoretice ale mărunțirii materialului în morile cu bile	21	71
4.1.2. Stadiul actual al studiilor teoretice asupra procesului de lucru al morilor cu bile	23	75
4.1.3. Sinteză privind modelele teoretice utilizate în analiza procesului morilor cu bile	23	83
4.2. Sinteza cercetărilor experimentale pe plan mondial privind procesul de lucru și parametrii morilor cu bile din industria cimentului	24	92
4.2.1. Controlul vibrațiilor unei mori de făină cu modelul fuzzy	24	92
4.2.2. Determinarea corelației dintre consumul specific de energie și vibrația unei mori de făină în industria cimentului	24	95
4.2.3. Efectele turajului morii și al vitezei de separare a aerului asupra performanței unei mori industriale cu bile	24	98
4.2.4. Diametrul optim al bilelor în moară	24	104
4.2.5. Optimizarea performanței morii prin utilizarea de măsurători online ale bilelor și a materialului	24	106
4.2.6. Aspecte privind optimizarea sistemului de control al morilor de ciment	24	109
4.2.7. Proiectarea predictivă a controlerului pentru un proces de măcinare al unei mori de ciment	24	112
4.2.8. Modelarea efectului încărcărilor cu cărbune asupra energiei cinetice a bilelor la morile cu bile	24	114
4.2.9. Modelul dinamic al sistemului de producție al morii cu bile	24	118
4.2.10. Caracteristicile de vibrație ale unei mori cu bile în funcțiune	24	119
4.3. Concluzii	24	123

Capitolul 5	
5.Aspecte si contribuții teoretice privind mărunțirea clincherului in morile cu bile	24 126
5.1.Modelarea matematica a procesului de lucru al morilor cu bile	24 126
5.1.1.Realizarea tehnică	25 128
5.1.2.Parametrii morii de ciment	25 128
5.1.3.Definirea matricei de circulatie a materialului	25 129
5.1.4.Bilantul de materiale pentru instalația de măcinare	25 129
5.2. Simularea cu element finit procesului de lucru al morilor cu bile	29 143
5.3.Concluziile cercetărilor teoretice	31 148
Capitolul 6	
6.Cercetări experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului	31 151
6.1.Obiectivele cercetărilor experimentale	31 151
6.2.Metodica și aparatura cercetărilor experimentale	31 152
6.2.1.Metodica cercetărilor experimentale	31 152
6.2.2.Aparatură și echipamente utilizate în cercetările experimentale de mărunțire a clincherului	33 158
6.3.Materialul supus mărunțirii, caracteristici inițiale și modul de obținere	38 168
6.3.1.Modul de obținere a materialului supus prelucrării	38 168
6.3.2.Caracteristicile inițiale ale materialului supus mărunțirii	38 169
6.3.3.Prelucrarea inițială a materialului supus mărunțirii. Experimente	39 170
6.4.Determinări experimentale privind mărunțirea clincherului cu ajutorul morii de laborator cu bile	41 174
6.4.1.Determinări experimentale privind consumul energetic la mărunțirea clincherului	41 174
6.4.2.Determinări experimentale privind suprafața specifică la mărunțirea clincherului	42 182
6.4.3.Determinări experimentale privind determinarea aptitudinii la măcinare în moara de laborator CEPROCIM S.A. și pe aparatul de laborator Zeisel	43 185
6.4.4.Determinări experimentale după mărunțirea clincherului în morile cu bile privind compoziția mineralogică a acestora prin analize chimice și granulometrie laser	46 202
6.4.5.Determinări experimentale după mărunțirea clincherului cu ajutorul micro – morii de laborator PULVERISETTE 19 și analiza cantitativă a dimensiunii particulelor solide prin cernere uscată cu clasificatorul de site Analysette 3 Spartan	48 209
6.5.Determinări experimentale privind vibrațiile morii cu bile de laborator în diferite variante de lucru	49 215
6.6.Influența parametrilor procesului de mărunțire a clincherului asupra categoriilor de clincher cu dimensiuni mici	51 218
6.7.Determinări experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului în fabricile de ciment	52 222
6.7.1.Aspecte privind determinarea caracteristicilor componentelor cimentului în timpul obținerii acestuia (experimente în fabrici)	52 222
6.7.2.Determinări privind gradul de mărunțire în moara fabricii de ciment	54 226
6.7.3.Determinări privind concentrațiile de particule în suspensie datorate mărunțirii clincherului	56 229
6.8.Concluzii privind cercetările experimentale	58 232
Capitolul 7	
7.Concluzii finale. Contribuții personale. Recomandări și perspective de cercetare	59 236
7.1. Concluzii finale privind cercetările teoretice și experimentale	59 236
7.2.Contribuții personale și originale ale lucrării	60 237
7.3. Recomandări și perspective de cercetare	61 239
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	

CUVÂNT ÎNAINTE

Lucrarea ” *Cercetări privind procesul de mărunțire a clincherului în fabricile de ciment în vederea reducerii emisiilor de pulberi* ” prezintă cercetările experimentale efectuate de autor cu privire la procesul de mărunțire a clincherului și efectele diferiților parametri de proiectare și funcționali asupra modului de funcționare.

Obiectivul principal al cercetărilor experimentale din cadrul acestei lucrări îl constituie analiza procesului de măcinare a clincherului, folosind o moară cu bile de laborator, mărunțirea făcând parte din procesul tehnologic de obținere a diferitelor sortimente de ciment.

O parte a cercetărilor au fost efectuate în cadrul proiectului Be Antreprenor.

În **capitolul 1**, al lucrării sunt prezentate unele considerații generale privind procesul de fabricare a cimentului și aspecte privind protecția mediului în fabricile de ciment, precum și importanța temei și obiectivele tezei de doctorat.

Capitolul 2, prezintă aspecte privind proprietățile fizice ale materiilor prime utilizate în industria cimentului (caracteristicile fizice ale materiilor prime și auxiliare pentru obținerea clincherului, factorii care influențează procesul de obținere a clincherului, diferite tipuri de ciment-rețete de fabricație ale diferitelor fabrici de ciment din România și utilizarea acestora)

În **capitolul 3**, sunt prezentate tehnologiile și utilaje pe fluxul de obținere a clincherului (schema tehnologică general de obținere a clincherului), scheme tehnologice și utilaje de obținere a clincherului, construcția- părțile componente și funcționarea morilor cu bile pentru mărunțirea clincherului, precum și regimul tehnologic al morilor de clincher.

În **capitolul 4**, intitulat: „Stadiul actual al cercetărilor privind procesul de lucru al morilor cu bile din industria cimentului” sunt descrise aspecte asupra cercetărilor teoretice (bazele teoretice, stadiul actual al studiilor teoretice și sinteza privind modelele teoretice utilizate în analiza procesului morilor cu bile) și a celor experimentale, procesul de lucru la scară globală și a parametrilor morilor cu bile din industria cimentului.

Capitolul 5, intitulat: „Aspecte și contribuții teoretice privind mărunțirea clincherului în morile cu bile” descrie pentru început aspecte teoretice privind mărunțirea clincherului în morile cu bile. Toate integrările numerice au fost realizate printr-o metodă explicită Runge-Kutta, calculându-se traiectoriile bilelor în funcție de suprafața umplerii cu bile a morii de ciment. Pentru simularea măcinării clincherului într-o moară de laborator cu bile s-a folosit programul de simulare profesional EDEM 2022.0 de la firma Altair Engineering, Ing.

În **capitolul 6** intitulat: „Cercetări experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului” sunt introduse în primul rând echipamentele și metodele de lucru ale determinării experimentale. Apoi este prezentat materialul supus mărunțirii cu caracteristicile inițiale și modul de obținere. Se trece propriu-zis la determinările experimentale privind mărunțirea clincherului cu ajutorul morii de laborator, a vibrațiilor morii cu bile de laborator în diferite variante de lucru și determinări experimentale în laboratoarele fabricilor de ciment din România privind procesul de mărunțire și caracteristicile materialului în urma mărunții clincherului.

Se face, de asemenea, referire la parametri de evaluare ai procesului de mărunțire efectuat în urma cercetărilor (gradul de mărunțire, timp de mărunțire, suprafața specifică a măcinișului, consumul specific de energie, concentrațiile de particule în suspensie datorate mărunțirii clincherului, etc) și a corelațiilor între parametri care descriu procesul de mărunțire.

Capitolul 7 al lucrării este atribuit Concluziilor generale ale lucrării și contribuțiile individuale la optimizarea procesului de măcinare a clincherului. În plus, sunt evidențiate și aspecte relevante în legătură cu această temă, care pot fi discutate în continuare de alți cercetători.

Autorul apreciază această lucrare care este despre utilizarea morilor tubulare cu bile, o contribuție relativ modestă la optimizarea procesului de măcinare a clincherului .

Listă de simboluri și notații

Capitolul 1 – Importanța temei și obiectivele tezei de doctorat

WBCSD	Consiliului Mondial de Afaceri pentru Dezvoltare Durabilă
HG	Ordonanță de Guvern
APM	Agentia pentru Protectia Mediului
CEN	European Committee for Standardization
ISO	International Organization for Standardization
SA 8000	Social Accountability (Responsabilitate Socială)
BAT-AEL	Cea mai bună tehnologie disponibilă (BAT- Best Available Techniques); Nivelurile de Emisie Asociate (AEL- Associated Emission Levels)

Capitolul 2 – Aspecte privind proprietățile fizice ale materiilor prime utilizate în industria cimentului

C ₃ S	Silicat tricalcic (alit)
C ₂ S	Silicat dicalcic (belit)
C ₄ AF	Alumino-ferit tetracalcic (celit 1)
C ₃ A	Aluminat tricalcic (celit 2)
K	Clincher de ciment Portland
S	Zgura granulată de furnal
Q	Puzolană naturală calcinată(materiale puzzolanice)
V	Cenușa zburătoare silicioasă

Capitolul 3 – Tehnologii și utilaje pe fluxul de obținere a clincherului

D, L	Diametrul interior și lungimea tamburului (Ø,m)
G _b	Greutatea corpurilor de măcinare (kN)
P	Puterea motorului (kW)
Q _m	Debitul masic (t/h)
ρ _v	Densitatea în vrac a corpurilor de măcinare (kg/m ³)
ε _g	Procentajul golurilor
σ _{rc}	Rezistența la compresiune a materialului alimentat
ω	Viteza unghiulară de rotire a tamburului (s ⁻¹)
φ	Gradul de umplere

Capitolul 4 – Stadiul actual al cercetărilor privind procesul de lucru al morilor cu bile din industria cimentului

SEC	Consum Specific de Energie
MIGO	Constrained Integral Gain Optimization
PID	Derivată Integrală Proporțională
E _s	Consumul specific de energie pentru mărunțirea materialului
L ₁	Lucrul mecanic consumat de mașină;
L ₂	Lucrul mecanic consumat în procesul de mărunțire
E _c	Energia cinetică de mărunțire
E	Modulul lui Young (N/m ²)
V	Volumul de alimentare material (m ³)
d _{bo}	Diametrul optim al bilei
x	Dimensiunea granulară
δ _N	Suprapunerea normală a particulelor
k _v	Produsul finit (cimentul)

S_{res} Eroarea reziduală

Capitolul 5 – Aspecte și contribuții teoretice privind mărunțirea clincherului în morile cu bile

X Submulțimea variabilelor independente de intrare (x_1, x_2, \dots, x_n) care caracterizează sistemul

Y Submulțimea variabilelor dependente de ieșire (y_1, y_2, \dots, y_n) care caracterizează sistemul

F Submulțimea funcțiilor

B Vectorul debitelor de combustibil ale căror elemente b_i indică debitul de combustibil introdus în aparatul i

Capitolul 6 – Cercetări experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului

SSB Suprafața Specifică Blaine;

w Consumul specific de energie al morii industriale;

c_1 Indicele de aptitudine la măcinare;

w_1 Consumul specific de energie;

τ Coeficient de corelare;

$R_{009}(R_{90\mu m})$ Reziduu obținut pe sita de 90 μm ;

R Reziduu produsului finit;

W_z Indicele Zeisel de aptitudine la măcinare;

CAPITOLUL 1. IMPORTANȚA TEMEI ȘI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

1.1. *Importanța temei abordate. Considerații generale privind procesul de fabricare a cimentului*

Procesul de mărunțire în actualul stadiu al tehnologiei cimentului este unul dintre cei mai mari consumatori de energie. În fluxul tehnologic de fabricare a cimentului procesele de mărunțire apar în două faze ale sale, și anume: la pregătirea materiilor prime și la obținerea cimentului în morile cu bile. Dat 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 (determinarea consumului energetic al morii de laborator, determinarea suprafeței specifice, determinarea vibrațiilor morii cu bile, etc.).

Procesul de mărunțire sau de reducere a mărimii se bazează pe studii probabilistice. Atât alimentarea către mașină, cât și produsul rezultat sunt definite folosind o funcție de distribuție a dimensiunii particulelor, care exprimă probabilitatea prezenței particulelor de o anumită dimensiune într-o probă de material măcinat. Procesul de mărunțire trebuie efectuat în așa fel încât să nu existe modificări nedorite ale materialului prelucrat, cum ar fi impurități sau încălzire excesivă.

Simplificat un flux clasic de fabricare a cimentului este redat în fig.1.1

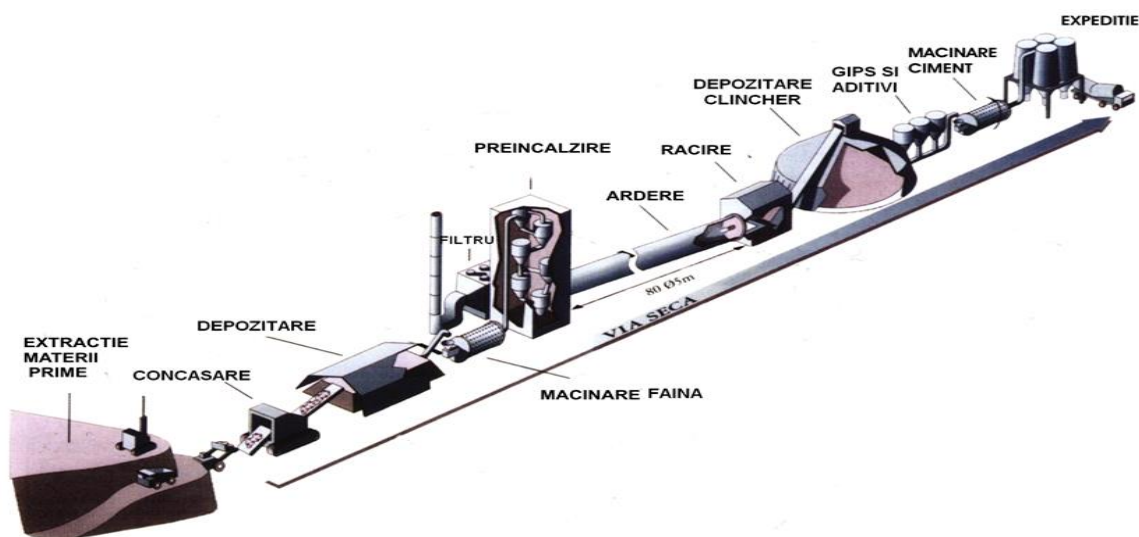


Fig.1.1 Fluxul general de fabricarea cimentului, [78]

Principalele operațiuni (fazele procesului tehnologic) în vederea fabricării cimentului sunt următoarele:

- extracția materiilor prime;
- încărcarea și transportul materialului derocat;
- aranjarea și depozitarea materiilor prime;
- măcinarea și omogenizarea materiilor prime;
- arderea amestecului brut, obținerea clincherului;
- ardere clincher;
- depozitarea și măcinarea clincherului.

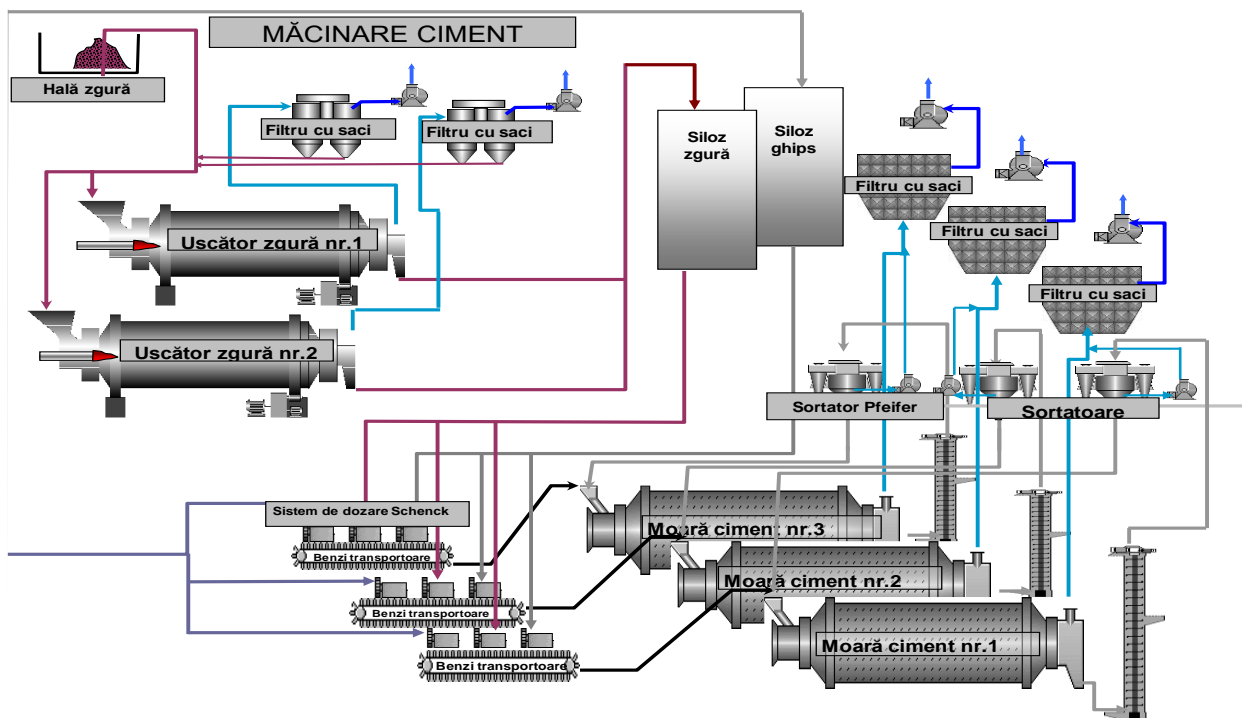


Fig.1.2 Flux măcinare clincher

h) ambalarea și livrarea cimentului

Expediția cimentului din silozuri poate fi încărcat vrac cât și înscăcut. Înscăcuierea se face cu mașini rotative automate, după care sacii sunt aranjați cu mașina de paletizat și înfoliați cu folie din polietilenă, [112].

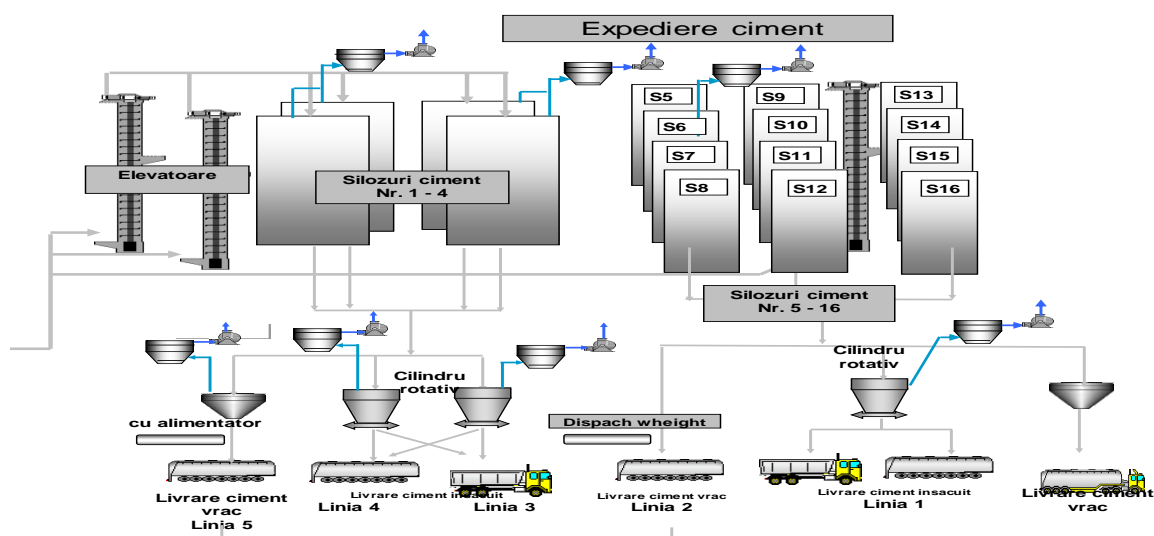


Fig.1.3 Flux ambalare și livrare ciment

1.2. Aspecte privind protecția mediului în fabricile de ciment

Protecția mediului reprezintă o prioritate absolută pentru producătorii de ciment din România, aceștia fiind membri activi ai Consiliului Mondial de Afaceri pentru Dezvoltare Durabilă (WBCSD), [107].

S-au făcut investiții semnificative pentru a se conforma legislației românești cu privire la toate aspectele de mediu precum aer, apa, sol, deșeuri, etc. [107].

Protecția mediului într-o fabrică de ciment presupune respectarea următoarelor etape:

- management de mediu;
- monitorizarea și raportarea factorilor de mediu (emisii, imisii, ape uzate, sol, etc);
- reducerea emisiilor de pulberi- desprăfuire echipamente de producție;
- amenajări și modernizări ale instalațiilor de combustie.

Managementul de mediu constă în următoarele activități:

a) Implementarea și certificarea în fabrică a unui sistem integrat de management Calitate – Mediu-Sănătate și Securitate Ocupațională și un sistem de management al responsabilității sociale conform: ISO 14001, ISO 9001 :2015, ISO 45001 :2018, SA 8000, etc, [112].

b) Derularea de audituri interne și externe conform planificării anuale sau la cerere pentru asigurarea și îmbunătățirea calității activității;

c) Informarea și consultarea partenerilor externi cu care fabrica de ciment are încheiate contracte în vederea derulării- modernizării- asigurarea mentenanței sau achiziționarea de noi echipamente/ utilaje în vederea productivității și a reducerii emisiilor;

d) Sensibilizarea personalului și a subcontractanților cu privire la protecția mediului;

e) Gestiunea eficientă a deșeurilor. Acestea se clasifică și se împart după: tip deșeu, cod, proveniență și modul de stocare. Atașat se descrie un model de gestiune eficientă a deșeurilor (tabel 1.1)

Tabelul 1.1 Modelul gestiunii deșeurilor ,[95]

Nr. crt.	Tipul de deșeu	Cod conform HG.856/2002	Proveniența	Mod de stocare
1.	Deșeuri de hârtie (saci ruți)	15 01 01	Expediție ciment	Magazie deșeuri hârtie
2.	Deșeuri de plastic (folie)	15 01 02	Expediție ciment	Boxe de depozitare
3.	Deșeuri de lemn (paleți)	15 01 03	Expediție ciment	Spații special amenajate
4.	Deșeuri bandă transportoare	07 02 99	Întreținere și demolări	Platforma deșeuri cauciuc
5.	Anvelope uzate	16 01 03	Întreținere	Platforma deșeuri cauciuc
6.	Deșeuri feroase	17 04 05	Întreținere și demolări	Boxe de depozitare

1.2.1. Monitorizarea și raportarea factorilor de mediu

Această monitorizare constă în:

- fixarea de analizoare de gaz pentru controlul eficient al combustiei;
- supravegherea continuă a emisiilor de praf: cuptor, mori ciment, răcitor grătar, mori cărbune;
- monitorizarea permanentă a emisiilor de: NO_x, SO₂, CO, O₂, HF, HCl, NH₃, C₆H₆, COT.

Sistemul automat de măsurare este controlat cel puțin o dată prin măsurători paralele aplicând metode de referință .

1.2.2. Reducerea emisiilor de praf

În industria cimentului, emisiile se ivesc pe tot parcursul procesului tehnologic, de la carieră și până la livrare.

Sursele de poluare directă dintr-o fabrică de ciment sunt supravegheate în funcție de tipul și conținutul emisiilor, așa cum se prezintă schematic în fig.1.7.

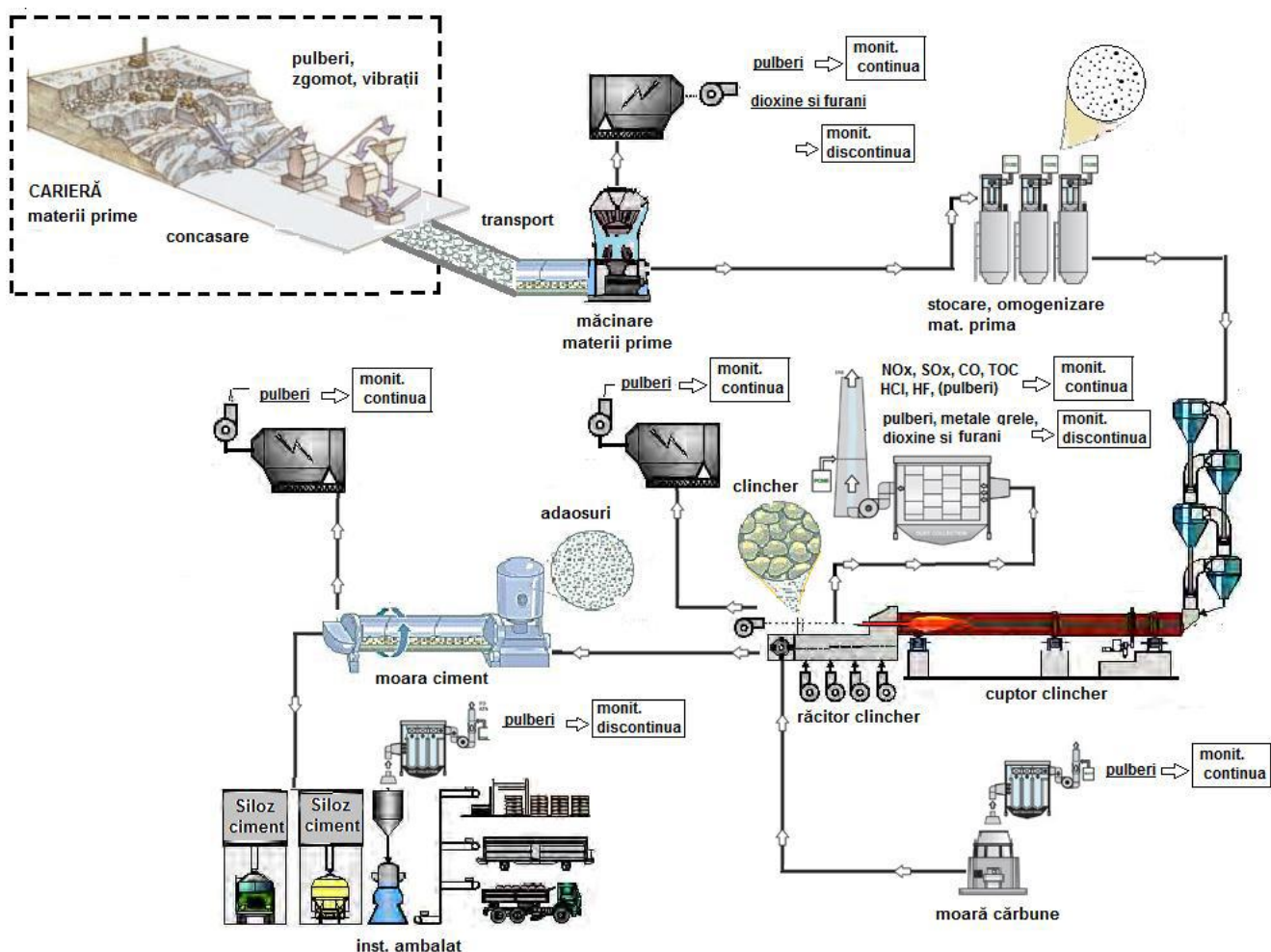


Fig.1.7 Identificarea surselor de emisii în atmosferă și modul de control specifice unei instalații de fabricare a cimentului, [114]

1.2.3. Amenajări și modernizări

Amenajările și modernizările la fabricile de ciment constau în următoarele activități:

- amenajarea de spații verzi;
- sistematizarea încărcării auto a cimentului vrac;
- achiziția de noi utilaje de desprăfuire întrebuințate în procesele de producție, transport și depozitare, pentru reducerea cantității de pulberi eliberate în atmosferă și a emisiilor de gaze de ardere;
- păstrarea resurselor neregenerabile (minerale și combustibili fosili) prin introducerea în procesul de producere a cimentului a combustibililor alternativi;

1.3. Obiectivele tezei de doctorat

Prin măcinare se urmărește funcționarea corectă a proceselor fizico-chimice pe care le induce formarea produsului, [114]. În acest sens **obiectivul principal** al tezei îl reprezintă cercetările privind procesul de mărunțire a clincherului în mori cu bile, în vederea reducerii emisiilor de pulberi.

Obiectivele secundare ale lucrării sunt:

- recunoașterea factorilor care determină procesul de obținere a clincherului;

- analiza construcției și funcționării morilor cu bile pentru mărunțirea clincherului;
- studiul teoretic al regimului tehnologic de lucru al morilor de clincher (grad de umplere, turație, debit, randament, consum energetic, granulație, etc.);
- studiul privind stadiul actual al cercetărilor referitor la procesul de lucru al morilor cu bile din industria cimentului (rezumatul cercetărilor teoretice și experimentale la nivel global privind funcționarea și parametri morilor cu bile din industria cimentului);
- modelarea și simularea cu element finit a procesului de lucru al morilor cu bile;
- elaborarea metodologiei și a aparaturii de experimentare;
- determinări experimentale de laborator privind procesul de mărunțire a clincherului în vederea stabilirii influenței cantității diferite de clincher/corpusuri de măcinare în moară asupra gradului de măcinare și a consumului specific de energie pentru cantități diferite de clincher și bile în moară;
- determinări experimentale privind determinarea aptitudinii la măcinare în moara de laborator și pe aparatul de laborator Zeisel;
- determinări experimentale privind vibrațiile morii cu bile de laborator în diferite variante de lucru;
- determinări experimentale privind procesul de mărunțire și caracteristicile materialului mărunțit în fabrici de ciment din România (determinări privind gradul de mărunțire, suprafața specifică Blaine a măcinșului, consumul specific de energie, concentrațiile de particule în suspensie datorate mărunțirii clincherului);
- stabilirea unor concordanțe între parametri procesului de mărunțire al morilor cu bile, în vederea creșterii calității acestuia (corelația consumului specific de energie cu gradul de mărunțire pentru cantități diferite de clincher și bile în moară);
- stabilirea corelațiilor dintre gradul de mărunțire cu categoriile de măcinș cele mai fine (legătura dintre gradul de mărunțire cu cantitatea de particule mai mici de 1 micron, 5 micrometri și 10 micrometri);
- aspecte privind monitorizarea emisiilor de pulberi de la sursele staționare de emisie (măsurători lunare de pulberi efectuate la coșul morii de ciment cu bile - ieșire moară și ieșire separator) dintr-o fabrică de ciment din România.
- determinări experimentale privind măcinarea clincherului cu ajutorul micro – morii de laborator PULVERISSETTE 19 și analiza cantitativă a dimensiunii particulelor solide prin cernere uscată cu clasificatorul de site Analysette 3 Spartan.

CAPITOLUL 2. ASPECTE PRIVIND PROPRIETĂȚILE FIZICE ALE MATERILOR PRIME UTILIZATE ÎN INDUSTRIA CIMENTULUI

2.1. Scurt istoric a cimentului Portland

Primul care a descoperit cimentul Portland a fost zidarul englez **Jozef Aspdin**. În 1822, în orașul Portland (Anglia), a obținut un material de legare dintr-un amestec de var și argilă arsă până când dioxidul de carbon a fost complet eliminat. În 1824 i s-a acordat un certificat pentru obținerea primului material de lipire, recunoscut ulterior ca tip de ciment, care există și astăzi.

Cimentul Portland se produce prin arderea într-un cuptor rotativ la temperaturi de 1400-1500 °C a unui amestec alcătuit din var, fier, siliciu și alumina (oxid de aluminiu), care se transformă din punct de vedere chimic. Clincherul rezultat, alcătuit mai ales din compuși silicați de calciu și aluminiu, se macină cu mici cantități de sulfat de calciu pentru a obține o pudră cu o finețe de măcinare suficientă. Totodată se îmbunătățește și calitatea cimentului, crește indicele de rezistență, se diversifică sortimentul, se produc diferite tipuri de ciment pentru diverse ramuri ale industriei.

2.2. Caracteristicile fizico-chimice și mineralogice ale materiilor prime și auxiliare pentru obținerea clincherului

Cimentul Portland este rezultatul final al arderii unui amestec de materii prime până se topește parțial. Ingredientele sale includ calcar, argilă de alumina, oxid de fier și oxid de aluminiu.



Fig.2.1 Argilă, [115]



Fig.2.2 Calcar, [115]



Fig.2.3 Marnă, [115]

Pentru diferite produse, cuptorul amestecă un aluat sau o pastă de făină în materiile prime. Acest proces se numește pregătire și are loc în trei etape:

- prepararea amestecului brut;
- arderea clincherului;
- măcinarea clincherului de ciment cu adaosuri, cum ar fi ghipsul sau zgura de cuptor, pentru a produce tipul de ciment dorit

2.2.1. Compoziția chimică a clincherului

Compoziția oxidică normală a unui ciment portland e cuprinsă în următoarele limite:

Tabel 2.1 Compoziția/notația oxizilor din industria cimentului [115]

Oxid	Procent compoziție	Notație
CaO	60 – 67%	C
SiO ₂	19 – 24%	S
Al ₂ O ₃	4 – 7%	A
Fe ₂ O ₃	2 – 6%	F
MgO	4 – 5%	M
SO ₃	Max 3%	S

Pentru a realiza compoziția specificată, materia primă folosită să fie proporție de 75 ÷ 80% CaCO₃ și 25 – 30% SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

2.2.2. Compoziția mineralogică a clincherului

Compoziția minerală a clincherului de ciment Portland poate fi descrisă prin următoarele relații:

$$C_3S + C_2S = 75\% \quad (2.1)$$

$$C_3A + C_4AF = 25\% \quad (2.2)$$

2.2.3. Caracteristici fizico-chimice la prelucrarea termică a clincherului

Calitatea clincherului depinde de compoziția lui chimică și mineralogică. Compoziția chimică se caracterizează cu conținutul în clincher a diferiților oxizi, iar compoziția mineralogică cu raportul de minerali obținuți în urma arderii.

Dintre proprietățile fizice și mecanice ale cimentului, cele mai însemnate sunt:

- Densitatea:** este cuprinsă între $3 \div 3,2 \text{ g/cm}^3$. Determinat prin metoda picnometrului întrebuintând eter de petrol ca fluid de lucru.
- Timpul de priză:** Începutul prizei și sfârșitul prizei sunt termeni folosiți pentru a distinge cimenturile în ceea ce privește viteza de priză.
- Apa de consistență normală:** Apa adaugată în ciment pentru a face mortar sau beton trebuie să ofere amestecului fluiditatea necesară.
- Variația de volum:** Piatra de ciment prezintă fenomene de contracție și dilatare în timpul întăririi. Conținutul ridicat de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S) reduce contracția cimentului.
- Rezistențele mecanice:** Rezistența la compresiune se calculează în mod standardizat pe amestecurile granulare nisip-ciment.

2.3. Rețete de fabricație

Pentru a obține beton de calitate este necesară verificarea calității materialelor utilizate, în special a calității agregatelor, prin achiziționarea din surse certificate, de încredere.

În tabelul 2.3 sunt prezentate tipurile uzuale de ciment folosite.

Tabel 2.3 Tipuri de ciment. Clasificare conform EN 197-1, [118]

Tip ciment	Notarea celor 27 produse (tipuri de cimenturi uzuale)		Compoziție (procente de masă)	
			Componente principale	
			Clincher K	Adaosuri
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-
CEM II	Ciment Portland cu zgură	CEM II/A-S	80-94	Zgură de furnal, S: 6-20
		CEM II/B-S	65-79	Zgură de furnal, S: 21-35
	Ciment Portland cu silice ultrafină	CEM II/A-D	90-94	Silice ultrafină, D: 6-10
	Ciment Portland cu puzzolană	CEM II/A-P	80-94	Puzzolană naturală, P: 6-20
		CEM II/B-P	65-79	Puzzolană naturală, P: 21-35
		CEM II/A-Q	80-94	Puzzolană naturală calcinată, Q: 6-20
CEM II/B-Q		65-79	Puzzolană naturală calcinată, Q: 21-35	
CEM II	Ciment Portland cu cenușă zburătoare	CEM II/A-V	80-94	Cenușă zburătoare silicioasă, V: 6-20
		CEM II/B-V	85-79	Cenușă zburătoare silicioasă, V: 21-35
		CEM II/A-W	80-94	Cenușă zburătoare calcinată, W: 6-20
		CEM II/B-W	65-79	Cenușă zburătoare calcinată, W: 21-35
	Ciment Portland cu șist calcinat	CEM II/A-T	80-94	Șist calcinat, T: 6-20
		CEM II/B-T	65-79	Șist calcinat, T: 21-35
	Ciment Portland cu calcar	CEM II/A-L	80-94	Calcar, L: 6-20
		CEM II/B-L	65-79	Calcar, L: 21-35
		CEM II/ALL	80-94	Calcar, LL: 6-20
		CEM II/BLL	65-79	Calcar, LL: 21-35
	Ciment Portland compozit	CEM II/A-M	80-94	S,D,P,Q,V,W,T,L,LL: 6-20
		CEM II/B-M	65-79	S,D,P,Q,V,W,T,L,LL: 21-35
CEM III	Ciment de furnal	CEM III/A	35-64	Zgură de furnal, S: 36-65
		CEM III/B	20-34	Zgură de furnal, S: 66-80
		CEM III/C	5-19	Zgură de furnal, S: 81-95
CEM IV	Ciment puzzolanic	CEM IV/A	65-89	D,P,Q,V,W: 11-35
		CEM IV/B	45-64	D,P,Q,V,W: 36-55
CEM V	Ciment compozit	CEM V/A	40-64	S: 18-30 P,Q,V: 18-30
		CEM V/B	20-38	S: 18-30 S,P,Q,V: 31-50

2.4. Factorii care influențează procesul de obținere a clincherului

Factorii cei mai importanți care influențează procesul de obținere a clincherului sunt:

- temperatura materialului care trebuie să se mențină între 1450-1500 °C, iar temperatura flăcării să fie de ~2000 °C.

- combustibilii folosiți în industria cimentului din România sunt: păcura, cărbunele, cocsul de petrol, gazul natural, și combustibilii alternativi proveniți din deșeuri, [107].

2.5. Concluzii

La baza procesului de fabricare a cimentului stă obținerea clincherului prin descompunerea materiilor prime (inclusiv decarbonatarea calcarului) până la oxizii de calciu, siliciu, fier și aluminiu și mineralizarea acestora sub formă de clincher. Formarea clincherului este un proces complex, intens energofag.

Acest proces emite în mod inerent CO₂ (gaz cu efect de seră), rezultat atât din decarbonatarea calcarului cât și din arderea în cuptorul de clincher a diverșilor combustibili (tradiționali și alternativi) pentru a obține energia termică necesară. Alte gaze cu efect de seră, cum ar fi metanul și oxidul de azot pot fi emise în timpul producției de ciment, dar importanța lor este scăzută în comparație cu cea a CO₂. Ele pot rezulta din arderea incompletă, emisiile fugare sau alte degajări de gaze sau chiar reacțiile secundare, în special cu azotul din aer. Fiecare moleculă suplimentară de CH₄ sau N₂O din atmosferă blochează mai multe radiații infraroșii decât o moleculă de CO₂. Cu toate acestea, timpul mediu de ședere în atmosferă variază, de asemenea, în funcție de fiecare gaz, cel al unei molecule de metan fiind, de exemplu, mai mic decât cel al CO₂, în special deoarece poate fi oxidat. Clincherul este apoi măcinat împreună cu ghips și transformat în ciment Portland. În Uniunea Europeană, cimentul este produs în principal prin tehnologia modernă „proces uscat”. Aceasta consumă cu aproximativ 50% mai puțină energie decât arderea clincherului într-un cuptor folosind „procedeu umed”.

Fabricile de ciment au extins utilizarea compuşilor minerali în ciment prin dezvoltarea unei game largi de cimenturi compozite cu aplicații din ce în ce mai diverse. Utilizarea acestora în betoane aduce multiple beneficii, dintre care menționăm:

- îmbunătățirea proprietăților betonului proaspăt (lucrabilitate, reducerea segregării, etc);
- pentru betoanele întărite - creșterea rezistențelor finale, scăderea căldurii de hidratare și implicit a tendinței de fisurare ale acestora, creșterea durabilității betoanelor.

CAPITOLUL 3. TEHNOLOGII ȘI UTILAJE PE FLUXUL DE OBTINERE A CLINCHERULUI

3.1. Schema tehnologică (flux tehnologic) generală de obținere a cimentului

Prin revizuirea analizei întregului proces de fabricare a cimentului, începând de la carieră și terminând cu modul de livrare, s-a identificat echipamentele și utilajele specifice fiecărei operațiuni, după cum se arată în tabelul 3.1

Tabelul 3.1. Echipamente și utilaje aferente proceselor tehnologice

Nr.Crt.	Faza tehnologică	Echipamente și utilaje folosite	
1	Extragerea materiilor prime	Excavatoare; Buldozere Perforatoare; Foreze	
2	Mărunțire primară	Concasoare: cu fălci, cu ciocane, cu impact, giratorii, cu valțuri	
3	Măcinare fină	Instalații de măcinare cu recircularea materialelor Instalații de măcinare umedă fără recirculare Instalații de măcinare uscată Mori cu tambur rotativ, mori tubulare cu bare, mori cu role	
4	Instalații de uscare	Uscător tambur, uscător vertical, uscător în pat fluidizat	
5	Instalații de clincherizare	Instalații pentru procedeul umed și semi-umed,	Cu schimbătoare interioare de căldură; Cu schimbătoare exterioare de căldură Cu schimbătoare de căldură în trepte
		Instalații pentru procedeul uscat și semi-uscat	-cu cuptor rotativ și grătar rulant – Lepol -în strat fluidizat; -cu schimbător de căldură în suspensie; -cu cuptor cu schimbător de căldură în suspensie de gaze și schimbător de căldură
6	Instalații de răcire	Răcitoare rotative; răcitoarele planetare; răcitoare grătar; combinate	
7	Instalații de ambalare și livrare	Instalații de livrare a cimentului vrac; Instalații pentru ambalarea cimentului în saci; Mașini de însăcuit liniare și rotative.	

3.2. Scheme tehnologice de obținere a clincherului

Există patru principale procese de producere a cimentului: uscat, semi-uscat, semi-umed și umed. Selecția e în funcție de starea materiilor prime (umedă sau uscată).

a) PROCEDEUL USCAT

Amestecul este introdus în cuptoare rotative scurte cu schimbătoare de căldură exterioare unde materialul este mai întâi în suspensie de aer.

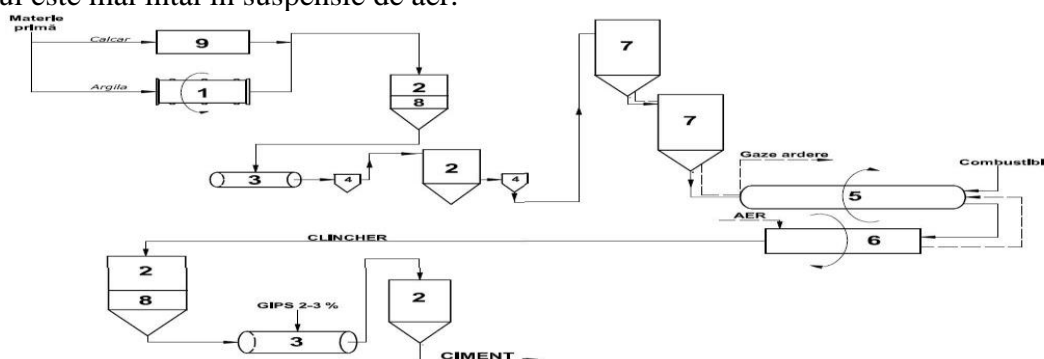


Fig.3.15 Schema tehnologică de fabricare a cimentului Portland după procedeul uscat, [121] unde: 1.uscător; 2.siloz; 3.moară cu bile; 4.compresor; 5.cuptor; 6.tobă de răcire; 7.turn ciclon; 8.dozator; 9.concasor cu ciocane

În procesul uscat, pentru a micșora consumul de gaz metan cu $30 \div 35\%$ s-a atașat cuptorului de ardere o stație de precalcinare unde temperatura materiilor prime ajunge până la 150° , consumând cărbuni inferiori cu putere calorică de $1500 \div 1800$ kcal/kg ($1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$).

b) **PROCEDUL UMED**

Măcinarea umedă a materiilor prime pentru a obține un amestec de materii prime păstoase cu un amestec de apă de $30-50\%$. Cuptorul folosit pentru clincherizare este întreținut cu pasta rezultată în timpul procesului de măcinare.

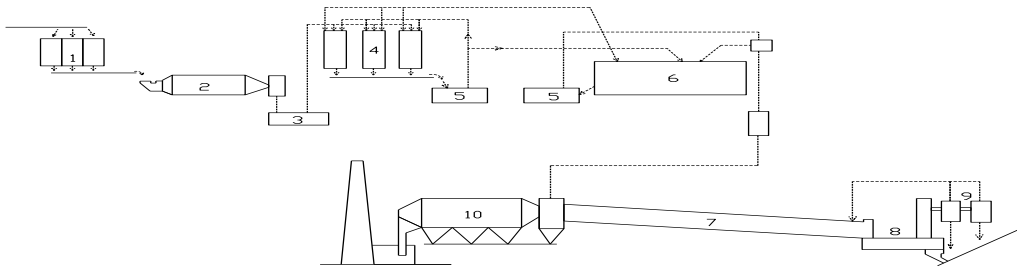


Fig.3.16 Flux tehnologic pentru procedeul umed, [122]

unde: 1. bucăre de alimentare cu materii prime; 2. moară de pastă; 3. pompe de pastă; 4. bazine de pastă; 5. stație de pompare; 6. bazin omogenizare pastă; 7. cuptor rotativ; 8. răcitor clincher; 9. desprăfuire tip multicilon; 10. instalație de desprăfuire.

c) **PROCEDUL SEMIUSCAT**

Materia primă se prepară după o tehnică asemănătoare procedeului uscat. Făina crudă se amestecă cu $8-12\%$ apă și granulele rezultate sunt trimise la cuptor. Arderea amestecului brut se realizează într-un cuptor cu grătar. Acest proces poate fi utilizat atunci când sunt îndeplinite condițiile procedeului uscat, făina având proprietăți bune de granulare.

d) **PROCEDUL SEMIUMED**

Materia primă este măcinată în același mod ca procesul umed. Se filtrează pasta rezultată pentru a îndepărta excesul de apă. Turta rezultată cu un conținut de umiditate de $18 \div 20\%$ se granulează și se introduce într-un cuptor cu clincher. Se utilizează această procedură atunci când suspensia are o bună filtrabilitate.

3.3. **Utilaje folosite pe fluxul tehnologic de obținere a clincherului**

3.4. **Construcția și funcționarea morilor cu bile pentru mărunțirea clincherului**

3.4.1. **Construcția morilor cu bile din industria cimentului**

Morile cu bile cunoscute și sub denumirea generală de mori cu tambur rotativ sunt folosite măcinării în domeniul fin și ultrafin a materialelor moi, cu duritate medie, casante și dure. Se compun în esență dintr-un tambur cilindric sau uneori cilindro-conic, care se învârtă în jurul axului său orizontal. Corpurile de măcinare împreună cu materialul de mărunțit ocupă între 20 și 40% din volumul util al morilor cu tambur.

Principiul de funcționare al morii de ciment este următorul:

- ✓ Materialul este introdus în mod uniform în prima camera a morii cu bile (din oțel sau fonta din aliaj de înalta calitate în proporție de cca. 30%) de către dispozitivul de alimentare prin arborele gol. Prima cameră are căptușeală în trepte sau căptușeală ondulată (blindaje) care este umplută cu bile de oțel de diferite specificații.
- ✓ După ce materialul ajunge la măcinarea brută în prima cameră, acesta intră în a doua cameră prin fanta de transfer cu un singur strat. A doua cameră este încorporată cu o căptușeală plată cu bile de oțel în interior pentru a măcina materialul. Pulberea este eliberată prin conducta de evacuare.

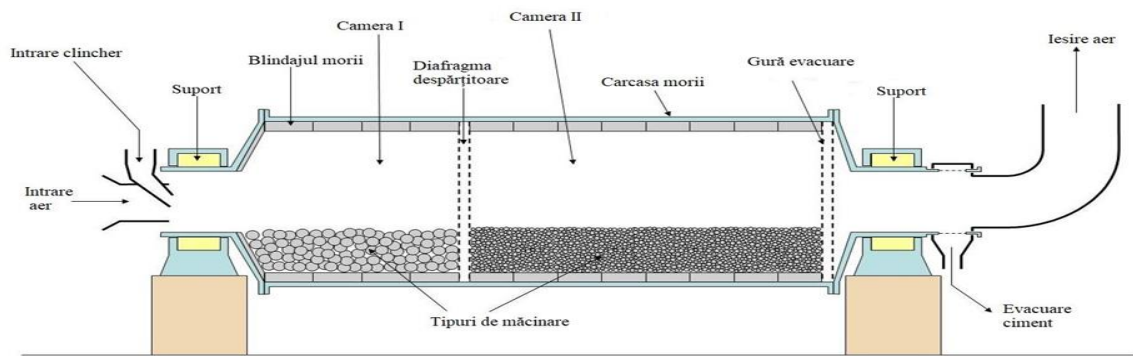


Fig.3.49 Schema morii cu bile folosită la măcinarea clincherului în fabricarea cimentului, [40, 22]

Tehnologia măcinării se bazează pe următoarele observații:

- fracția de dimensiune a particulelor de la 3 la 30 micrometri este ideală la dezvoltarea rezistenței cimentului;
- fracția de dimensiune a particulelor sub 3 micrometri contribuie doar la rezistența inițială; această fracțiune de particule se hidratează rapid și după o zi are ca rezultat cele mai mari rezistențe la compresiune;
- fracțiunea de peste 60 micrometri se hidratează încet și contribuie la puterea cimentului;
- morile tubulare sunt în general echipate cu senzori (de diverse tipuri) care indică gradul de umplere în fiecare cameră.
- ventilarea morii este necesară pentru desprăfuirea și răcirea acesteia;
- în timpul măcinării temperatura materialelor și frecarea dintre corpurile din moară duc la creșterea temperaturii în interior

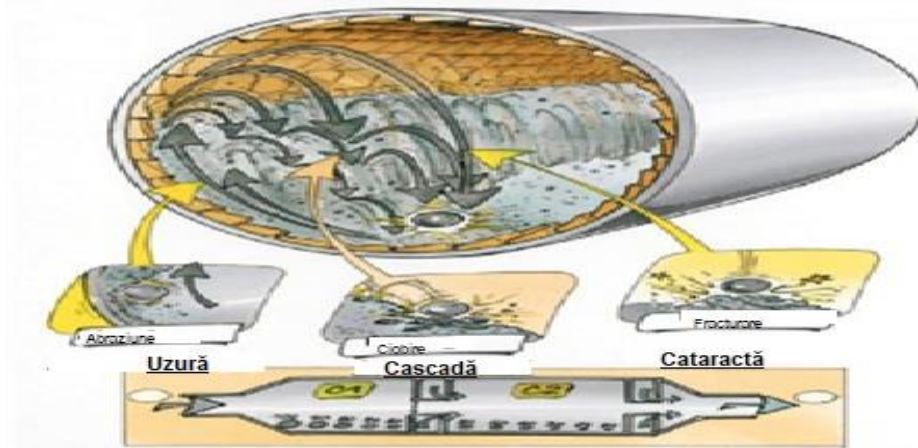


Fig.3.50 Măcinarea clincherului și a adaosurilor, [22, 76]

De aceea cel mai important lucru la măcinare este importanța gradului de umplere a morii. Evacuarea măciniișului (cimentului) se face prin peretele despărțitor situat între cele două camere dar și prin peretele de la ieșirea morii, aceștia fiind prevăzuți cu fante de diferite dimensiuni (fig.3.51). Materialul măcinat, ajuns la granulometria corespunzătoare trece dintr-o cameră în alta și iese din moară prin aceste fante și prin inelul de ventilare.

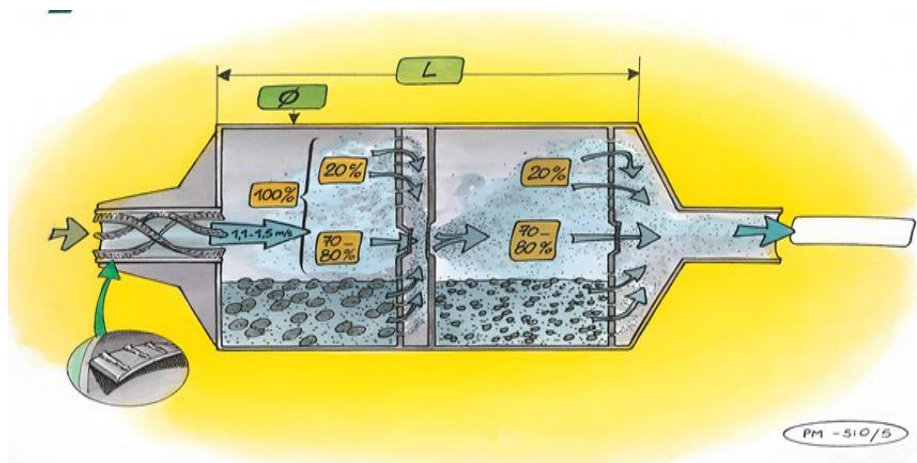


Fig.3.51. Evacuarea macinului(cimentului), [22,76]

Moara este alimentată continuu, funcționând în circuit închis. Timpul de retenție al materialului în moară diferă în funcție de gradul de măcinabilitate al materialelor care intră în moară (cât de ușor se macină), finețea de măcinare (finețea produsului finit, ciment).

La ieșirea din moară, materialul este preluat de o rigolă pneumatică și transportat la un elevator vertical care printr-o rigolă pneumatică alimentează separatorul dinamic, unde are loc separarea particulelor fine de cele grosiere (fig.3.52). Coada este partea grosieră a materialului de la ieșirea separatorului. Făina este cea mai bună parte a materialului la ieșirea din separator, în acest caz, produsul finit, adică cimentul.

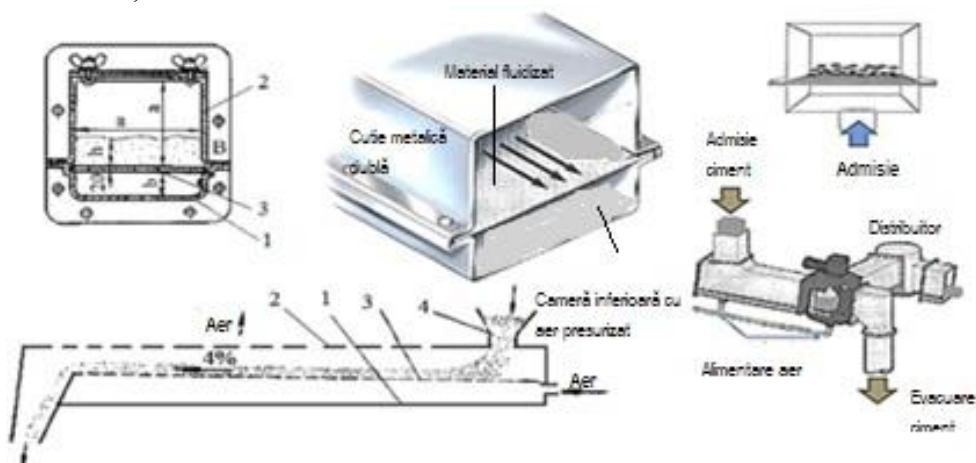


Fig.3.52. Separator dinamic, [138]

unde: 1. cameră inferioară; 2. camera de susținere; 3. țesătură cu membrană ; 4. alimentator

3.4.2. Regimul tehnologic al morilor de clincher

Comportarea corpurilor de măcinare în tamburul de măcinare este definită de două mărimi: gradul de umplere în care corpurile de măcinare umplu tamburul și rotația tamburului. În funcție de valorile acestor două regimuri de funcționare, moara cu bile funcționează astfel:

- regim de funcționare în cascadă (funcționare la turație mică);
- regim de funcționare cataracte (funcționare la turație mare, cu căderea bilelor).

În starea de funcționare în cascadă, bilele se ridică la o anumită înălțime de-a lungul traiectoriilor concentrice în tambur, apoi se rostogolesc în stratul paralel inferior al tamburului (fig. 3.53 a).

În starea operativă de cataractă (cu bile care cad), bilele sunt introduse în tambur de-a lungul unor traiectorii circulare concentrice până la o anumită înălțime, de unde cad, urmând o traiectorie

parabolică, în partea inferioară a tamburului (fig. 3.53b). În practică cel mai utilizat este regimul de funcționare în cataractă.

Când tamburul morii se rotește, bilele se ridică la o anumită înălțime împreună cu materialul de mărunțit, iar apoi prin cădere are loc măcinarea prin impact.

Dacă un corp de măcinare de masă m se află la raza r în mișcare de rotație atunci asupra sa acționează forța centrifugă $F_c = mr\omega^2$ și greutatea proprie $G = mg$ (fig.3.55). În punctul de desprindere A, echilibrul de forțe este dat de relația:

$$F_c = G \cos \alpha \Rightarrow mr\omega^2 = mg \cos \alpha \quad (3.2)$$

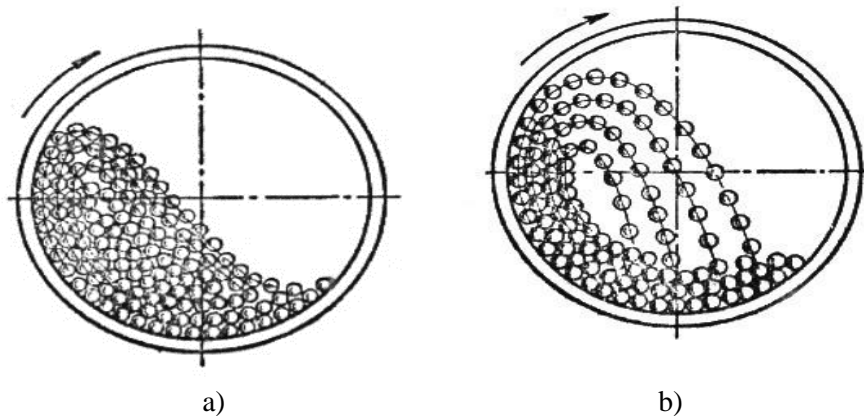


Fig. 3.53 Regimuri de funcționare a morilor cu bile a) în cascadă, b) în cataractă, [37]

de unde rezultă:

$$\omega = \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{r}} \quad (3.3)$$

Dacă se presupune că desprinderea corpului de măcinare de pe suprafața tamburului se face în punctul E, de înălțime maximă, unde $r = \frac{D}{2}$, atunci se obține valoarea vitezei unghiulare critice.

$$\omega_{cr} = \sqrt{\frac{2g}{D}} \quad (3.4)$$

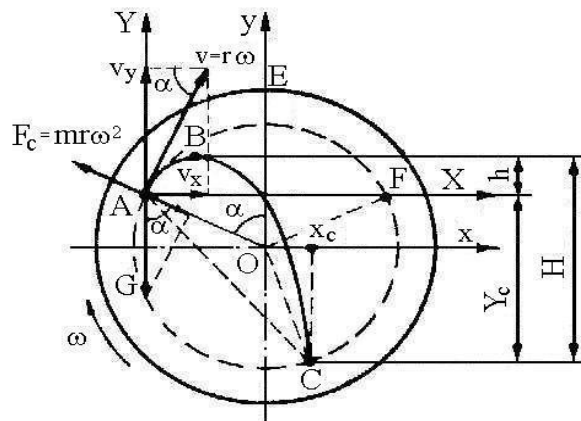


Fig.3.55 Descompunerea forțelor unui corp de măcinare, [37]

Influența gradului de umplere a morii asupra procesului

Gradul de umplere a morii, φ , influențează turația de regim, conform relației:

$$n = \frac{8}{\sqrt{D}} (5\varphi + 2) \quad (3.5)$$

unde: D - diametrul, în m;

n - turația, în rot./min.

Valoarea lui φ se alege astfel încât să nu se producă interferența între materialul care urcă pe arcul CA și cel care cade după parabola ABC (fig.3.56) deoarece acest lucru ar determina un consum crescut de energie fără creșterea eficienței.

Gradul de umplere se definește cu formula:

$$\varphi = \frac{V_u}{V} = \frac{4M}{\rho_v(\pi D^2 L)} \quad (3.6)$$

unde: $\rho_v = \rho(1 - \varepsilon_g)$ este densitatea în vrac a corpurilor de măcinare; ε_g - procentajul golurilor;

Influența masei și dimensiunilor bilelor asupra procesului

Dimensiunile corpurilor de măcinare (bilelor) se iau în funcție de dimensiunile maxime D_{max} ale bucăților supuse mărunțirii. În cazul bilelor se calculează:

- limita inferioară a diametrului bilei d_{bmin} ,

$$d_{b,min} = D_{max} \sqrt{\frac{\sigma_{rc}^2}{1,28E\rho_b g D}} \quad (3.7)$$

unde: σ_{rc} - rezistența la compresiune a materialului alimentat; E - modulul de elasticitate; ρ_b - densitatea bilei; D - diametrul interior al tamburului.

- limita superioară a lui d_{bmax} ,

$$d_{b,max} = \frac{D}{18} \div \frac{D}{24} \quad (3.8)$$

➤ ***Influența diametrului morii asupra procesului***

Debitul morii e în funcție de o serie de factori : diametrul și lungimea tamburului, numărul compartimentelor, construcția diafragmelor, turația, forma și dimensiunile corpurilor de măcinare, caracteristicile mecanice ale materialului de măcinat, gradul de mărunțire, gradul de umplere cu corpi de măcinare și material de prelucrat, etc.

Debitul masic al morii se determină cu relația:

$$Q_m = \frac{1}{\sigma_{rc}} L D M_m [10 + 0,35(x - 10)] \left(\frac{t}{h}\right) \quad (3.9)$$

unde: D și L sunt în metri; M_m - masa corpurilor de măcinare, în tone; x - procente de reziduu.

Relația pentru determinarea puterii necesare este:

$$P_n = k \cdot M_b \cdot D \cdot \omega \quad (3.10)$$

Unde: k - constantă; M_b - masa corpurilor de măcinare.

În cazul în care viteza unghiulară de rotație este cea optimă, se obține:

$$P_n = k \cdot G_b \sqrt{D} \quad (kW) \quad (3.11)$$

unde: G_b - greutatea corpurilor de măcinare, în [kN]; D - diametrul tamburului, în (m); k - constantă ce depinde de gradul de umplere și de natura corpurilor de măcinare

3.4.3 Necesarul de putere pentru acționarea morilor tubulare cu bile

Puterea utilă necesară morii este:

$$N = G \cdot r \cdot \omega = G \cdot R_0 \cdot \omega \cdot \sin\alpha \quad (3.12)$$

unde G este greutatea încărcăturii de măcinare, R_0 este raza care definește poziția centrului de greutate, iar ω este viteza unghiulară de rotație a tamburului.

3.5. Concluzii

Fabricarea cimentului este un proces cu consum mare de energie, care implică o dozare adecvată a componentelor în conformitate cu rețeta de fabricație (clinker, zgură și calcar, gips) și

măcinarea lor în mori tubulare cu bile. În timpul măcinării finale, care trebuie să îndeplinească cerințele privind dimensiunea medie a particulelor și suprafața specifică, se adaugă proporții bine definite de praf de cuptor, precum și praful de filtru obținut în timpul procesului de măcinare și de separare.

Deoarece cimentul poate fi produs în trei moduri (uscat, umed și combinat), echipamentul este achiziționat separat pentru fiecare dintre ele. Prin urmare, trebuie decis mai întâi ce tehnologie se aplică pentru a produce cimentul, iar apoi se achiziționează echipamentele. În țara noastră toate fabricile de ciment funcționează prin procedeul uscat. Metoda uscată este bună deoarece este nevoie de mai puțin cărbune. Din acest simplu motiv devine tot mai răspândit.

CAPITOLUL 4. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND PROCESUL DE LUCRU AL MORILOR CU BILE DIN INDUSTRIA CIMENTULUI

4.1. Sinteza cercetărilor teoretice privind procesul de lucru al morilor cu bile din industria cimentului

4.1.1. Bazele teoretice ale mărunțirii materialului în morile cu bile

Timp de 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.

Academicianul rus **Rebinder** a dezvoltat o formulă generală a relației privind distribuția lucrului mecanic în procesul de mărunțire. Prin urmare, conform teoriei lui Rebinder, consumul specific de energie (exprimat, de exemplu, în kgf.m/cm³) al materialului zdrobit poate fi exprimat ca, [141]:

$$E_s = L_1 + L_2 \quad (4.1)$$

unde: L_1 – lucrul mecanic consumat de mașină; L_2 – lucrul mecanic consumat în procesul de mărunțire.

Fiecare dintre cei doi termeni poate fi descompus:

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{11} + L_{12} \\ L_2 &= L_{21} + L_{22} \end{aligned} \quad (4.2)$$

unde: L_{11} - lucrul mecanic furnizat mașinii pentru deformarea elastică a elementelor ce o compun; L_{12} , L_{22} - lucrul mecanic consumat pentru generarea de noi suprafețe, la elementele active ale mașinii; L_{21} - reprezintă lucrul mecanic necesar deformării elastice a bucății de material, până la rupere;

Pentru valoarea L_2 aparținând materialului, se poate scrie ca:

$$L_{21} = N \cdot k_{21} \cdot \frac{\sigma_r^2}{2E} \quad (4.3)$$

$$L_{22} = k_{22} \cdot \Delta A \cdot \alpha \quad (4.4)$$

Mărimea α se definește ca:

$$\alpha = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^n \quad (4.5)$$

Se ajunge astfel la legea generalizată a mărunțirii:

$$E_s = L_1 + N \cdot k_{21} \cdot \frac{\sigma_r^2}{2E} + k_{22} \cdot \Delta A \cdot \alpha \quad (4.6)$$

În relația (4.6) gradul de mărunțire se regăsește în mărimea α , iar condițiile în care are loc operația de mărunțire în mărimea N și exponentul n .

Randamentul fizic al mărunțirii este:

$$\eta_f = \frac{\sigma \cdot \Delta A}{E_{ef}} \quad (4.7)$$

Cea mai importantă parte a cantității E_{ef} provine din deformarea particulelor individuale și din lucrul mecanic de deformare, care este mărunțită .

Randamentul tehnic este:

$$\eta_f = \frac{\sigma \cdot \Delta A}{E_{totală}} \quad (4.8)$$

Prin urmare, $\eta_t \approx 0,01 \div 0,1\%$.

Charles-Walters a dezvoltat o teorie generală pentru a calcula energiile utile de mărunțire, valabilă pentru orice material de mărunțit, [141]:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{C}{x^m} \Rightarrow dE = -\frac{C}{x^m} dx \quad (4.9)$$

Energia utilă de mărunțire va fi:

$$E_s = \int_0^E dE = -\int_D^d \frac{C}{x^m} dx \quad (4.10)$$

Pentru valoarea $m = 1$ relația de mai sus se integrează și astfel se obține **legea Kick-Kirpicev**:

$$E_s = C_1 \left[\lg\left(\frac{1}{d}\right) - \lg\left(\frac{1}{D}\right) \right] \quad (4.11)$$

Potrivit legii **Kick-Kirpicev** energia necesară pentru mărunțirea unor corpuri identice și omogene variază direct proporțional cu *volumele* sau *greutățile* acestor corpuri.

Legea Kirpicev a fost controlată experimental și s-a constatat o legătură în cazul materialelor de dimensiuni mari dar erori însemnate în cazul materialelor de dimensiuni mici, [141].

Pentru valoarea $m = 2$ din relația (4.10) se obține **legea Rittinger**:

$$E_s = C_2 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (4.12)$$

Potrivit legii Rittinger, energia utilă de mărunțire este proporțională cu creșterea *suprafeței*

Pentru valoarea $m = 1,5$ din relația (4.10) se obține **legea Bond**:

$$E_s = C_3 \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (4.13)$$

Potrivit legii Bond, energia utilă mărunțire este egală cu diferența dintre *energiile* conținute de material după și înainte de mărunțire. Constanta C_3 poate fi pusă sub forma:

$$C_3 = W\sqrt{100} \quad (4.14)$$

Dacă se înlocuiește relația (4.13) în (4.14) se obține:

$$E_s = W \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \cdot \sqrt{100} = W \left(\frac{\sqrt{D}-\sqrt{d}}{\sqrt{D}} \right) \cdot \sqrt{\frac{100}{d}} \quad (4.15)$$

sau:

$$W = E_s \left(\frac{\sqrt{D}}{\sqrt{D}-\sqrt{d}} \right) \cdot \sqrt{\frac{d}{100}} \quad (4.16)$$

Legea Bond are aplicabilitate mai largă decât **legile Kirpicev și Rittinger**. Introducând suprafața specifică, A , este invers proporțională cu pătratul mărimii particulei, relația (4.9) devine, [141]:

$$\frac{dA}{dE} = C_1 \cdot x^\alpha \quad (4.17)$$

Tatsuo Tanaka propune o variantă detaliată a relației mai sus menționate, [141]:

$$\frac{dA}{dE} = K \cdot (P_c) \cdot (P_\sigma) \cdot (P_a) x^\alpha \quad (4.18)$$

unde: P_c - probabilitatea ciocnirii particulelor; P_σ - probabilitatea ca rezistența de rupere a materialului să fie depășită.

Teoria termodinamică a lui Djingenzhian decurge din următorul punct de vedere: suma energiei cinetice necesare zdrobirii materialului și energia calorică internă a materialului mărunțit, care este transformată în lucru util, este o constantă, conform relației, [141] :

$$E_c + Q_{int} = k \cdot Q \quad (4.19)$$

unde: E_c - energia cinetică de mărunțire; Q_{int} - energia calorică internă transformată în lucru mecanic util; Q - căldura care ia naștere în timpul mărunțirii; k - constantă termodinamică ce caracterizează materialul supus mărunțirii.

Teoria liberei mărunțiri a lui Carey și Stairmand începe cu ideea că în timpul mărunțirii, particulelor care suferă mărunțire se aplică o forță externă, rezultând o distribuție a dimensiunii particulelor, a fragmentelor rezultate, caracteristică materialului, care poate fi numită o „distribuție naturală”, [141].

Teoria liberei mărunțiri se poate transpune în relația:

$$E_p - E_m = \eta \cdot E_c \quad (4.20)$$

unde: E_p - energia produsului de mărunțire; E_m - energia materiei prime; E_c - energia consumată de utilajul de mărunțire; η - randamentul energetic al utilajului.

Teoria modelelor a lui Andreasen pornește de la ideea că se poate determina cantitativ variația unei anumite proprietăți a materialului de mărunțit atunci când se schimbă raportul dimensiunilor, [141].

4.1.2. Stadiul actual al studiilor teoretice asupra procesului de lucru al morilor cu bile

Operația de mărunțire este evaluată prin gradul de mărunțire definit de relația, [141]:

$$i = \frac{D}{d} \quad (4.21)$$

unde: D - dimensiunea medie a materialului alimentat; d - dimensiunea medie a materialului mărunțit.

Sinteza cercetărilor teoretice asupra tehnologiei de lucru al morilor cu bile a fost întocmită din traducerea mai multor lucrări de cercetare publicate în reviste și site-uri de specialitate (World Cement, ZKG, Cemento Hormigon, Revista Română de Materiale, Minerals Engineering, Researchgate.net, Energies etc) și cuprinde informații despre :

- a) *Diametrul optim al bilelor în moară*
- b) *Cercetări privind densitatea energiei de măcinare într-o moară cu jet*
- c) *Viteza de măcinare a materialelor din industria cimentului*
- d) *Relații între parametri de finețe ai cimentului Portland*
- e) *Relații între indicii de aptitudine la măcinare și consumul specific de energie electrică al morilor tubulare*

4.1.3. Sinteză privind modelele teoretice utilizate în analiza procesului morilor cu bile

- a) *Modelarea procesului de măcinare cu bile de mare energie*
- b) *Procedură generică de predicție a uzurii bazată pe elemente discrete pentru căptușeli de moara cu bile în industria cimentului*
- c) *Măcinarea în mori cu bile: modelare și control al procesului*
- d) *Modelarea mecanică fină continuă a măcinării într-o moară cu bile*
- e) *Senzor sensibil pentru predicția online a fineței cimentului în morile cu bile*

4.2. Sinteza cercetărilor experimentale pe plan mondial privind procesul de lucru și parametrii morilor cu bile din industria cimentului

4.2.1. Controlul vibrațiilor unei mori de făină cu modelul fuzzy.

4.2.2. Determinarea corelației dintre consumul specific de energie și vibrația unei mori de făină în industria cimentului

4.2.3. Efectele turației morii și al vitezei de separare a aerului asupra performanței unei mori industriale cu bile

4.2.4. Diametrul optim al bilelor în moară

4.2.5. Optimizarea performanței morii prin utilizarea de măsurători online ale bilelor și a materialului

4.2.6. Aspecte privind optimizarea sistemului de control al morii de ciment

4.2.7. Proiectarea predictivă a controlerului pentru un proces de măcinare al unei mori de ciment

4.2.8. Modelarea efectului încărcărilor cu cărbune asupra energiei cinetice a bilelor la morile cu bile

4.2.9. Modelul dinamic al sistemului de producție al morii cu bile

4.2.10. Caracteristicile de vibrație ale unei mori cu bile în funcțiune

4.3. Concluzii

Teoriile de mărunțire au un caracter mai mult sau mai puțin empiric, un domeniu de valabilitate destul de aproximativ și nici una nu poate fi considerate ca lege generală a procesului.

Ele au la bază ipoteze simplificatoare față de fenomenul real al mărunțirii, neținând seama de una sau mai multe din constatările cunoscute sau puse în evidență de practică. Confirmate sau neverificate de experimentări, susținute sau contestate de diverși autori, unele sau altele dintre aceste teorii empirice pot fi totuși utilizate pentru studierea mecanismului mărunțirii;

CAPITOLUL 5. ASPECTE ȘI CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND MĂRUNȚIREA CLINCHERULUI ÎN MORILE CU BILE

5.1. Modelarea matematică a procesului de lucru al morilor cu bile

Descrierea, proiectarea și exploatarea unui sistem tehnologic, deci și a sistemului care definește o instalație de fabricare a cimentului (fig.5.1), se poate face prin modelarea acestuia.

Considerând întreaga instalație un sistem, se pot delimita în principal trei subsisteme pentru a căror definire este necesar să se specifice foarte clar suprafața de delimitare separată de mediu și/sau sistem și interacțiunile dintre acestea.

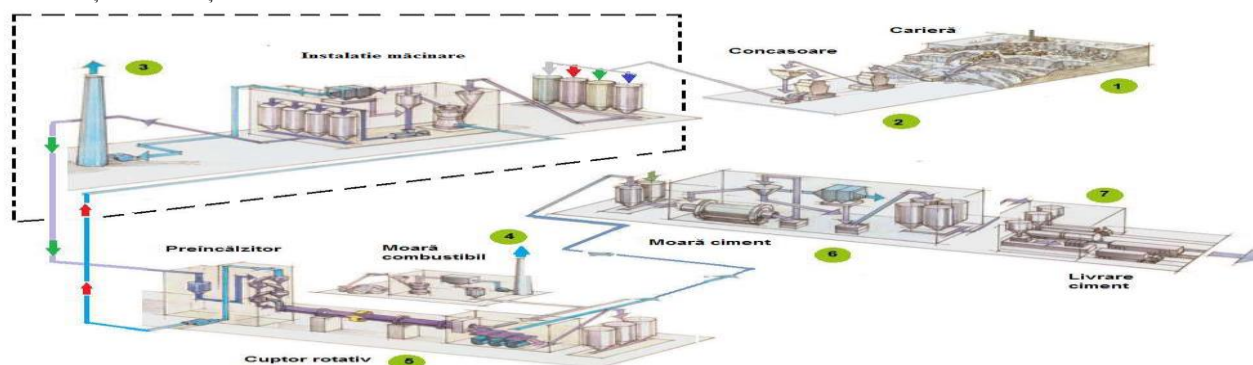


Fig.5.1 Sisteme de fabricare a cimentului: flux de gaz fierbinte amestecat cu particule de material colectate din turnul de cicloane; flux de material, [43]

5.1.1. Realizarea tehnică

Toate integrările numerice sunt realizate printr-o metodă explicită Runge-Kutta. Trebuie calculate și traiectoriile bilelor în funcție de suprafața umplerii cu bile a morii de ciment.

5.1.2. Parametrii morii de ciment

a) *Viteza de rotație*: în modelul matematic se poate schimba viteza de rotație a morii pentru a obține rezultate diferite (ex: traiectorii diferite, energii cinetice diferite ale bilelor).

b) *Volumul suspensiei*: în cazul modelului matematic acest parametru pare să nu fie important pentru energia bilelor care lovesc suprafața morii.

c) *Volumul de bile*: o creștere a numărului de bile ar reduce numărul de bile zburătoare, dar problema care poate să apară este că umplutura ar putea să devină prea grea.

5.1.3. Definierea matricei de circulație a materialului

Conform legii conservării masei, suma tuturor materiei care intră în sistem într-un interval de timp dat și suma materiei prezente la momentul inițial trebuie să fie egală cu materialul eliberat în același interval de timp și cu materialul rămas în sistem.

5.1.4. Bilanțul de materiale pentru instalația de măcinare

Relația pentru conservarea masei și care se exprimă prin ecuația de bilanț a mărimii respective, are următoarea formă generală:

$$\frac{\text{acumulări în sistem}}{\text{unitate de timp}} = \frac{\text{intrări în sistem}}{\text{unitate de timp}} - \frac{\text{ieșiri din sistem}}{\text{unitate de timp}} + \frac{\text{produse în sistem}}{\text{unitate de timp}} - \frac{\text{consum în sistem}}{\text{unitate de timp}}$$

Ținând cont de complexitatea sistemului prin interacțiunile existente între componente, o modalitate accesibilă este de a calcula bilanțurile globale de materiale utilizând relațiile de calcul matricial. Bilanțul de materiale pentru un aparat i al instalației de măcinare este reprezentat schematic în fig. 5.4.

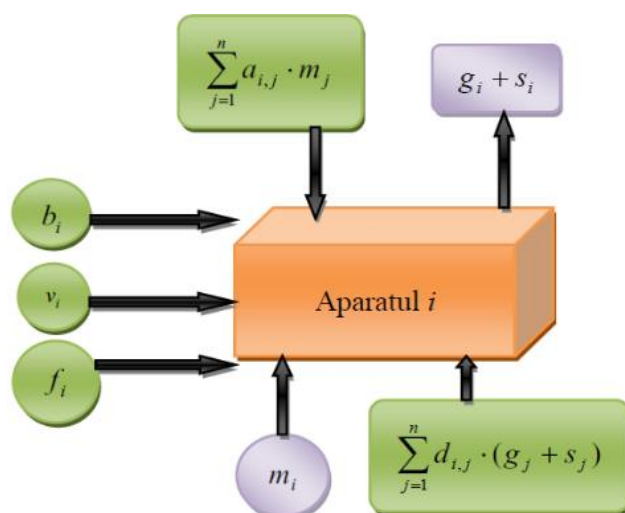


Fig. 5. 4. Schema bilanțului de materiale pentru aparatul i , [40]

Pentru a efectua modelarea matematică a procesului de măcinare a cimentului cu ajutorul morilor cu bile s-a adus probe de ciment de la o fabrică de ciment din România de un anumit tip (CEM II/A-LL 42,5R). S-au obținut următoarele rezultate prezentate în tabelul 5.1

Tabel 5.1 Valori ciment rezultate pe clase granulometrice, [53]

Nr. Crt	Clase granulometrice (diametrul site)	Trecere cumulate[%]														
		Cod probe														
		85	86	87	88	89	95	96	97	98	113	114	115	116	117	118
1	<1 μm	4,9	1,2	1,2	0,4	0,4	4,6	0,4	0,4	0,4	0,4	4,9	0	0	0,4	0,4
2	<1.5 μm	5,7	3,4	2,0	0,8	0,9	5,0	1,2	0,8	0,8	0,8	5,7	0,8	0,4	1,2	0,8
3	<2 μm	6,5	4,7	3,1	1,2	1,3	5,4	2,2	2,0	1,6	1,9	5,7	2,6	1,2	1,8	1,6
4	<3 μm	9,1	6,3	4,3	1,6	1,8	6,6	3,8	3,2	2,4	2,3	6,9	4,2	2,1	2,6	2,4
5	<4 μm	10,7	8,1	5,1	2,0	2,5	9,6	5,4	4,0	3,2	2,7	7,8	5,4	3,3	3,4	3,2
6	<6 μm	15,2	10,5	6,6	2,8	3,8	13,3	9,2	5,5	4,4	4,1	10,2	7,5	4,9	4,8	4,3
7	<8 μm	20,6	12,7	8,2	3,6	5,5	16,6	12,9	7,5	6,1	5,3	14,7	10,0	6,9	6,4	5,5
8	<12 μm	29,2	16,9	10,5	5,7	8,0	23,7	18,4	11,1	8,9	8,4	24,1	15,0	11,1	9,8	8,0
9	<16 μm	35,8	21,6	14,0	9,8	10,5	30,7	23,4	17,0	12,1	11,7	30,6	21,7	15,1	14,2	11,1
10	<24 μm	40,6	30,0	21,0	15,1	15,6	41,5	31,7	25,3	17,8	16,4	44,0	32,5	22,5	20,6	16,7
11	<32 μm	55,1	38,5	28,0	20,8	20,6	54,5	40,9	32,9	23,1	21,8	57,5	41,6	29,9	26,2	22,2
12	<48 μm	69,6	50,3	38,6	29,0	27,4	74,5	54,7	43,2	31,6	31,7	73,8	55,8	40,9	33,8	31,0
13	<64 μm	79,4	58,8	49,1	36,3	35,0	85,3	63,8	52,6	39,7	39,3	83,6	67,5	50,3	41,6	38,1
14	<96 μm	94,6	70,1	60,4	46,1	43,4	98,6	74,7	61,0	48,6	46,3	97,0	78,8	60,5	50,7	45,7
15	<128 μm	98,8	80,4	66,6	53,8	47,6	99,4	86,0	67,3	53,4	50,4	97,8	86,7	69,1	56,7	51,6
16	<192 μm	99,1	84,6	70,1	57,1	50,6	99,8	91,8	71,3	56,7	53,5	97,8	91,7	73,6	60,1	55,6
Reziduu*																
17	>192 μm	1,25	15,4	29,9	42,9	49,4	0,2	8,2	28,7	43,3	46,5	2,2	8,3	26,4	39,9	44,4
Parametrii statistici																
18	D ₅₀ [μm]	27,4	47,7	66,1	118,8	174,9	28,9	42,1	59,3	104,9	127,7	27,25	40,7	64,1	94,0	118,5

Obs: Timpul de sitare la aparat de analiză granulometrică laser CILAS – Delcita sau la aparatul laser Mastersizer 2000E a fost de 60 secunde pe o proba.

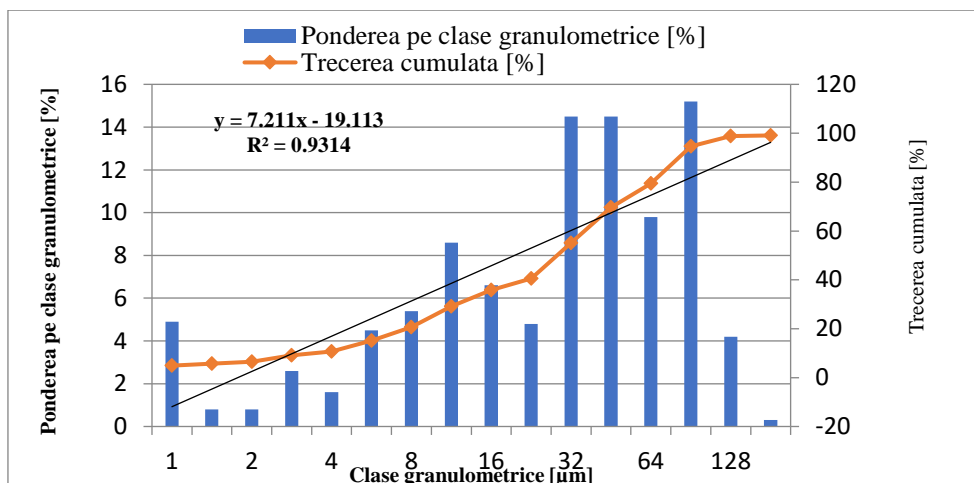


Fig.5.5 Ponderea pe clase granulometrice proba 85

Modelarea procesul de măcinare a cimentului cu ajutorul morilor cu bile s-a efectuat cu ajutorul MATLAB-ului care folosește Symbolic Math Toolbox care este un set de instrumente matematice simbolice pentru crearea și manipularea expresiilor matematice simbolice.

Astfel s-a obținut din probele analizate trecerea cumulativă pe site (fig.5.11)

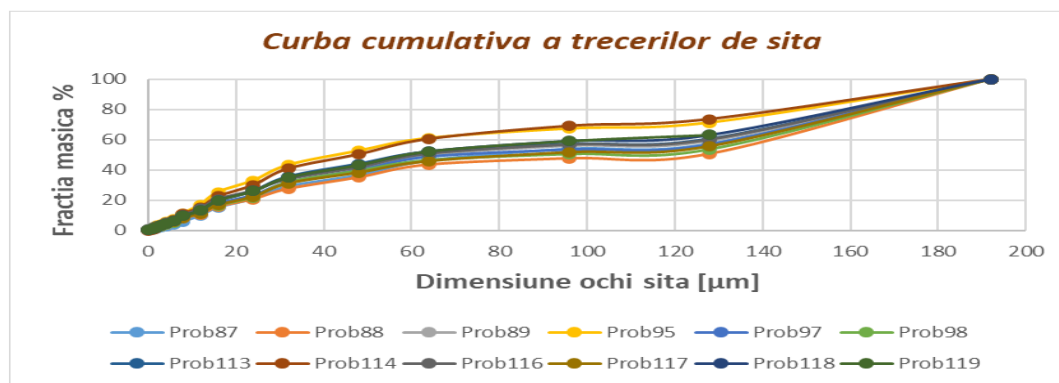


Fig.5.11 Trecerea cumulativa pe site, [53]

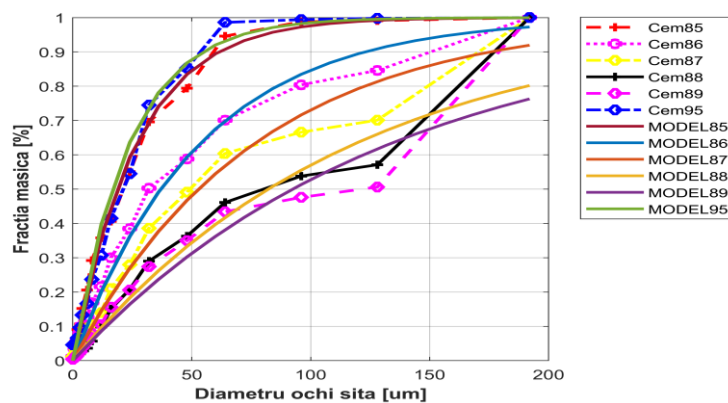


Fig.5.12 Frația masică în funcție de diametrul ochiuri sită

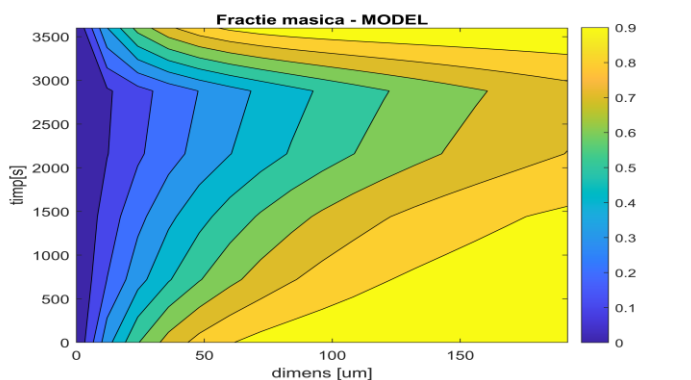


Fig.5.13 Model fracție masică a dimensiunilor particulelor în timp

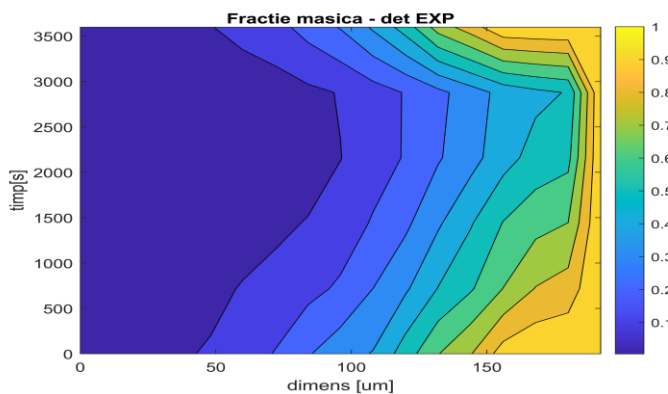


Fig.5.14 Valorile experimentale ale fracțiilor masice

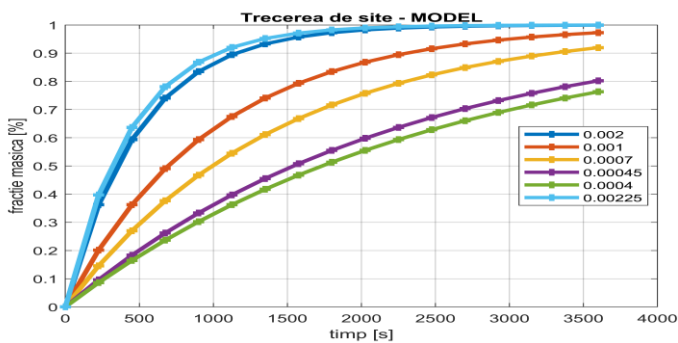


Fig.5.15 Model trecere site în funcție de timp a fracției masice

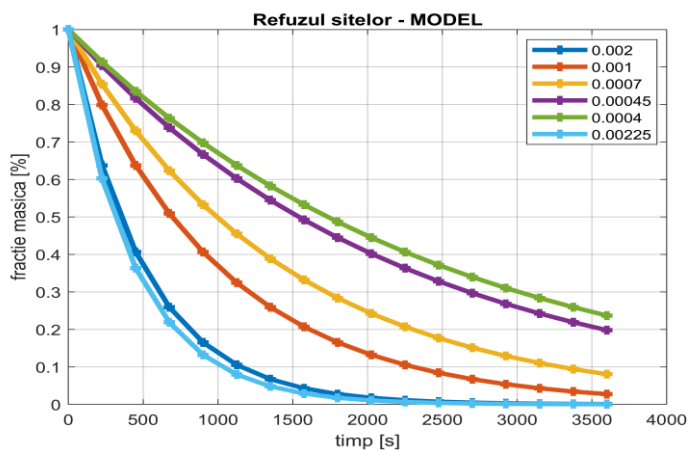


Fig.5.17 Model refuzul sitelor în funcție de timp a fracției masice

5.2. Simularea cu element finit procesului de lucru al morilor cu bile

5.2.1. Propuneri de modele matematice care apreciază procesul de măcinare

Una dintre cele mai utilizate legi de distribuție granulometrică recomandate pentru caracterizarea distribuției granulometrice a cimentului, obținute la morile cu bile și sortate pe fracții în compartimentele de sită plană, este legea Rosin-Rammler, care poate fi exprimată prin una din următoarele relații, [64]

$$R = \exp \left[- \left(\frac{x}{p} \right)^n \right] \quad (5.7)$$

5.2.2. Modele matematice care descriu corelația dintre parametrii procesului de măcinare a clincherului

S-a folosit modelarea matematică a fabricării cimenturilor prin considerarea parametrilor compoziționali și de calitate: chimici, fizici și mecanici ai acestora.

În cadrul tezei, abordarea DEM a fost aplicată într-un mod foarte eșantionat pentru a investiga procesul de măcinare cu bile, inclusiv traiectoria, viteza și distribuția particulelor de pulbere și bile în interiorul morii.

✓ Rezultate simulare DEM

Pentru simularea măcinării clincherului într-o moara de laborator cu bile s-a folosit programul de simulare profesional EDEM 2022.0 de la firma Altair Engineering, Ing.

Etapele construirii unui model sunt: curățarea geometriei (adăugarea componentelor ce vor fi simulate cu caracteristicile lor: bile, clincher), import geometrie; setarea dinamicii elementelor modelului; setarea parametrilor elementelor modelului; setarea parametrilor materialelor vrac.

Mai mult, geometria de proiectare asistată de computer (CAD) utilizată pentru simulările DEM este prezentată în fig. 5.20

Geometria arată regiunile caracteristice ale mișcării sarcinii și variabilitatea stocastică a modelului de curgere a particulelor. Astfel, particulele sunt colorate în funcție de viteza lor. Fig. 5.21 ilustrează diferitele etape ale spargerii particulelor. Distribuția mărimii particulelor este concentrată în principal lângă peretele morii datorită accelerațiilor centrifuge mari cauzate de mișcarea tamburului.

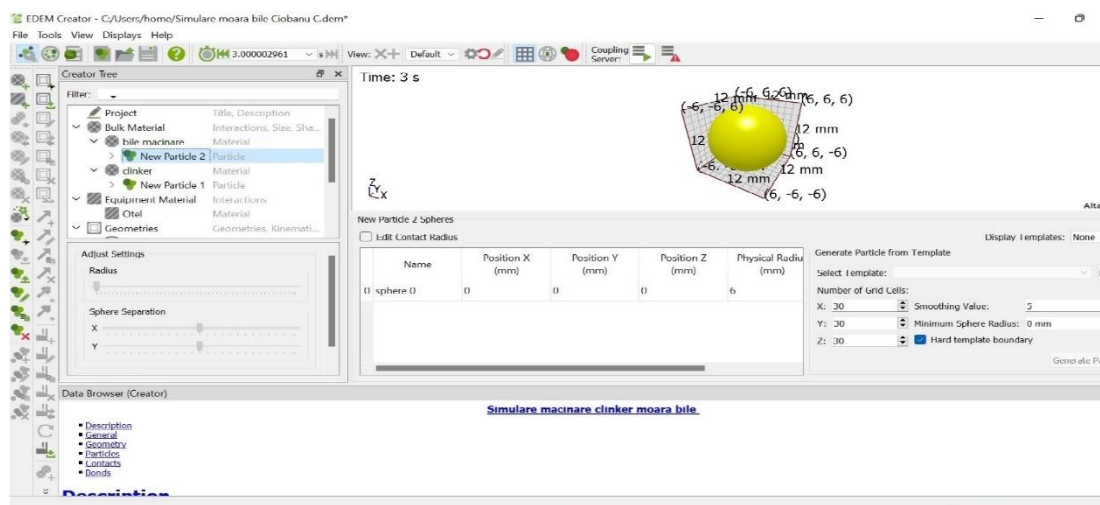


Fig. 5.20 Geometria de proiectare asistată de computer, [19]



Fig. 5.21 Diferitele etape ale spargerii particulelor, [19]

Cu toate acestea, înseamnă că particulele și bilele sunt bine amestecate. Fig.5.21 prezintă particule în mișcare cu viteză ridicată, care produc impacturi de energie mare în timpul procesului de măcinare. Figura 5.22 demonstrează o reducere a numărului de coliziuni și o creștere a magnitudinii acestora.

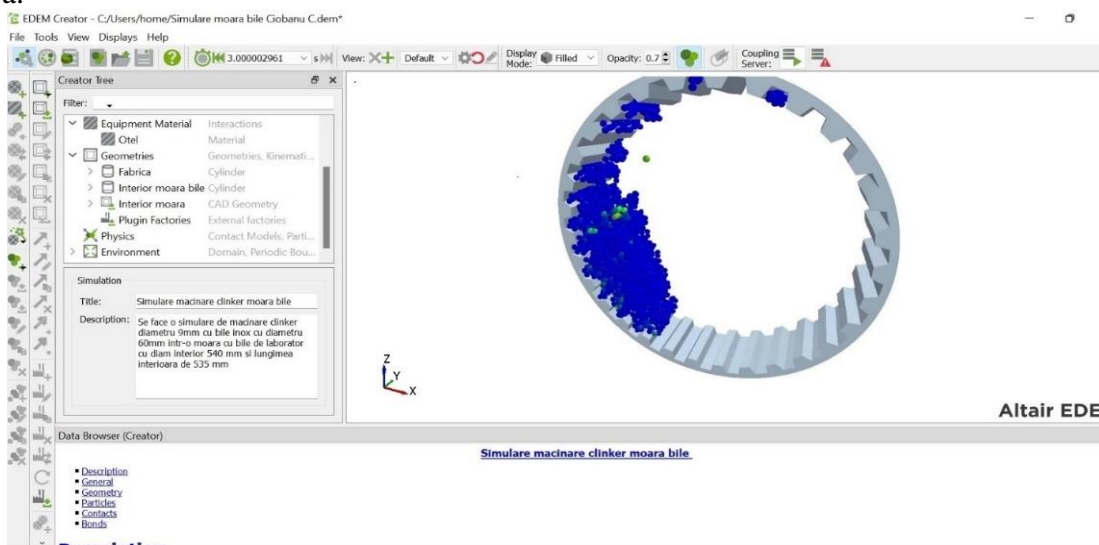


Fig. 5.22 Reducere a numărului de coliziuni, [19]

La sfârșitul simulării (timpul setat pentru simulare) programul se opreste cand ajunge la 100% (fig.5.23).

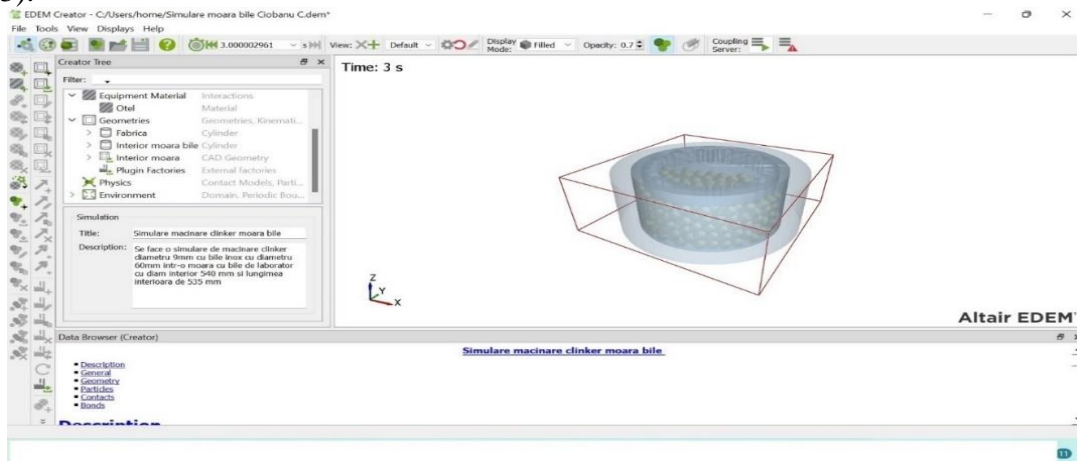


Fig. 5.23 Sfârșitul simulării

5.3. Concluziile cercetărilor teoretice

S-a utilizat programul Matlab pentru calculul traiectoriilor diferitelor straturi concentrice din moara de ciment considerându-se numărul de straturi, turația morii, masa totală a bilelor. Turații diferite conduc la traiectorii diferite și energii cinetice diferite ale bilelor, astfel că se poate trage concluzia că pentru o energie cinetică mai scăzută a bilelor atunci când acestea ating suprafața materialului este bine să se folosească mai multe bile și un volum mai mic de material.

S-au stabilit ecuațiile de bilanț de materiale pe baza unei scheme concepute pentru un aparat de măcinare și, de asemenea, ecuațiile fracțiilor rezultate prin dezintegrare în cadrul aparatului în funcție de dimensiunile inițiale ale particulelor și de timp.

Aceste rezultate ar putea fi utilizate pentru a dezvolta în continuare performanța de sinteză, a anticipa reacția și a reduce uzura în reacțiile de măcinare uscată.

CAPITOLUL 6. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PROCESUL DE MĂRUNȚIRE A CLINCHERULUI

6.1. Obiectivele cercetărilor experimentale

Obiectivul general al lucrării reprezintă cercetările privind **procesul de mărunțire** a clincherului în vederea reducerii emisiilor de pulberi.

Obiectivele parțiale ale cercetărilor experimentale sunt:

- elaborarea metodologiei de experimentare;
- determinări experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului;
- identificarea modelelor matematice care descriu corelația dintre parametrii procesului de măcinare a clincherului;
- stabilirea corelațiilor dintre gradul de mărunțire și consumul de energie specific, cu categoriile de măcinș cele mai fine (1 micron, 5 microni și 10 microni),
- aspecte privind monitorizarea emisiilor de pulberi de la sursele staționare de emisie (măsurători lunare de pulberi efectuate la coșul morii de ciment cu bile - ieșire moară și ieșire separator) dintr-o fabrică de ciment din România

6.2. Metodica și aparatura cercetărilor experimentale

6.2.1. Metodica cercetărilor experimentale

Determinarea aptitudinii la măcinare

S-au folosit 2 procedee de lucru:

- a) Procedeul CEPROCIM S.A. care se bazează pe măcinarea unei șarje de material într-o moară de laborator cu tambur orizontal rotativ în două etape:
 - Prima etapă cu încărcătură de bile;
 - A doua etapă cu încărcătură de corpuri biconice.

Periodic se determină finețea materialului prin reziduul R_{009} și, în cazul cimentului, suprafața specifică. Se consideră încheiată prima etapă atunci când R_{009} este ~35% reziduu (R_{009} -reziduu pe sita de $90\mu\text{m}$). Se determină cu ajutorul unui wattmetru consumul de energie dintre momentele în care se determină finețea materialului (în cazul acesta s-a citit direct consumul de pe contoar). Aceste consumuri se cumulează de la începutul determinării și se raportează la masa șarjei, calculându-se consumul specific de energie w_{li} . Indicele de aptitudine la măcinare este consumul specific de energie w_1 corespunzător unei fineți de referință, [166].

$$c_1 = \frac{w}{w_1} \quad (6.1)$$

Experimental s-a trasat o diagramă a coeficientului de corelare cu morile industriale unde s-a notat cu w consumul specific de energie al morii industriale, în ipoteza acționării prin grup final pinion-coroană dințată și reductor de viteză, incluzându-se și pierderile din motorul electric. Finețea de referință este caracterizată prin $R_{009} = 10\%$ în cazul materiilor prime și $s = 2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ în cazul cimentului.

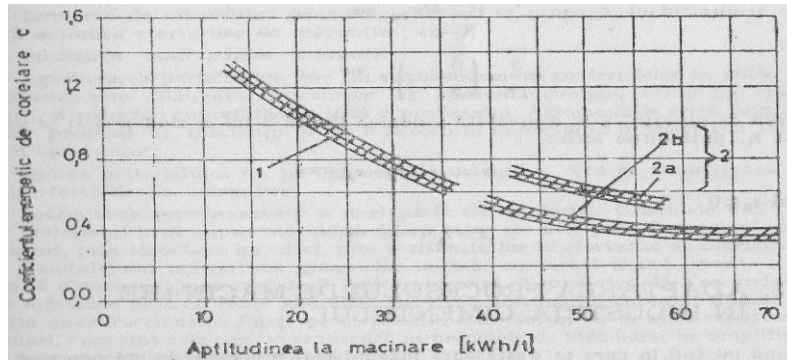


Fig.6.1 Coeficientul de corelare a aptitudinii de măcinare cu morile tubulare industriale, [166]

- b) Procedeul Zeisel prezintă o serie de avantaje față de alte procedee de laborator (cantitate mică de material, valorificare simplă, execuție rapidă).

Indicele Zeisel de aptitudine la măcinare este consumul specific total de energie necesar pentru a obține o anumită suprafață specifică a materialului.

$$W_z = \sum W_i \quad (6.2)$$

Determinarea consumului energetic

Aceste consumuri s-au cumulat de la începutul determinării și s-au raportat la masa sarjei (20 kg de clincher/ fabrică de la 2 fabrici și 20 kg de zgură), calculându-se consumul specific de energie w_{1i} în unitatea de timp prestabilită de 10 minute.

$$\text{Consum energetic} = \frac{\text{Diferența contor [KWh]}}{\text{masa sarja [kg]}} \quad (6.3)$$

S-au trasat curbele $R_{009} = f(w_{1i})$ și $s = f(w_{1i})$. Indicele de aptitudine la măcinare este consumul specific de energie w_1 corespunzător unei fineți de referință.

Determinarea suprafeței specifice Blaine

Suprafața specifică Blaine s-a calculat conform relației (6.4) și este exprimată convențional în cm^2/g , ca fiind:

$$S = \frac{K}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \cdot \eta}} \quad (6.4)$$

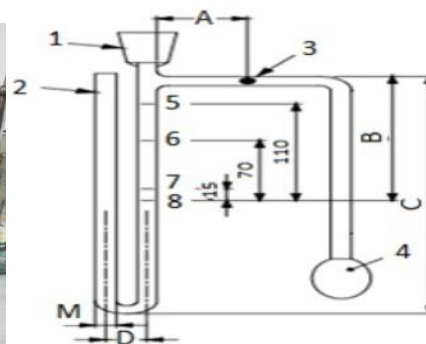


Fig.6.2 Permeabilimetru Blaine, [81, 151]

Determinarea vibrațiilor morii cu bile

Pentru determinarea vibrațiilor morii de laborator cu bile după montarea sensorului la punctul de măsură s-a instalat conform instrucțiunilor de configurare ale sensorului de vibrații QM42VT1 softul dedicat pentru determinarea vibrațiilor cu setările producătorului Banner:

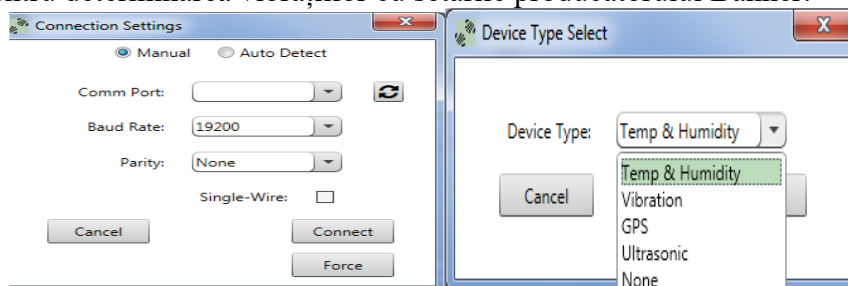


Fig.6.3 Configurare senzor QM42VT1, [146]

Analiza granulometrică laser și analiza chimică

Pentru determinările efectuate s-au folosit următoarele metode de analiză:

- pentru analiza granulometrică laser: ISO 13320:2009; SR ISO 9276-1:2001 [148,149]
- pentru analiza chimică completă: SR EN 196-2:2013 [148].

Metodologie privind determinarea concentrațiilor emisiilor de pulberi totale

Metoda de măsurare a pulberii se bazează pe prelevarea izocinetică a unui volum de gaz din fluxul de gaz rezidual și depunerea de particule pe elementele de filtrare (cartuș de inox umplut cu vată de quartz) și măsurarea gravimetrică la o balanță analitică conform SR EN 13284-1:2018, [140].

6.2.2. Aparatură și echipamente utilizate în cercetările experimentale de mărunțire a clincherului

Pentru efectuarea determinărilor experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului s-au folosit aparatele și echipamentele prezentate în continuare.

- **Aparat pentru mărunțirea materialului supus măcinării** - concasorul cu fălci Retsch BB100 pentru mărunțirea clincherului în vederea trecerii integrale pe sita de 7 mm.

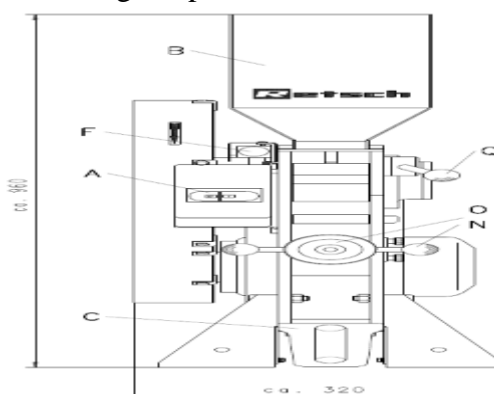


Fig.6.6 Concasor cu fălci Retsch BB 100, [19]



Fig.6.7 Sită măcinare de diametru $\varnothing=7$ mm

Sitele de măcinare se utilizează în laboratoarele fabricilor de ciment și în institute de cercetare la pregătirea probelor pentru măcinarea materialului de o anumită granulație în morile de laborator.

➤ **Moara cu bile de laborator**

Măcinarea s-a realizat în moara de laborator, fără recirculare aparținând CEPROCIM S.A.



Fig.6.8 Moara de laborator cu bile, [19, 21]

1.corp moară; 2.lagăre moară; 3.suportii moară; 4.pinion atac; 5.coroană dințată; 6.lagăr pinion atac; 7-8.roți pentru curele trapezoidale; 9.curele trapezoidale; 10.suport lagăr pentru pinion atac; 11.motor

➤ **Sistemul de determinare și achiziție a consumului energetic la moara cu bile**

Contorul folosit a fost un contor electromecanic de tip watt-oră și determinarea consumului energetic la moara cu bile s-a realizat prin citirea directă de pe contoară a consumului de energie electrică consumată raportată la masa sarjei de clincher sau zgură măcinată.



Fig.6.10 Contor electromecanic

➤ **Aparat de determinare a suprafeței specifice (SSB) permeabilimetrul Blaine**

Pentru determinarea suprafeței specifice (SSB) a materialului mărunțit s-a ales metoda permeabilimetrul Blaine. Procedura Blaine este aplicabilă pentru toate cimenturile definite în standardul EN 196-6 :2018, [151].

- *Aparat pentru efectuarea analizei chimice a materialului măcinat NovAA 400*



Fig.6.17 Aparat analiză chimică clincher NovAA 400

- *Aparate pentru măsurarea granulometriei clincherului Mastersizer 2000E și CILAS – Delcita 715*



Fig.6.18 Aparat analiza granulometrica laser Mastersizer 2000E, [18,152]



Fig.6.19 Aparat analiză granulometrica laser CILAS – Delcita 715

➤ *Aparat pentru microscopie optică Carl Zeiss AXIO IMAGER A1m*



Fig.6.20 Aparat microscopie optică Carl Zeiss AXIO IMAGER A1m

Microscopul optic pentru lumina transmisă și reflectată Carl Zeiss AXIO IMAGER A1m pentru determinarea componenților prin analiză mineralogică pe materii prime naturale: argile, marne, calcare, gresii, tufuri și a produselor sintetice cum ar fi clincherele de ciment.

Aparat pentru determinarea concentrațiilor emisiilor de pulberi totale în morile de ciment

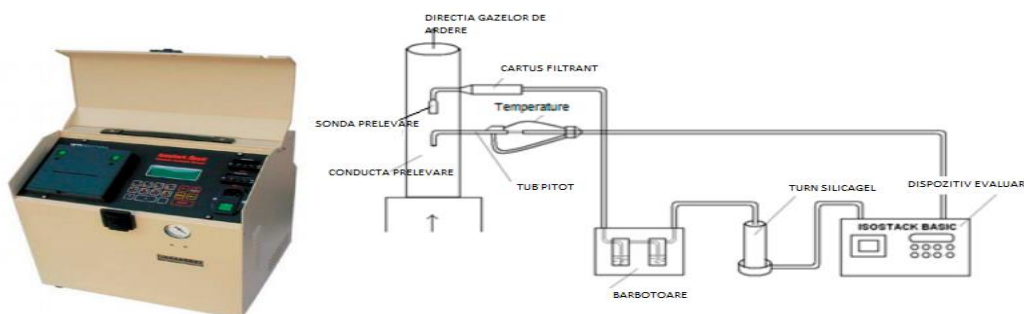


Fig.6.21 Prelevator automat ISOSTACK BASIC HV-TCR TECORA, [16,17]

Sistemul de determinare și achiziție a vibrațiilor morii în timpul măcinării

Pentru determinarea vibrațiilor morii în timpul măcinării s-a folosit senzorul de vibrații și temperatură model: QM42VT1 de la firma Banner conectat la un laptop pentru a înregistra accelerațiile (G) morii din timpul măcinării probelor .

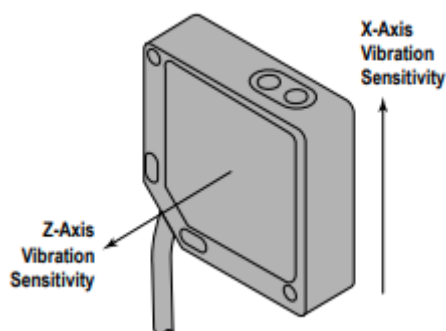


Fig.6.22 Montaj senzor QM42VT1, [146]



Fig.6.23 Senzor QM42VT1, [146]

➤ ***Determinarea aptitudinii la măcinare pe aparatul de laborator Zeisel***



Fig.6.24 Aparat Zeisel pentru determinare aptitudine la măcinare

Presă tip ZD 10/90 (fig.6.26.), pentru solicitarea la compresiune lentă.



Fig.6.26 Presă tip.ZD 10/90, [151]

➤ ***Analiza cantitativă a dimensiunii particulelor solide prin cernere uscată***

Pentru analiza cantitativă a dimensiunii tuturor tipurilor de particule solide și suspensii prin cernere uscată sau umedă cu site de testare dreptunghiulare s-a folosit clasificatorul cu site ANALYSETTE 3 SPARTAN de la firma Fritsch(fig.6.27).



Fig.6.27 Clasificator cu site Analysette 3 Spartan, [162]

➤ ***Cernere și mărunțire într-o singură unitate pentru măcinarea și omogenizarea cantităților mici de probă***

Pulverisette 19 ULVERISETTE 19 este o moară de tăiere universală puternică, cu viteză redusă, pentru măcinarea rapidă, reproductibilă a materialelor și materialelor plastice dure, elastice și sensibile la temperatură, cu o dimensiune maximă de alimentare de 120 x 85 mm și un debit de până la 85 l/h cu o turație mică de rotație de 50-700 rpm și un motor trifazat de 2,8 kW.



Fig.6.28 Micro moară vibratoare PULVERISETTE 19

6.3. Materialul supus mărunțirii, caracteristici inițiale și modul de obținere

6.3.1. Modul de obținere a materialului supus prelucrării

6.3.2. Caracteristicile inițiale ale materialului supus mărunțirii

Materialul ce urmează a fi măcinat în cele 2 instalații de lucru (moară de laborator tip CEPROCIM și aparat Zeisel) trebuie să aibă o granulometrie cuprinsă între 0-7 mm, conform metodologiei de determinare a aptitudinii la măcinare.[166]

Pe parcursul stagiului la doctorat s-au făcut mai multe cercetări experimentale unde s-au folosit mai multe tipuri de materiale și anume:

a) Pentru experimentul nr.1 - măcinare clincher și zgură cu ajutorul morii de laborator cu bile conform metodei CEPROCIM

Pentru realizarea experimentelor s-au utilizat ca materiale: clincher de la două fabrici de ciment din România notate cu Clincher A și Clincher F și zgura granulată de furnal. La momentul inițial efectuării determinărilor probele au fost caracterizate din punct de vedere chimic conform cerințelor SR EN 196-2:2013 - Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 2: Pentru analiza chimică a cimentului [139], clincherul final folosit pentru producerea cimentului de tip: CEM I 42,5 R, care este un ciment Portland cu rezistență inițială mare.

b) Pentru experimentul nr.2 - măcinare clincher cu ajutorul morii de laborator cu bile de diferite dimensiuni în funcție de cantități diferite de material

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat ca material clincher de la o singură fabrică de ciment din România. Clincherul este folosit pentru producerea cimentului de tip: CEM I 52,5 R.

c) Pentru experimentul nr.3 – măcinare clincher cu ajutorul morii de laborator cu bile și cu aparatul Zeisel în vederea determinării aptitudinii la măcinare

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat ca material clincher de la o singură fabrică de ciment din România.

d) Pentru experimentul nr.4 - măcinare clincher cu ajutorul morii de ciment industriale în vederea determinării gradului de mărunțire în moara fabricii de ciment

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat ca material ciment de tipul CEM I 42,5 R de la o singură fabrică de ciment din România.

e) Pentru experimentul nr.5 - măcinare clincher cu ajutorul micro – morii de laborator PULVERISETTE 19 și analiza cantitativă a dimensiunii particulelor solide prin cernere uscată cu clasificatorul de site Analysette 3 Spartan

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat ca material clincher de la o singură fabrică de ciment din România

6.3.3. Prelucrarea inițială a materialului supus mărunțirii. Experimente

Conform metodei CEPROCIM șarja cu corpuri de măcinare, pentru primul experiment, pentru prima etapă de măcinare (grosieră) este:

Tabel 6.3 Incărcătura corpuri de măcinare

Ø[mm] bile de măcinare	65-75	55-65	45-55	Total
G[kg] bile de măcinare	76,90	38,55	28,85	~144,3



Fig.6.29 Bile de macinare de diferite dimensiuni, [19]

Măcinarea finală (a doua fază- cea fină) este etapa de măcinare (grosieră) realizată cu sarcina biconică echivalentă de ~144,3 kg.



Fig.6.30 Biconuri, [19]

După terminarea măcinării clincherul de la ambele probe se încadrua în normele pentru producerea cimentului de tip CEM I 42,5 R.(având suprafața specifică Blaine în jur de 3800 cm²/g), consumul de energie pentru fiecare probă fiind de circa 100 KWh/t.

a) Etapele experimentale pentru primul experiment:

1. S-a cernut pe sita de Ø =7 mm clincherul A (20kg.), apoi materialul rămas pe sită a fost concasat la concasorul cu falci de la firma Retsch (fig.6.6) ;
2. Aceași operație ca la pct.1 s-a efectuat și pentru clincherul F (20kg.);
3. S-a omogenizat conținutul obținut și s-a determinat curba granulometrică;

Tabel 6.4 Cantitatea de material (procent trecere) refuzat pe site de diferite dimensiuni - clincher F

Sită [mm]	Material rămas pe site		T [%]	R[%]
	p[g]	p[%]		
5	140,38	12,79	87,21	12,79
3	215,73	19,66	67,55	32,45
1	204,66	18,65	48,90	51,10
0	536,65	48,90	-	48,90
Total material	1097,42		-	

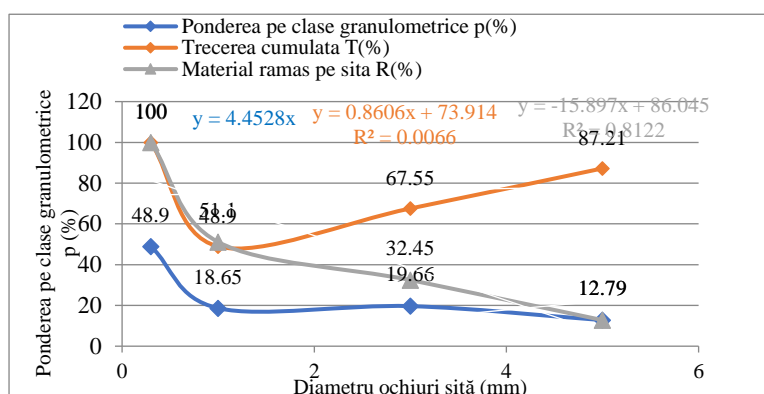


Fig.6.31 Curba granulometrică raportată la cantitatea de material-clincher F

4. După finalizarea individuală a măcinării probelor (clincher F, clincher A) cu biconuri în moara de laborator , s-a prelevat din fiecare probă măcinată - proba medie (reprezintă 7,5 kg clincher măcinat obținut din fiecare probă) circa 50g clincher F și 50g clincher;

5. S-au mojarat fiecare probe de ≈50 g și predate la laborator pentru analiza chimică și microscopie prin analiză granulometrică Laser;

b) Etapele experimentale pentru al doilea experiment:

Incarcătura cu corpuri de măcinare, pentru al doilea experiment în prima fază a măcinării (grosieră) a fost:

Tabel 6.6 Incărcătură corpuri de măcinare

Ø[mm] bile de măcinare	70-65	60	70-65-45	Total
G[kg] bile de măcinare	44	44	44	~132

S-au măcinat diferite cantități de clincher : 5 kg, 10 kg, 13,5 kg, 17 kg și 20 kg. Etapele experimentale inițiale:

1. S-au cernut pe sita de Ø=7 mm, apoi materialul rămas pe sită a fost concasat la concasorul cu falci de la firma Retsch (fig.6.6)

2.Omogenizat conținutul obținut și determinat curba granulometrică.

Tabel 6.7 Cantitatea de material (procent trecere) sitată pe site de diferite dimensiuni

Sită [mm]	Material rămas pe site		T [%]	R[%]
	p[g]	p[%]		
5	399,13	20,50	79,50	20,50
3	599,37	49,60	29,90	70,10
1	230,91	13,20	16,70	83,30
0	245	16,70	-	16.70
Total material	1474.41		-	

3. După finalizarea măcinării probelor cu bile de diferite dimensiuni (Ø70+ Ø65; Ø60; Ø70+ Ø65+ Ø45) mm dar cu masa constantă de 44 kg în moara de laborator , s-a prelevat circa 50g clincher;

4. S-au mojarat proba de ≈50 g și predată la laborator pentru analiza chimică și microscopie prin analiză granulometrică Laser;

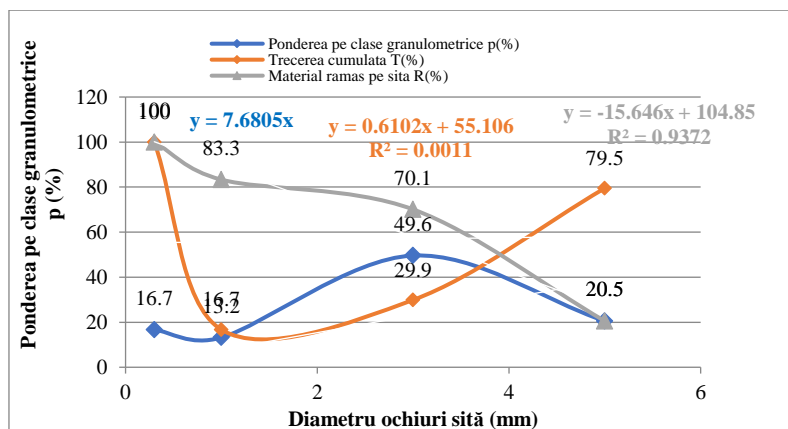


Fig.6.33 Curba granulometrică pe $\text{Ø} \leq 7\text{mm}$ Clincher A

c) Etapele experimentale pentru al treilea experiment:

În cazul determinării aptitudinii la măcinare a clincherului în laborator cu aparatul Zeisel o șarjă de material este de 30 g. În cadrul lucrărilor de laborator a fost pregătită o cantitate de material (clincher) cu o granulometrie cuprinsă între 0,7-1 mm conform metodologiei de lucru al aparatului Zeisel.[166]

d) Etapele experimentale pentru al patrulea experiment

Pentru realizarea experimentelor (determinarea granulometrică prin metoda laser cu aparatul CILAS – Delcita 715) s-a utilizat ca material ciment de tipul CEM I 42,5 R de la o singură fabrică de ciment din România și s-a făcut determinarea componentilor prin analiză mineralogică cu aparatul Carl Zeiss AXIO IMAGER A1m. S-au analizat 24 de probe (25 g/probă) .

e) Etapele experimentale pentru al cincilea experiment

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat ca material clincher de la o singură fabrică de ciment din România.

6.4.Determinări experimentale privind mărunțirea clincherului cu ajutorul morii de laborator cu bile

6.4.1. Determinări experimentale privind consumul energetic la mărunțirea clincherului

Consumul energetic pentru mărunțirea clincherului dintre momentele în care se determină finețea materialului (ea se exprima prin refuzul R (%), cu precizia de 0.1%, pe sita cu diametrul ochiurilor de 90 μm , conform ISO 565) s-a citit direct pe contoar. Aceste consumuri s-au cumulat de la începutul determinării și s-au raportat la masa sarjei (20 kg de clincher / fabrică de la 2 fabrici), calculându-se consumul specific de energie w_{li} în unitatea de timp prestabilită de 10 minute.

$$\text{Consum energetic} = \frac{\text{Diferența contor [kWh]}}{\text{masa sarjă[kg]}} \quad (6.15)$$

Astfel s-au înregistrat următoarele consumuri energetice:

a) pentru Clincher A:

Tabel 6.9 Consumurile de energie raportat la timpul de măcinare - clincher A, [19]

Nr.crt.	Timp măcinare [min]	Consum energetic rezultat [kWh/kg]	Consum energetic cumulat [kWh/kg]
1	10	10,7	10,7
2	20	10,9	21,6
3	30	10,6	32,2
4	40	11	43,2
5	50	11,1	54,3
6	60	11,4	65,7
7	70	11,05	76,75
8	80	11,25	88,00

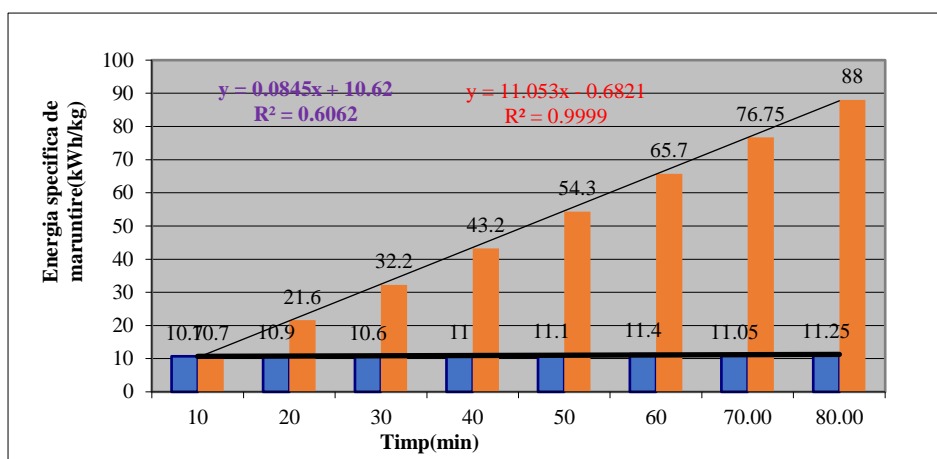


Fig.6.34 Variația energiei specifice de mărunțire clincher A , [19]

6.4.2. Determinări experimentale privind suprafața specifică la mărunțirea clincherului

Suprafața Specifică Blaine (SSB) pentru diferiți timpi de măcinare și diferite grade de încărcare cu bile și material s-a calculat conform relației (6.9). Porozitatea specificată $e = 0,500$ și temperatura de încercare $20 \pm 2^\circ\text{C}$, SSB s-a calculat conform relației (6.12):

Astfel s-au înregistrat următoarele Suprafețe Specifice Blaine(SSB):

a) Pentru primul experiment, măcinare clincher și zgură cu ajutorul morii de laborator cu bile conform metodei CEPROCIM:

➤ Pentru Clincher tip A:

Tabel 6.17 Valori SSB și consumul de energie raportat la unitatea de timp, [19]

Nr.crt.	Timp macinare [min]	Consum indicator contor [kWh]	Corpuri de măcinare	R _{90μm} bile [%]	SSB biconuri [cm ² /g]
0	0	0	0	0	0
1	10	240	Bile de macinare	51.68 %	-
2	20	221	Bile de macinare	33.6%	-
3	30	214	Biconuri	-	2250
4	40	218		-	2650
5	50	212		-	2830
6	60	220		-	3180
7	70	222		-	3520
8	80	228		-	3590
9	90	221		-	3700
10	100	225		-	3870

După determinarea consumului energetic la măcinarea clincherului tip A s-a reprezentat grafic și variația suprafeței specifice Blaine (SSB) în unitatea de timp.

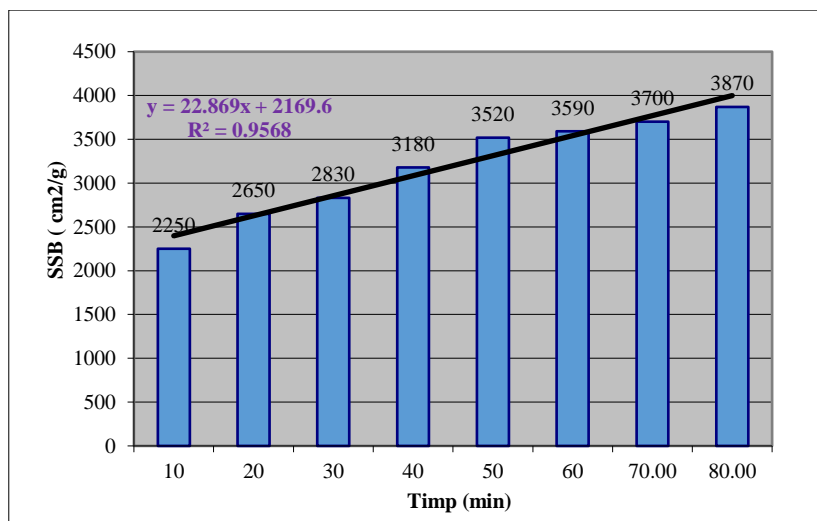


Fig.6.40 Variația Suprafeței Specifice Blaine la măcinarea clincher A cu moara cu biconuri , [19]

Se constată o variație liniară crescătoare a SSB cu o pantă de 228,7 cm²/g/min.

6.4.3. Determinări experimentale privind determinarea aptitudinii la măcinare în moara de laborator CEPROCIM S.A. și pe aparatul de laborator Zeisel

A) Determinarea aptitudinii la măcinare în moara de laborator CEPROCIM S.A.

Sarcina cu corpuri de măcinare, în prima etapă a măcinării (grosieră) pentru acest experiment este:

Tabel 6.20 Încărcătura morii cu corpuri de măcinare

Ø[mm] bile de măcinare	65-75	55-65	45-55	Total
G[kg] bile de măcinare	73,47	36,75	27,77	~137,77

În etapa a doua de experimente cu structura încărcăturii cu biconuri Ø 25 x 30 mm ~137,77 kg, granulația materialului la alimentarea morii a fost între 0...7 mm conform modului de lucru în moara de laborator tip CEPROCIM SA. După fiecare etapă s-a determinat R₀₀₉ și SSB. Pentru experimentări în laborator au fost pregătite 11 probe de material (clincher: 95%; gips: 5%;) de la o singură fabrică de ciment din România, după cum urmează:

- **Proba (șarja) 1**- clincher etalon a cărei distribuție granulometrică este detaliată în tabelul 6.21 și fig.6.46.

Tabel 6.21 Distribuția granulometrică a clincherului etalon și a clincherului presat (20MPa) , [21]

Dimensiunea ochiului sitei (mm)	Clincher etalon		Clincher presat la 20 MPa	
	parțial (%)	cumulat (%)	parțial (%)	cumulat (%)
25	8	-	5	-
15	21	8	15	5
10	8	29	16	20
7	11	37	14	36
5	22	48	10	50
3	12	70	11	60
1	9	82	11	71
<1	9	91	18	82

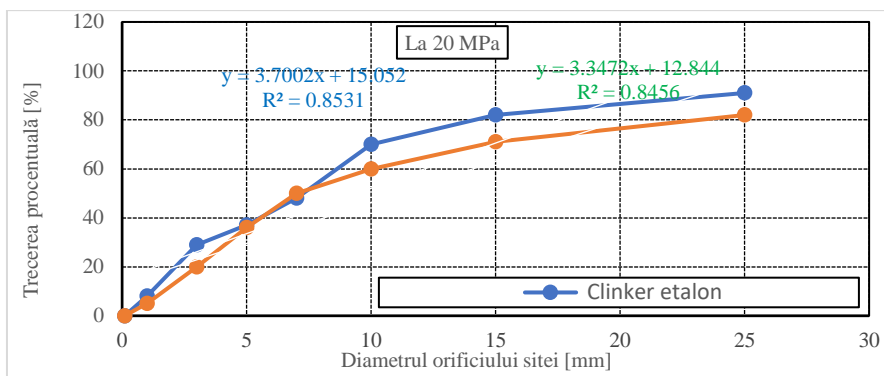


Fig.6.46 Distribuția granulometrică a clincherului etalon comparativ cu a clincherului presat (20 MPa),[21]

Tabel 6.23 Distribuția granulometrică a clincherului etalon și a clincherului presat de două ori (100 MPa)

Dimensiunea ochiului sitei (mm)	Clinker etalon		Clinker presat	
	parțial (%)	cumulat (%)	parțial (%)	cumulat (%)
>25	1,1	1,1	0,1	0,1
15	8,3	9,4	2,8	2,9
10	13,3	22,7	5,7	8,6
7	13,9	36,6	8,7	17,3
5	14,6	51,2	7,0	24,3
3	18,5	69,7	16,2	40,5
1	16,5	86,2	23,3	63,8
<1	13,8	100	36,2	100

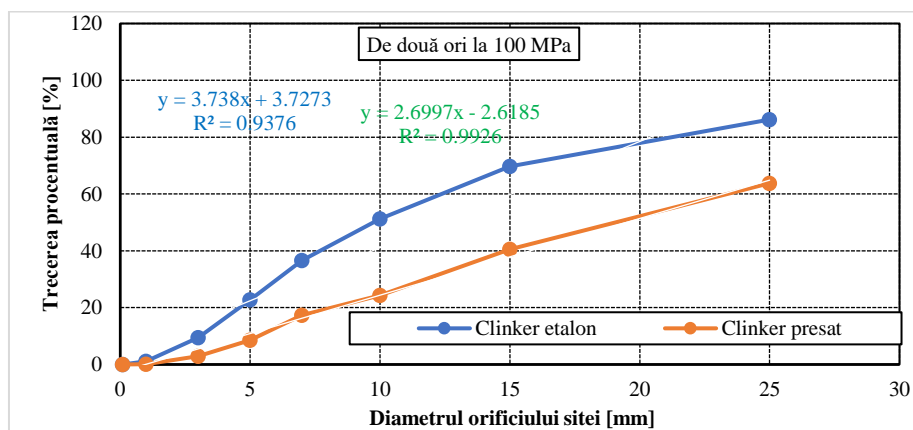


Fig.6.48 Distribuția granulometrică a clincherului etalon comparativ cu a clincherului presat de două ori (100 MPa)

Aceste rezultate confirmă afirmațiile din literatura de specialitate că la presiuni mici influența presiunii nu se remarcă existând un minimum de 50 MPa la care aceasta trebuie realizată.

Determinarea aptitudinii la măcinare în laborator cu aparatul Zeisel

În cadrul experimentelor a fost pregătită o cantitate de material (clinker) de la o fabrică de ciment din România cu o granulometrie cuprinsă între 0,7-1 mm conform metodologiei de lucru al aparatului Zeisel (prezentată mai înainte la subcap.6.2.1.) S-a determinat aptitudinea la măcinare cu aparatul Zeisel pe 7 probe (șarje).

Tabel 6.35 Aptitudinea la măcinare prin procedeul Zeisel a clincherului neconcasat

	Nr. rotații		Inregistrare contor		Lucru mecanic	Consum specific de energie electrică	Suprafața specifică SSB
	parțial	cumulat	Parțial (kWh)	Cumulat (kWh)			
	rotații	rotații			Kg·m (J)	KWh/t	cm ² /g
Proba 1 Clincher neconcasat	200	200	18,5	18,5	43,682	7,9297	1619
	200	400	14,7	33,2	78,391	14,2307	2358
	100	500	7,0	40,2	94,920	17,2311	2520
	300	800	21,1	61,3	144,741	26,2754	3164
	200	1000	14,7	76,0	179,451	32,5763	3465
	300	1300	22,8	98,8	233,286	42,3492	3730
	200	1500	15,7	114,5	270,3574	49,0788	4016
Proba 2 Clincher neconcasat	200	200	17,7	17,7	41,793	7,5868	1730
	200	400	14,7	32,4	76,502	13,8878	2290
	200	600	14,2	46,6	110,031	19,9744	2644
	200	800	14,8	61,4	144,977	26,3182	3023
	300	1100	22,5	83,9	198,104	35,9626	3480
	300	1400	22,8	106,7	251,940	45,7355	3760
	300	1600	15,5	122,2	288,538	52,3793	4006
Proba 3 Clincher concasat	200	200	16,9	16,9	39,904	7,2439	1688
	200	400	13,4	30,3	71,544	12,9876	2143
	200	600	13,3	43,6	104,948	17,6885	2514
	200	800	13,7	54,3	128,213	23,2749	3096
	200	1000	14,2	66,5	157,019	28,5043	3306
	100	1100	7,0	73,5	173,548	31,5047	3500
	300	1400	22,1	95,6	225,730	40,9776	3770
	100	1500	7,4	103,0	243,203	44,1495	3870
Proba 4 Clincher presat la 100 MPa (sortiment:5 -7 mm)	150	1650	11,3	114,3	269,885	48,9931	4110
	200	200	16,6	16,6	39,195	7,1153	1805
	200	400	14,1	30,7	72,488	13,1591	2358
	100	500	6,9	37,6	88,781	15,1167	2520
	200	700	14,2	51,8	122,310	22,2033	3000
	100	800	7,5	59,3	140,019	25,4181	3200
	200	1000	15,2	74,5	175,909	31,9334	3565
	300	1300	23,2	97,7	230,689	41,8777	3916
Proba 5 Clincher presat la 100 MPa (sortiment:5 -7 mm)	100	1400	7,6	105,3	248,634	45,1354	4000
	200	200	18,1	18,1	42,737	7,7583	1805
	200	400	14,5	32,6	76,975	13,9735	2390
	100	500	7,1	39,7	93,739	16,0168	2590
	200	700	14,2	53,9	127,268	23,1035	2956
	200	900	14,6	68,5	161,742	29,3616	3250
	200	1100	15,4	83,9	198,104	35,9626	3630
	200	1300	15,4	99,3	234,467	42,5635	3850
Proba 6 Clincher presat de două ori la 100 MPa (sortiment:5 -7 mm)	100	1400	7,6	106,9	252,412	45,8212	3956
	200	200	16,8	16,8	39,668	7,2010	1665
	200	400	13,6	30,4	71,780	13,0305	2310
	100	500	6,9	37,3	88,072	13,8016	2517
	200	700	14,1	51,4	121,365	22,0319	2870
	100	800	7,0	58,4	137,894	25,0323	2960
	300	1100	21,8	80,2	189,368	30,3766	3480
Proba 7 Clincher presat de două ori la 100 MPa (sortiment:5 -7 mm)	300	1400	22,7	102,9	242,967	40,1066	3950
	200	200	16,6	16,6	39,668	7,101	1730
	200	400	13,5	30,1	71,075	13,000	2350
	100	500	6,8	36,9	87,128	13,750	2575
	200	700	13,9	50,8	119,004	22,031	2910
	100	800	7,0	57,8	136,477	24,932	3055
	300	1100	21,7	79,5	187,715	30,475	3560
200	1400	22,5	102,0	240,842	40,950	3985	

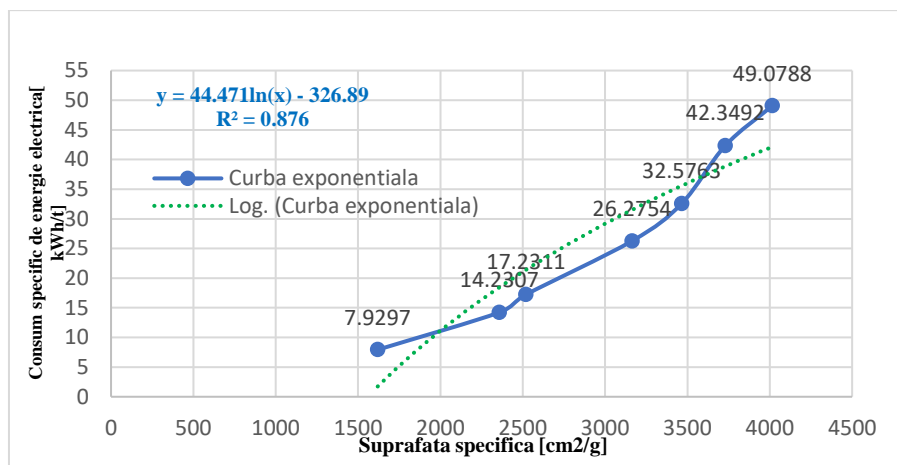


Fig.6.60 Aptitudinea la măcinare prin procedeul Zeisel a clincherului neconcasat (proba 1)

Se constată că pentru a ajunge la un SSB de 4016 cm²/g pentru clincherul neconcasat (proba 1) se consumă 49,078 kWh/t, la o rotație a morii de 1500 și un lucru mecanic de 270,35 kg·m (J). Variația consumului de energie urmează o creștere logaritmică, așa cum se prezintă în fig.6.60.

În tabelul 6.36 s-a prezentat centralizat aptitudinea la măcinare evaluată prin consumul specific de energie electrică, atât pentru condiții de laborator cât și pentru condiții industriale, a clincherului etalon, concasat sau presat.

Tabel 6.36 Tabel centralizator aptitudinea la măcinare prin metoda Zeisel pe clincher

Nr. puncte	Supr.specif. de referință	Consum specific de energie electrică în laborator				Consum specific de energie electrică industrială			
		etalon	concasat	presat la 100 MPa	presat de două ori la 100 MPa	etalon	concasat	presat la 100 MPa	presat de două ori la 100 MPa
1	2500	17,50	17,68	15,56	13,77	19,25	19,09	18,12	16,66
2	3000	26,29	23,27	22,65	22,03	25,30	25,01	23,73	21,82
3	3500	34,26	31,504	31,50	30,37	31,88	31,49	29,89	27,48
4	4000	50,72	48,99	45,47	40,52	38,85	38,56	36,60	32,65

6.4.4. Determinări experimentale după mărunțirea clincherului în morile cu bile privind compoziția mineralogică a acestora prin analize chimice și granulometrie laser

Pentru categoriile de clincher supus testelor experimentale de mărunțire au fost efectuate și analize privind compoziția mineralogică a acestora. Astfel în tabelul 6.37 sunt prezentate rezultatele acestor analize.

Tabel 6.37 Rezultatele analizelor compoziției mineralogice pentru proba clincher A și clincher F

Determinarea	U.M.	Cod proba	Incertitudinea de măsurare extinsă	Cod proba	Incertitudinea de măsurare extinsă
		Clincher A		Clincher F	
Pierdere la calcinare – P.C.	%	0,53	± 0,06	0,96	± 0,10
SiO ₂	%	21,20	± 0,32	20,88	± 0,31
Al ₂ O ₃	%	5,66	± 0,20	5,04	± 0,18
Fe ₂ O ₃	%	2,99	± 0,05	3,80	± 0,06
CaO	%	66,34	± 0,70	66,78	± 0,71
MgO	%	1,20	± 0,16	0,80	± 0,10
SO ₃	%	0,83	± 0,03	0,74	± 0,03
Na ₂ O	%	0,21	± 0,03	0,12	± 0,02
K ₂ O	%	0,50	± 0,03	0,34	± 0,02
CaO _{liber}	%	0,31	± 0,00	0,92	± 0,01
Rez. ins. HCl – Na ₂ CO ₃	%	0,15	± 0,03	0,17	± 0,04

Incertitudinea de măsurare extinsă a fost obținută prin multiplicarea incertitudinii standard compuse cu factorul de extindere $k = 2$, care conferă un nivel de încredere de 95 %.

Presupunând clincherele ca fiind plasate în subsistemul de echilibru termic $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$ ($MA_i > 0,64$), Robert H. Bogue a stabilit următoarele formule de calcul pentru constituenții mineralogici: [9]

$$\%C_4AF = 3,04\% Fe_2O_3 \quad (6.16)$$

$$\%C_3A = 2,65\%Al_2O_3 - 1,69\%Fe_2O_3 \quad (6.17)$$

$$\%C_3S = 4,07\%CaO - 7,60\%SiO_2 - 6,72\%Al_2O_3 - 1,42\%Fe_2O_3 \quad (6.18)$$

$$\%C_2S = 8,60\%SiO_2 + 5,06\%Al_2O_3 + 1,07\%Fe_2O_3 - 3,05\%CaO \quad (6.19)$$

Se observă că C_2S clincher A $>$ C_2S clincher F ($11,48 > 6,8$) ceea ce rezultă că clincherul A necesită un consum suplimentar de energie la măcinare deoarece are un conținut mai mare de C_2S .

Pentru al doilea experiment rezultatele și interpretările privind analizele chimice și granulometrice Laser ale materialului supus mărunțirii (clincher) au fost următoarele:

Tabel 6.45 Valori ciment rezultate pe clase granulometrice

Nr Crt	Clase granulometrice (μm)	Trecere cumulate[%]															
		Cod probe															
		85	86	87	88	89	95	96	97	98	113	114	115	116	117	118	
1	<1	4,9	1,2	1,2	0,4	0,4	4,6	0,4	0,4	0,4	0,4	4,9	0	0	0,4	0,4	
2	<1.5	5,7	3,4	2,0	0,8	0,9	5,0	1,2	0,8	0,8	0,8	5,7	0,8	0,4	1,2	0,8	
3	<2	6,5	4,7	3,1	1,2	1,3	5,4	2,2	2,0	1,6	1,9	5,7	2,6	1,2	1,8	1,6	
4	<3	9,1	6,3	4,3	1,6	1,8	6,6	3,8	3,2	2,4	2,3	6,9	4,2	2,1	2,6	2,4	
5	<4	10,7	8,1	5,1	2,0	2,5	9,6	5,4	4,0	3,2	2,7	7,8	5,4	3,3	3,4	3,2	
6	<6	15,2	10,5	6,6	2,8	3,8	13,3	9,2	5,5	4,4	4,1	10,2	7,5	4,9	4,8	4,3	
7	<8	20,6	12,7	8,2	3,6	5,5	16,6	12,9	7,5	6,1	5,3	14,7	10,0	6,9	6,4	5,5	
8	<12	29,2	16,9	10,5	5,7	8,0	23,7	18,4	11,1	8,9	8,4	24,1	15,0	11,1	9,8	8,0	
9	<16	35,8	21,6	14,0	9,8	10,5	30,7	23,4	17,0	12,1	11,7	30,6	21,7	15,1	14,2	11,1	
10	<24	40,6	30,0	21,0	15,1	15,6	41,5	31,7	25,3	17,8	16,4	44,0	32,5	22,5	20,6	16,7	
11	<32	55,1	38,5	28,0	20,8	20,6	54,5	40,9	32,9	23,1	21,8	57,5	41,6	29,9	26,2	22,2	
12	<48	69,6	50,3	38,6	29,0	27,4	74,5	54,7	43,2	31,6	31,7	73,8	55,8	40,9	33,8	31,0	
13	<64	79,4	58,8	49,1	36,3	35,0	85,3	63,8	52,6	39,7	39,3	83,6	67,5	50,3	41,6	38,1	
14	<96	94,6	70,1	60,4	46,1	43,4	98,6	74,7	61,0	48,6	46,3	97,0	78,8	60,5	50,7	45,7	
15	<128	98,8	80,4	66,6	53,8	47,6	99,4	86,0	67,3	53,4	50,4	97,8	86,7	69,1	56,7	51,6	
16	<192	99,1	84,6	70,1	57,1	50,6	99,8	91,8	71,3	56,7	53,5	97,8	91,7	73,6	60,1	55,6	
Reziduu*																	
17	>192	1,25	15,4	29,9	42,9	49,4	0,2	8,2	28,7	43,3	46,5	2,2	8,3	26,4	39,9	44,4	
Parametrii statistici																	
18	D ₅₀	27,4	47,7	66,1	118,8	174,9	28,9	42,1	59,3	104,9	127,7	27,25	40,7	64,1	94,0	118,5	

Pentru exemplificare s-a reprezentat ponderile pe clase granulometrice pentru proba 85.

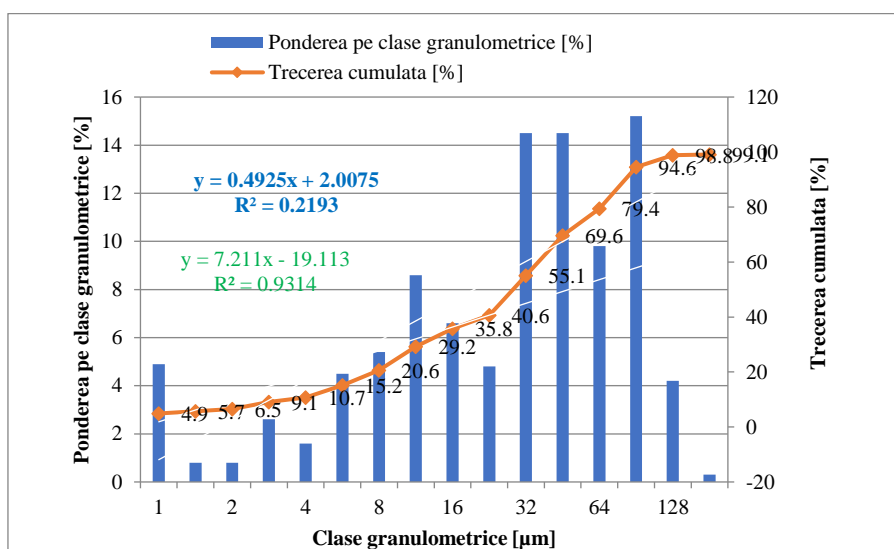


Fig.6.72 Pondere pe clase granulometrice proba 85

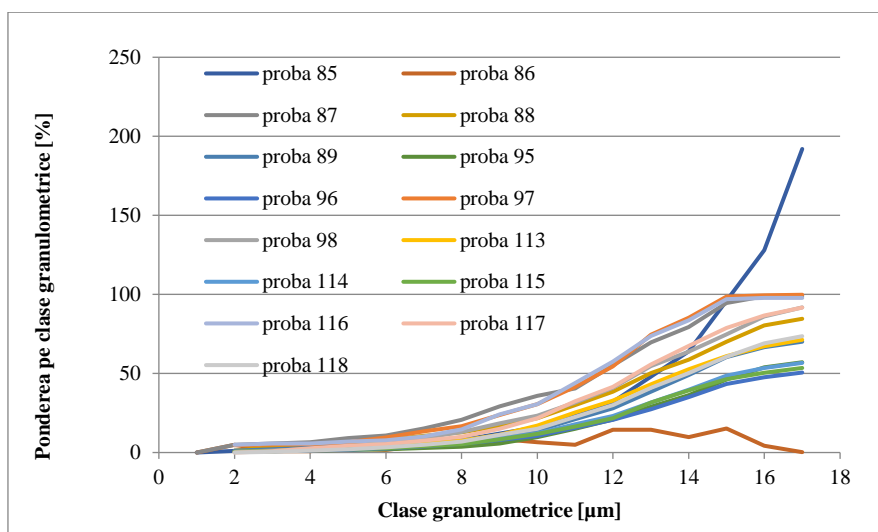


Fig.6.73 Reprezentare grafică pe clase granulometrice pentru toate probe din tabelul 6.45

Atât din tabelul de date cât și din graficul afișat se constată că circa 50% din material are valori sub 27,5 μm , 50% având valori mai mari.

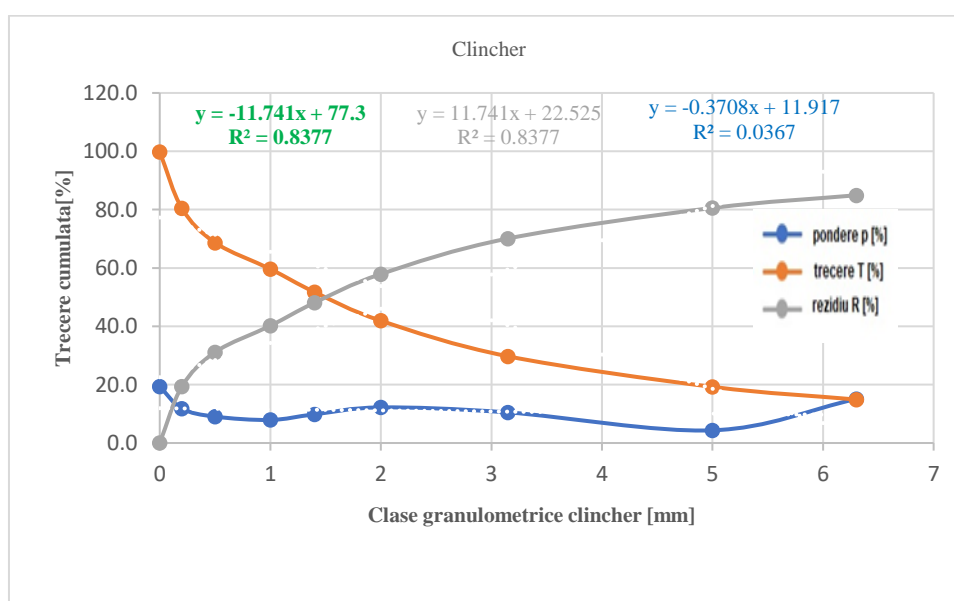
6.4.5. Determinări experimentale după mărunțirea clincherului cu ajutorul micro – morii de laborator PULVERISETTE 19 și analiza cantitativă a dimensiunii particulelor solide prin cernere uscată cu clasificatorul de site Analysette 3 Spartan

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat ca material clincher de la o singura fabrică de ciment din România. Experimentele s-au efectuat în cadrul Facultății de Ingineria Sistemelor Biotehnice din cadrul Universității Politehnice București.

Tabel 6.47 Cantitatea de material (procent trecere) sitată pe site de diferite dimensiuni cu clasificatorul de site Analysette 3 Spartan

Sită [mm]	Material rămas pe site		p[g]	T [%]	p[g]	R [%]
	p[g]	p[%]				
6,3	794,9	15,1	573.06	14,9	221,99	84,9
5	584,4	4,3	498,4	19,2	86	80,6
3,15	730,0	10,5	563,02	29,7	166,91	70,1
2	761,2	12,2	518,27	41,9	242,94	57,9
1	637,2	7,9	458,64	59,6	178,55	40,2
0,5	608,1	9,0	500,45	68,7	107,66	31,1
0,2	650,3	11,8	537,85	80,5	112,42	19,3
0	894,1	19,3	510,6	99,8	383,4	0,0
Total material	-	-	-	-	1499,87	-

unde: p – ponderea pe clase granulometrice (%), (g) ; T - trecerea cumulată(%); R – material rămas pe sită (%).

**Fig.6.74** Ponderea pe clase granulometrice a clincherului măcinat

Din fig.6.74 și tabelul 6.47. se constată că clincherului s-a măcinat foarte fin, fapt rezultat din trecerea $T(\%)$ cumulată de 99,8 %, o trecere de 80,5 % prin sita de 0,2 mm și un procent de reziduu de 19,3 % pe aceeași sită a clasificatorului de site Analysette 3 Spartan. Reziduiul cel mai mult a rămas pe sitele de 6,3 în proporție de 84,9, pe sita de 5 în proporție de 80,6 și pe sita de 3,15 în proporție de 70,1.

6.5. Determinări experimentale privind vibrațiile morii cu bile în diferite variante de lucru

Determinările vibrațiilor s-au efectuat conform metodologiei de la subcap.6.2.1 unde s-a urmărit:

- determinarea valorilor RMSAcc și PeakAcc pentru fiecare experiment (la 10 minute) efectuat;
- în realizarea graficelor accelerației vibraționale în timp.

S-au efectuat câte 5 măsurări de vibrații pentru probele de măcinare, s-au înregistrat datele și trasat grafice menționate.

Tabel 6.55 Tabel centralizator pentru accelerația vibrației la măcinarea clincherului A

Nr.crt	Ora	RMSAcc2 [G]	RMSAcc3 [G]	RMSAcc4 [G]	RMSAcc5 [G]	Timp [s]	PeakAcc2 [G]	PeakAcc3 [G]	PeakAcc4 [G]	PeakAcc5 [G]
1	10:22:42	0,006	0,006	0,006	0,006	1	0,059	0,063	0,071	0,062
2	10:22:43	0,006	0,006	0,006	0,006	2	0,059	0,063	0,071	0,062
3	10:22:44	0,006	0,006	0,006	0,006	3	0,059	0,063	0,071	0,062
4	10:22:45	1,558	3,007	1,703	1,384	4	21,049	15,042	13,829	14,443
5	10:22:46	1,558	3,007	1,703	1,384	5	21,049	15,042	13,829	14,443
6	10:22:47	1,558	3,007	1,703	1,384	6	21,049	15,042	13,829	14,443
7	10:22:48	1,558	1,95	2,823	1,384	7	21,049	12,89	18,001	14,443
8	10:22:49	2,528	1,95	2,823	1,415	8	16,654	12,89	18,001	16,317
9	10:22:50	2,528	1,95	2,823	1,415	9	16,654	12,89	18,001	16,317
10	10:22:51	2,528	2,645	2,576	1,415	10	16,654	14,528	18,343	16,317
11	10:22:52	2,184	2,645	2,576	2,704	11	16,278	14,528	18,343	19,364
12	10:22:53	2,184	2,645	2,576	2,704	12	16,278	14,528	18,343	19,364
13	10:22:54	2,184	2,944	1,225	2,704	13	16,278	13,128	14,356	19,364
14	10:22:55	1,502	2,944	1,225	2,905	14	19,631	13,128	14,356	18,969
15	10:22:56	1,502	2,944	1,225	2,905	15	19,631	13,128	14,356	18,969
16	10:22:57	1,502	2,058	3,026	2,905	16	19,631	14,583	19,974	18,969
17	10:22:58	2,66	2,058	3,026	1,645	17	20,258	14,583	19,974	13,936
18	10:22:59	2,66	2,058	3,026	1,645	18	20,258	14,583	19,974	13,936
19	10:23:00	2,66	2,041	2,896	1,645	19	20,258	14,616	17,517	13,936
20	10:23:01	2,43	2,041	2,896	2,643	20	18,916	14,616	17,517	18,181
21	10:23:02	2,43	2,041	2,896	2,643	21	18,916	14,616	17,517	18,181
22	10:23:03	2,43	3,127	2,896	2,643	22	18,916	14,667	17,517	18,181
23	10:23:04	1,382	3,127	1,425	3,075	23	16,935	14,667	12,196	17,781
24	10:23:05	1,382	3,127	1,425	3,075	24	16,935	14,667	12,196	17,781
25	10:23:06	1,382	3,127	1,425	3,075	25	16,935	14,667	12,196	17,781
26	10:23:07	2,393	2,71	2,731	2,151	26	17,135	14,051	18,714	14,428
27	10:23:08	2,393	2,71	2,731	2,151	27	17,135	14,051	18,714	14,428
28	10:23:09	2,393	2,71	2,731	2,151	28	17,135	14,051	18,714	14,428
29	10:23:10	2,393	1,911	3,255	2,151	29	17,135	10,989	18,746	14,428
30	10:23:11	2,814	1,911	3,255	2,061	30	18,468	10,989	18,746	16,988

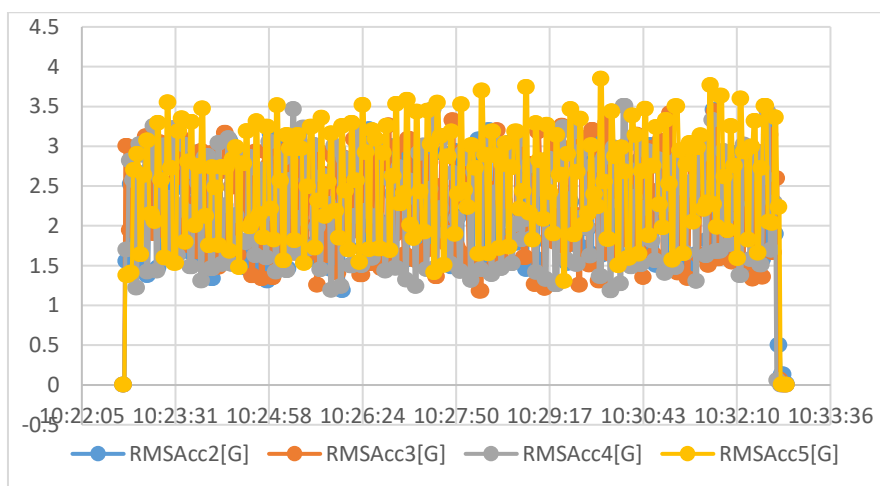


Fig.6.82 Valori măsurări pentru RSA la măcinarea clincherului A

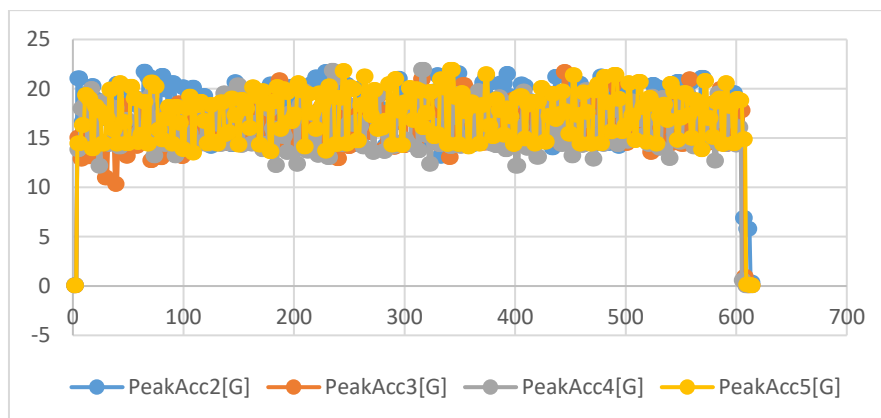


Fig.6.83 Valori măsurări pentru Peak la măcinarea clincherului A

În urma efectuării măsurărilor de vibrații pentru probele de măcinare ale clincherului tip A, respectiv tip F și înregistrării datelor obținute, precum și trasarea graficelor se constată că diferența accelerației vibraționale în timp ale valorilor RMSAcc și PeakAcc este aproape egală, și anume: valoarea maximă RMSAcc (mm/s) pentru clincherul de tip A este de $3,852 < 4,928$ (mm/s) față de clincherul de tip F. Același lucru se poate spune și pentru valoarea maximă PeakAcc (mm/s) unde valoarea pentru clincherul de tip A este de $21,049 < 22,12$ (mm/s) pentru clincherul de tip F. Concluzia este că clincherul de tip F este mai dur decât cel de tip A, producând o vibrație mai mare morii de laborator.

6.6. Influența parametrilor procesului de mărunțire asupra categoriilor de clincher cu dimensiuni mici

6.6.1. Legătura dintre gradul de mărunțire cu cantitatea de particule mai mici de 1 micron

Tabel 6.57 Valori ciment rezultate pe clase granulometrice

Nr. Crt	Clase granulometrice	Trecere cumulate[%]														
		Cod probe														
		85	86	87	88	89	95	96	97	98	113	114	115	116	117	118
1	<1 μm	4.9	1.2	1.2	0.4	0.4	4.6	0.4	0.4	0.4	0.4	4.9	0	0	0.4	0.4

Umiditatea particulelor cimentului are un rol important în rezultatul măsurărilor. Cu cât particulele sunt mai umede trec mai greu prin site, aderă la suprafața lor și afectează negativ gradul de mărunțire. Din tabelul atașat se poate observa că probele cu codurile 85, respectiv 114 au cea mai mare trecere prin sita < 1 μm de 4,9%, proba 95 – 4,6%, restul probelor aproape netrecând prin sită.

6.6.2. Legătura dintre gradul de mărunțire cu cantitatea de particule mai mici de 5 microni

Tabel 6.58 Valori ciment rezultate pe clase granulometrice

Nr. Crt	Clase granulometrice	Trecere cumulate[%]														
		Cod probe														
		85	86	87	88	89	95	96	97	98	113	114	115	116	117	118
1	<5 μm	10.7	8.1	5.1	2.0	2.5	9.6	5.4	4.0	3.2	2.7	7.8	5.4	3.3	3.4	3.2

Din tabelul atașat se poate observa că cea mai mică trecere de particule prin sita < 5 μm a fost la proba 88 de 2% iar cea mai mare la proba 85 de 10,7%. Putem trage concluzia că la cantitate mica de clincher (5 kg) și bile mari Ø70+Ø65 mm cantitatea de material rămasă nemărunțită este mare și începe să scadă pe măsură ce se mărește dimensiunea bilelor de măcinare (Ø70+Ø65+Ø45) mm.

6.6.3. Legătura dintre gradul de mărunțire și cantitatea de particule mai mici de 10 microni

Tabel 6.59 Valori ciment rezultate pe clase granulometrice

Clase granulometrice	Trecere cumulate[%]														
	Cod probe														
	85	86	87	88	89	95	96	97	98	113	114	115	116	117	118
<10 μm	20.6	12.7	8.2	3.6	5.5	16.6	12.9	7.5	6.1	5.3	14.7	10.0	6.9	6.4	5.5

Din tabelul atașat se poate observa că cea mai mică trecere de particule prin sita < 10 μm a fost la proba 88 de 3,6% iar cea mai mare la proba 85 de 20,6%. Aceeași concluzie se poate trage și pentru particule mai mici de 10 microni.

6.7. Determinări experimentale privind procesul de mărunțire a clincherului în fabricile de ciment

6.7.1. Aspecte privind determinarea caracteristicilor componentelor cimentului în timpul obținerii acestuia (experimente în fabrici)

În perioada efectuării măsurărilor s-au cules informații de la o fabrică de ciment din România privind caracteristicile componentelor clincherului pentru a face o paralelă cu măsurările efectuate în laboratorul CEPROCIM privind măcinarea în moara cu bile și pentru a determina coeficientului de corelare cu morile industriale. Sortimentul de ciment produs a fost CEM II/A-LL 42,5R, având drept component clincher, calcar, gips și praf de la filtrul cuptorului (CKD). La măcinare s-au utilizat aditivi ADM, dozaj 1,74 l/min, pentru îmbunătățirea procesului de macinare și aditiv SYNCHRO 206, dozaj 0,6 l/min, pentru reducerea Cr⁶⁺.

Tabel 6.62 Valorile obținute privind eficiența măcinării

Parametru	UM	Valoare	Observații
Producție (uscată)	t/h	74,2	producție scăzută
Finețe măcinare ciment	cm ² /g	3174	finețe corespunzătoare tipului de ciment fabricat
Finețe praf electrofiltru	cm ² /g	3598	posibilitatea creșterii vitezei aerului prin moară
Consum energie electrică atelier moară	kwh/t kwh/t	41,6 32,6	consumuri relativ bune
Coeficient recirculare	-	1,51	valoare scăzută
Viteză aer deasupra încărcăturii	m/s	0,78	viteză situată în afara intervalului uzual (1-1,5 m/s)
Diametru max/min bile CI	mm	80/60	structură corespunzătoare în ambele camere
CII	mm	50/18	
Grad de umplere CI	%	29,27	grad de umplere calculate din H măsurat cu material în moară
CII	%	27,08	
Greutate medie bilă CI	kg	1,40	greutăți relativ scăzute
CII	g	48,44	
Diagramă măcinare R _{2,5 mm} la perete	%	1,99	valoare bună (în condițiile unei mori insuficient încărcată cu material)
Turație moară	% din turația critică	76,4	turație corespunzătoare

Tabel 6.65 Valorile obținute pentru gradul de umplere și consumul specific

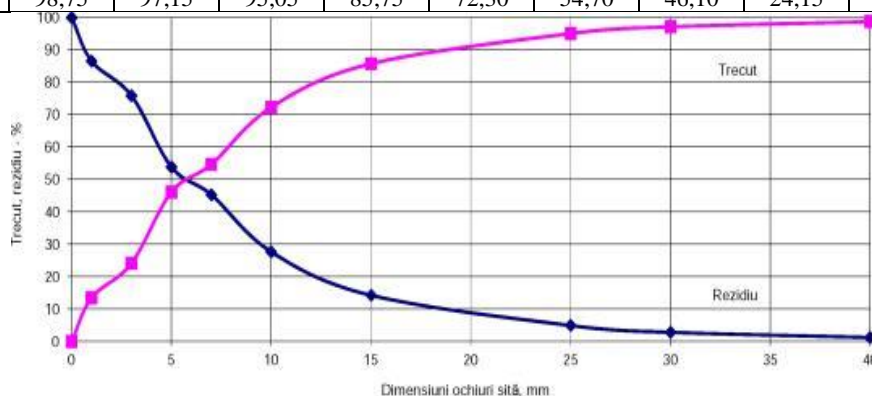
Parametrul	UM	Valoare
Camera I		
Grad de umplere	%	26,70
Greutate medie bila	kg	1,32
Diametru mediu bila	mm	68,68
Consum specific de energie electrică	kWh/t	9,60
Camera a II-a		
Grad de umplere	%	29,34
Greutate medie bilă	g	51,34
Diametru mediu bilă	mm	23,25
Consum specific de energie electrică	kWh/t	23,40
Total moara		
Consum specific de energie electrică	kWh/t	32,90

Observăm că gradul de umplere în camera I situată la limita inferioară a intervalului recomandat de literatura de specialitate este 27-33% și gradul de umplere în camera a II-a inclusă în intervalul recomandat de literatura de specialitate este 25-32%.

Granulometria clincherului în moară de ciment pentru sortimentul de ciment CEM II/A-LL 42,5R este prezentată în tabelul 6.66.

Tabel 6.66 Valorile obținute prin granulometrie optică la moara de ciment (experiment 1), [22]

Ochiuri sita, mm	40	30	25	15	10	7	5	3	1	0
Reziduu, %	1,25	1,60	2,10	9,30	13,45	17,60	8,60	21,95	10,70	13,45
Reziduu cumulat, %	1,25	2,85	4,95	14,25	27,70	45,30	53,90	75,85	86,55	100,00
Trecut cumulat, %	98,75	97,15	95,05	85,75	72,30	54,70	46,10	24,15	13,45	0,00

**Fig.6.89** Granulometria clincherului (sortiment ciment:CEM II/A-LL 42,5R)**Tabel 6.67** Valorile obținute prin granulometrie optică la moara de ciment (experiment 2), [22]

Ochiuri sita, mm	40	30	25	15	10	7	5	3	1	0
Reziduu, %	1,90	2,14	2,77	9,21	12,54	15,73	8,12	20,36	11,94	15,29
Reziduu cumulat, %	1,90	4,05	6,82	16,02	28,56	44,30	52,41	72,77	84,71	100,00
Trecut cumulat, %	98,10	95,95	93,18	83,98	71,44	55,70	47,59	27,23	15,29	0,00

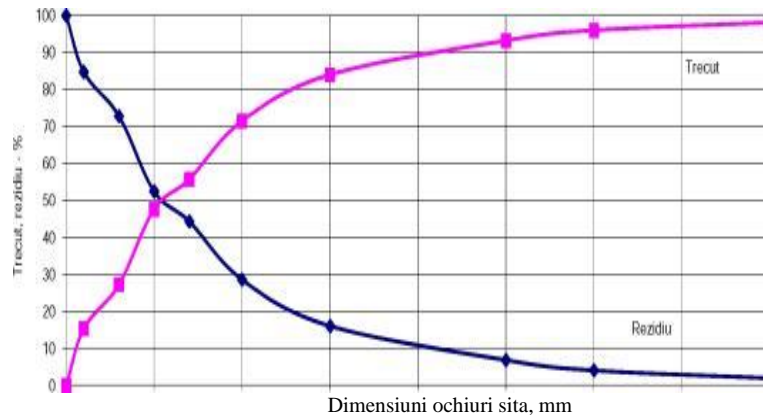


Fig.6.90 Granulometria clincherului (sortiment ciment:CEM II/A-LL 42,5R), [22]

Pe probele de material prelevate din interiorul morii s-au determinat rezidiile pe sitele cu laturile ochiului de 5mm, 2,5mm, 1mm, 200 μ m, 90 μ m, 64 μ m și 32 μ m și suprafețele specifice Blaine (camera a II-a). Rezultatele obținute au fost utilizate pentru trasarea diagramei de măcinare – fig.6.91

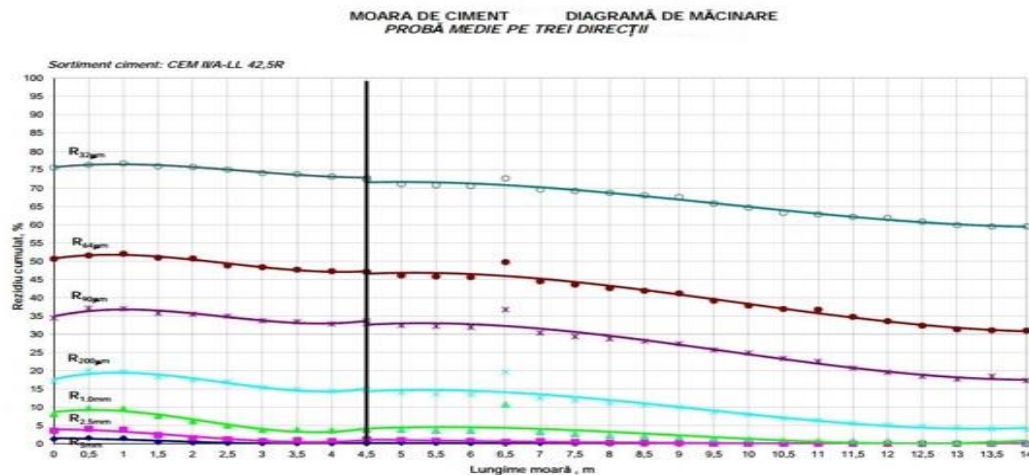


Fig.6.91 Diagrama de măcinare pe trei direcții la fabrica de ciment

Diagrama de măcinare evidențiază următoarele aspecte:

Camera I

- material foarte bine pregătit în camera I - $R_{25mm}=0,81/1,24\%$ la peretele despărțitor. Recomandare : $R_{2,5mm} < 5\%$;
- măcinare activă pe cca.65 ÷ 70% din lungimea camerei.

Camera a II-a

- $R_{90\mu m}$ la ieșire din moară - 17,36%. Valoare recomandată $R_{90\mu m}$ cca. 25 %;
- măcinare activă pe toată lungimea camerei.

6.7.2. Determinări privind gradul de mărunțire în moara fabricii de ciment

Un experiment privind analizele chimice și granulometrice Laser ale materialului mărunțirii (ciment tip CEM I 42,5 R) arată datele prezentate în tabelul 6.69:

Tabel 6.69 Rezultate pe clase granulometrice ale cimentului măcinat în fabrică

Nr. Crt	Clase granulometrice μm	Trecerea cumulată[%]														
		Cod probe														
		314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328
1	<1	5,7	6,1	5,7	6,9	7,3	6,9	2,0	1,6	2,8	7,3	6,9	7,3	6,9	7,4	6,9
2	<1.5	7,3	7,3	7,3	7,3	8,2	7,8	3,7	2,9	3,7	8,2	8,7	8,6	8,2	8,6	8,2
3	<2	10,2	10,3	10,2	10,2	11,5	10,6	4,5	4,1	4,9	11,1	11,1	11,5	11,5	11,1	11,1
4	<3	15,2	15,6	15,6	17,2	18,5	17,9	6,1	6,5	7,4	18,1	17,7	18,9	18,1	18,9	18,4
5	<4	19,7	21,0	20,4	22,5	23,8	22,8	7,5	7,8	9,4	24,2	23,1	23,9	23,5	23,8	25,3
6	<6	25,5	28,8	29,5	30,2	30,3	30,1	9,9	10,6	11,9	30,7	30,5	30,8	32,6	32,1	34,7
7	<8	30,8	35,4	35,2	35,9	35,2	36,7	11,6	11,9	13,6	36,1	35,8	35,4	37,0	36,9	41,2
8	<12	39,5	44,9	44,2	44,5	43,9	46,4	13,2	13,1	15,6	45,0	43,3	44,0	45,6	48,1	50,7
9	<16	46,0	51,9	51,2	51,4	51,6	55,0	14,0	14,0	17,7	51,6	51,8	51,8	55,1	56,6	56,4
10	<24	60,0	65,1	64,2	69,0	69,3	68,9	16,0	16,0	20,1	69,6	68,3	69,5	70,3	70,2	69,5
11	<32	69,5	75,4	74,1	78,8	79,1	78,6	23,0	22,6	24,6	80,3	79,9	80,2	80,2	80,0	79,7
12	<48	81,4	91,9	90,8	90,6	90,6	90,5	37,5	38,1	41,1	92,2	92,3	92,5	92,9	91,1	93,6
13	<64	92,9	96,4	95,7	95,1	95,1	95,4	55,2	54,9	55,1	95,8	96,3	96,2	96,2	96,0	96,9
14	<96	97,5	98,5	97,8	97,6	98,0	97,4	77,9	73,4	77,2	97,9	98,4	98,3	98,3	98,1	97,7
15	<128	98,7	98,9	98,2	98,0	98,4	97,8	87,0	86,5	86,3	98,3	98,8	98,7	98,7	98,5	98,1
16	<192	98,7	98,9	98,2	98,0	98,4	97,8	90,7	90,2	90,4	98,3	98,8	98,7	98,7	98,5	98,1
Reziduu*																
17	>192 μm	1,3	1,1	1,8	2,0	1,6	2,2	9,3	9,8	9,6	1,7	1,2	1,3	1,3	1,5	1,9
Parametri statistici																
18	$D_{50}[\mu\text{m}]$	18,0	14,8	15,3	15,1	15,1	13,5	58,8	58,8	57,6	14,9	15,0	15,0	13,7	12,8	11,7

Probele pentru analize au fost colectate de pe benzile transportoare (ciment fin dreapta- stanga) care duc la silozurile de ciment ale fabricii de ciment-fig.6.92 a , fig.6.92 b , respectiv de pe banda transportoare de la separatorul morii (ciment griș) care reintră în moară pentru măcinare- fig.6.92 c.



Fig.6.92 c) Bandă transportoare ciment griș



Fig.6.92 a) Bandă transportoare ciment fin dreapta

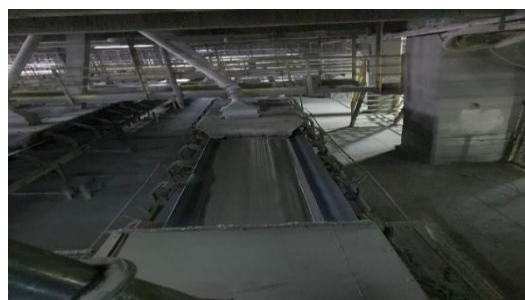


Fig.6.92 b) Bandă transportoare ciment fin stanga

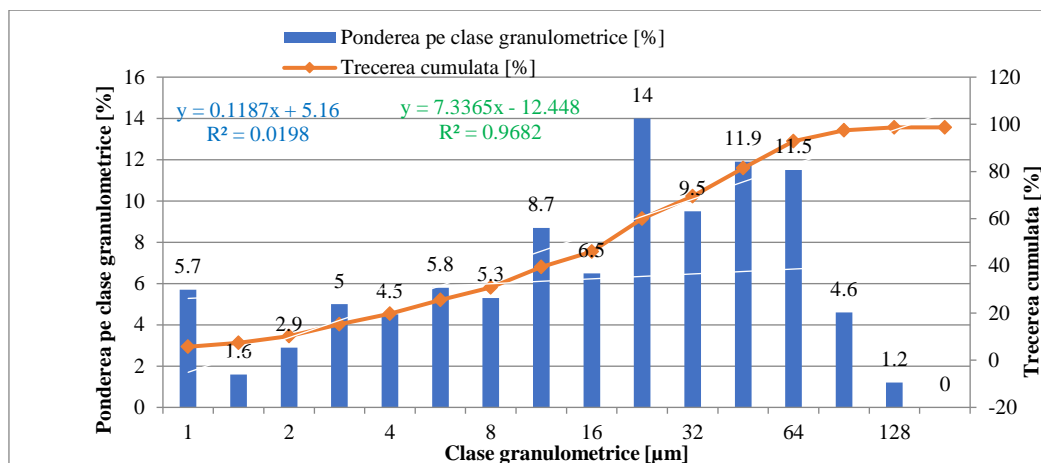


Fig.6.93 Pondere pe clase granulometrice - proba 314

Se poate observa că cea mai mare trecere cumulată $T(\%)$ este pe sita de clasă granulometrică $< 24\mu\text{m}$ de 60% conform tabelului 6.69 și o pondere de 14% conform fig.6.93.

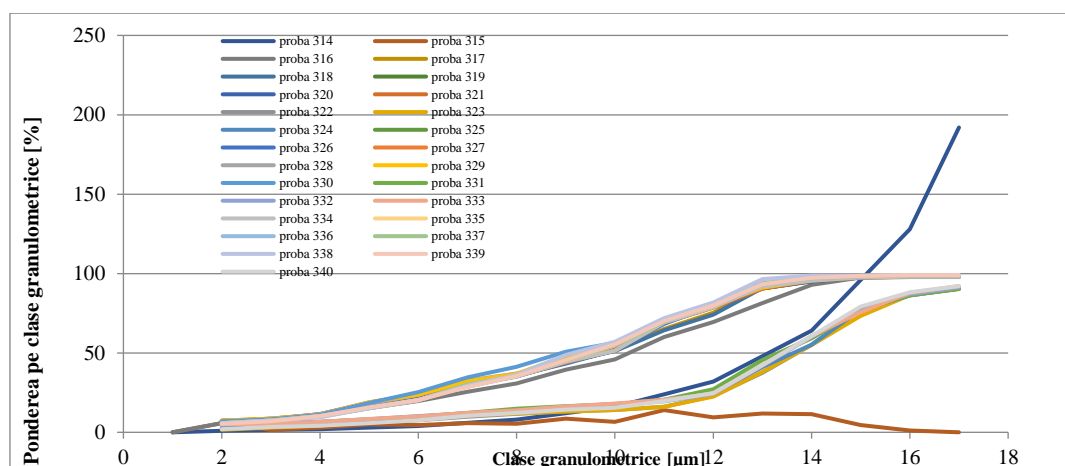


Fig.6.94 Reprezentare grafică-ponderea pe clase granulometrice a tuturor probelor de la fabrica de ciment

Conform reprezentării grafice se poate observa că toate probele analizate au un procent de peste 90% trecere cumulată $T(\%)$ pe sita de clasă granulometrică $< 192\mu\text{m}$.

6.7.3. Determinări privind concentrațiile de particule în suspensie datorate mărunțirii clincherului

Lucrarea tratează metoda de determinare a emisiilor de pulberi (concentrația de praf în gaze în condiții uscate- mg/Nm^3) la coșul morii de ciment cu bile - ieșire moară și ieșire separator.

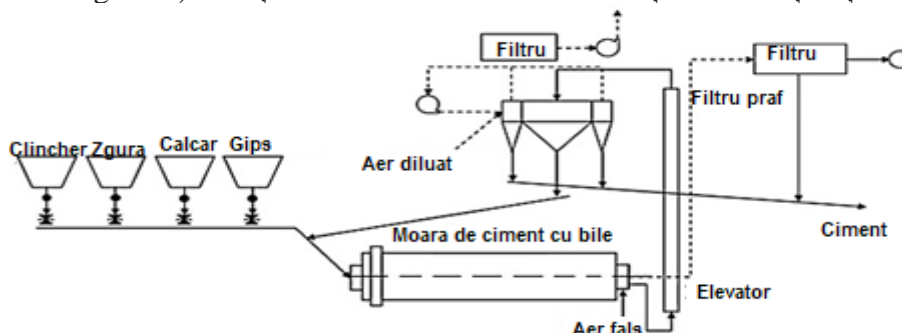


Fig.6.95 Organigrama de măcinare a cimentului, [16, 20, 22, 164]

Măsurătorile au fost efectuate la o fabrică de ciment din România la punctele : Moara de ciment - Ieșire Moară ; Moară de ciment - Ieșire Separator și s-a urmărit determinarea concentrației medii lunare (mg/Nm^3) de la cele 2 puncte în raport cu limita maximă din Autorizația Integrată de Mediu -AIM a fabricii de ciment. Măsurările au fost efectuate în condiții de referință pentru emisiile atmosferice: 273°K , $p=101,3\text{ KPa}$, gaz uscat, $10\% \text{O}_2$.

Concentrația de praf în gazele din instalație se determină raportând masa de praf obținută la volumul de gaz extras din conductă (tabel 6.71).

$$C_{\text{uscata}} = \frac{\text{Masa de praf}}{V_{\text{uscat}}} = \frac{\text{Masa finală} - \text{Masa inițială}}{V_{\text{uscat}}} \text{mg}/\text{Nm}^3 \quad (6.24)$$

Tabel 6.71 Valorile medii ale concentrațiilor lunare de la moara de ciment, [16,17]

Nr.Crt	Perioada	Sursa de emisie/ Cod	Punctul de emisie/ Cod	Noxa emisa	Concentratia medie lunara realizata mg/Nm^3	Limita max din autorizație mg/Nm^3
1	Martie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4	Pulberi totale	1.87	30
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		4.13	
2	Aprilie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		1.59	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		2.81	
3	Mai	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		2.29	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		3.08	
4	Iunie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		2.39	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		3.02	
5	Iulie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		3.73	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		2.83	
6	August	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		4.60	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		3.58	
7	Septembrie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		3.63	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		3.27	
8	Octombrie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		5.06	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		4.36	
9	Noiembrie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		4.54	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		3.80	
10	Decembrie	Moara de ciment 1 / S4	Filtru cu saci FS 76 / E4		3.79	
		Separator MC1 / S5	Filtru cu saci FS 7-21/ E5		3.24	

În continuare s-a reprezentat repartiția concentrațiilor obținute pe toată perioada măsurărilor la cele două puncte de măsură : moara de ciment nr.1 - ieșire moară și ieșire separator.

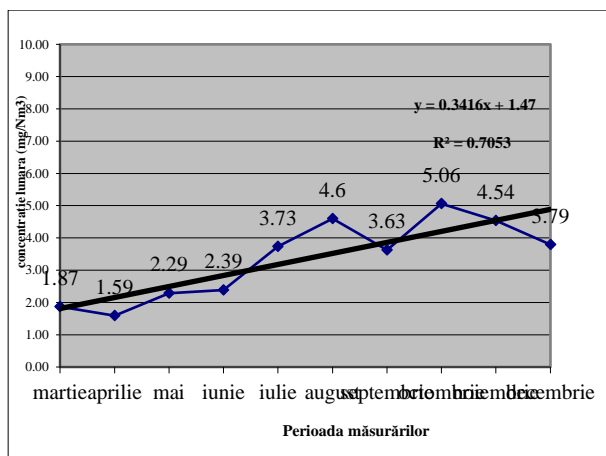


Fig.6.96 a) Repartitia emisiilor de pulberilor la Moara de ciment Nr.1 a fabricii de ciment monitorizată, [16]

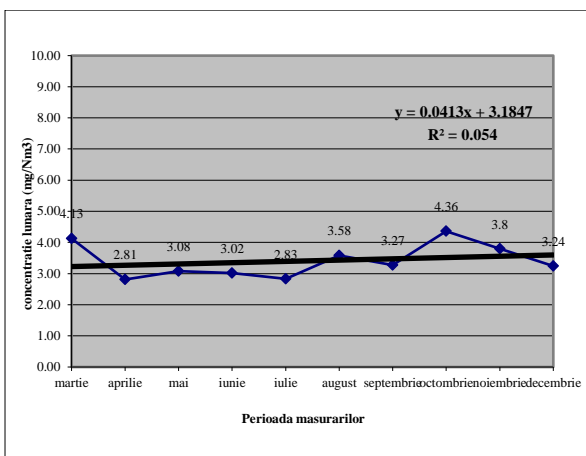


Fig.6.96 b) Repartitia emisiilor de pulberilor la Separatorul Morii de ciment Nr.1 de la fabrica de ciment monitorizată, [16]

6.8. Concluzii privind cercetările experimentale

Pe parcursul stagiului la doctorat s-au facut mai multe cercetări experimentale în urma cărora au rezultat următoarele concluzii:

a) Pentru experimentul nr.1 - măcinare clincher și zgură cu ajutorul morii de laborator cu bile conform metodei CEPROCIM

Pentru probele de clincher analizate, s-a observat că consumul de energie, pe același interval de timp, a fost cu circa 10% mai mare pentru clincherul de la fabrica A, în comparație cu clincherul de la fabrica F, posibil datorită materiilor prime utilizate (calcar).

De asemenea, s-a constatat că variația consumului de energie este una relativ liniară cu timpul de măcinare, valoarea medie a consumului specific de energie fiind de circa 1,11 kWh/kg·min la fabrica A, 1,01 kWh/kg·min la fabrica F și 1,09 kWh/kg·min la zgura de furnal. Testele efectuate la măcinarea clincherului cu bile de diferite diametre au condus la observația că cu cât diamterul bilor este mai mare și masa materialului măcinat este mai mica cu atât consumul specific de energie este mai mare pentru ambele tipuri de clincher analizate. La fel și pentru zgura de furnal.

Tot în perioada când s-a efectuat măcinarea clincherului și a zgurii granulate de furnal s-a determinat și vibrațiile morii. Determinările vibrațiilor s-au efectuat conform metodologiei de lucru (s-au efectuat câte 5 măsurări de vibrații în zilele programate pentru măcinare) în vederea obținerii accelerației morii de laborator. Concluzia este că clincherul de tip F este mai dur decât cel de tip A, producând o vibrație mai mare morii de laborator (valoare maximă RMSAcc (mm/s) clincherul de tip A este de $3,852 < 4,928$ (mm/s) clincherul de tip F).

b) Pentru experimentul nr.2 - măcinare clincher cu ajutorul morii de laborator cu bile de diferite dimensiuni în funcție de cantități diferite de material

O constatare interesantă este aceea că consumul specific de energie devine cu atât mai mic cu cât timpul de măcinare este mai mare și cu cât cantitatea de clincher introdusă în moară este mai mare (fig.6.37,a,b). Referitor la SSB și aceasta este cu atât mai mică cu cât cantitatea de material din moară este mai mare (fig.6.37 c), în schimb reziduul pe sită de 90 μm crește cu creșterea cantității de material introdusă în moară, la același timp de măcinare (fig. 6.37).

Aceste constatări se referă la măcinarea clincherului cu un amestec de bile Ø70 + Ø65 mm,

dar aceleași constatări s-au observat și la măcinarea clincherului cu un singur tip de bile ($\varnothing 60$ mm) – fig.6.38, precum și la măcinarea clincherului cu amestec de bile de diametre $\varnothing 70 + \varnothing 65 + \varnothing 45$ mm (fig.6.39).

c) Pentru experimentul nr.3 – măcinare clincher cu ajutorul morii de laborator cu bile și cu aparatul Zeisel în vederea determinării aptitudinii la măcinare

Dacă analizăm comparativ rezultatele obținute în laborator pe aparatul Zeisel pentru determinarea aptitudinii la măcinare se constată o influență mică (vezi tabelul 6.52) a concasării și presării la 100 MPa conform aptitudinii la măcinare evidențiată prin consumul de energie electrică.

Rezultatele obținute pe aparatul de laborator Zeisel confirmă afirmațiile din literatura de specialitate că o presiune de până la 100 MPa exercitată asupra materialului nu este suficientă pentru a obține rezultate care să justifice utilizarea unor mori cu valțuri sau concasoare, fapt demonstrat și în cazul determinării aptitudinii la măcinare pe moara de laborator tip CEPROCIM (cu bile).

d) Pentru experimentul nr.4 - măcinare clincher cu ajutorul morii de ciment industriale în vederea determinării gradului de mărunțire în moara fabricii de ciment

Se poate spune că s-a obținut o granulometrie corespunzătoare a clincherului, interval recomandat – $R_{25\text{mm}} < 5\%$, iar dimensiunile mari de alit și variabilitatea compozițională sunt factori care pot influența negativ consumul specific la măcinare și calitatea cimentului.(conform tabel 6.45). Gradul de umplere în camera I situată la limita inferioară a intervalului recomandat de literatura de specialitate este 27-33% și gradul de umplere în camera a II-a inclusă în intervalul recomandat de literatura de specialitate este 25-32%.

Media concentrației anuale atinsă (mg/Nm^3) în momentul măsurărilor pentru emisiile de praf în atmosfera a fost de aproximativ $\sim 10\%$ din limita maximă a licenței de funcționare (de $30 \text{ mg}/\text{Nm}^3$), adică $3,35 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, la punctul de emisie FS64 al filtrului cu saci, model FS64 de la moara de ciment cu bile și $3,41 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ la filtrul cu saci, tip FS7-21 al separatorului morii de ciment.

e)Pentru experimentul nr.5 - măcinare clincher cu ajutorul micro – morii de laborator PULVERISETTE 19 și analiza cantitativă a dimensiunii particulelor solide prin cernere uscată cu clasificatorul de site Analysette 3 Spartan

Din fig.6.74 și tabelul 6.47 se constată că clincherului s-a măcinat foarte fin, fapt rezultat din trecerea $T(\%)$ cumulată de 99,8 %, o trecere de 80,5 % prin sita de 0,2 mm și un procent de reziduu de 19,3 % pe aceeași sită a clasificatorului de site Analysette 3 Spartan.Rezidiul cel mai mult a rămas pe sitele de 6,3 în proporție de 84,9, pe sita de 5 în proporție de 80,6 și pe sita de 3,15 în proporție de 70,1.Prin aceste valori obținute se poate spune că clincherul folosit pentru măcinare este de bună calitate din punct de vedere mecanic – chimic în vederea obținerii pe langă aditivii de măcinare folosiți, a unui tip de ciment corespunzător standardelor actuale.

CAPITOLUL 7. CONCLUZII FINALE.CONTRIBUȚII PERSONALE.RECOMANDĂRI ȘI PERSPECTIVE DE CERCETARE

7.1. Concluzii finale privind cercetările teoretice și experimentale

1. Măcinarea materialelor în morile cu bile se reflectă în întregul cost al produsului. Morile cu circuit închis dublează consumul specific de energie, însă aici intervine și procesul de lucru și setările separatorului. Chiar dacă morile convenționale cu bile sunt folosite în procesele de măcinare de mai bine de un secol se mai fac încă pentru a îmbunătăți eficiența măcinării și performanțele acestora.

2. Sensoristica procesului de măcinare a cimentului în mori cu bile contribuie la automatizarea instalațiilor, în vederea monitorizării și reducerii consumurilor energetice pe unitatea de producție. Variațiile factorului de măcinare (factorul durtății clincherului) în proces reprezintă un element cheie în determinarea calității produsului și a productivității instalațiilor de fabricare a cimentului.

3. Modernizările tehnologice efectuate în fabricile de ciment din România în ultimii ani au contribuit la reducerea consumului de energie electrică pe unitate/ tona de produse, reducerea emisiilor de pulberi.
4. În urma cercetării privind viteza de măcinare a materialelor din industria cimentului s-a putut urmări modificarea curbei granulometrice a materialului în funcție de timp, modelul propus reflectând fenomenele reale care au loc pe parcursul procesului de măcinare.
5. Relația dintre indicele de aptitudine la măcinare și consumul de energie specific al morii tubulare care a demonstrat că indicele non-dimensional Hardgrove permite atât compararea materialelor, din punct de vedere al aptitudinii la măcinare, cu anumite materiale etalon, cât și evaluarea unui indice energetic similar cu cel al lui Bond.
6. Modelele matematice existente ale procesului de măcinare sunt dezvoltate pe baza echilibrului de masă sau a ecuațiilor de bilanț energetic care descriu reducerea dimensiunii particulelor materialului măcinat în funcție de timpul de măcinare sau în funcție de energia specifică consumată.
7. Dintre parametrii care afectează procesul și capacitatea de măcinare a morilor din industria cimentului se pot aminti: dimensiunea morii, rata de încărcare cu bile, forma, temperatura și umiditatea materiilor prime care intră în moară, sarcina circulantă în sistem, condițiile aerului ambiant, viteza de rotație a morii.
8. Pentru o proiectare și conducere optimă a instalațiilor, alături de bilanțul de materiale este necesară și stabilirea bilanțului energetic, de calitate și informațional, iar utilizarea calculului matricial poate fi de real folos fiind mai ușor de aplicat.

7.2. Contribuții personale și originale ale lucrării

1. Conform analizelor de laborator în urma măcinării probelor de clincher A și F se observă că compoziția mineralogică conform calculului lui Bogue C_2S clincher A > C_2S clincher F (11,48% > 6,8%) ceea ce rezultă că clincherul A necesită un consum suplimentar de energie la măcinare deoarece are un conținut mai mare de C_2S . (silicat de calciu) fapt arătat și prin consumul energetic (Clincher A 111.05 kwh/t > Clincher F 101.25 kwh/t).
2. Rezultatele determinărilor analizei granulometrice Laser pentru Clincher A, cât și pentru Clincher F, au arătat că ambele clinchere la clasa granulometrică de 115 μ m trecerea cumulată (%volumul material) este integrală de 100%.
3. În urma modelării concluzia este că pentru o energie cinetică mai scăzută a bilelor atunci când acestea ating suprafața este mai bine să se folosească mai multe bile și mai mult material de concasat.
4. În urma simulării s-a observat că viteza oferă informații despre mișcarea de încărcare, deoarece la începutul măcinării se pare că toate particulele sunt distribuite uniform în interiorul încărcăturii, iar dacă viteza morii crește, particulele se concentrează lângă perete și sunt lansate mai sus de la umărul încărcăturii.
5. Determinarea suprafeței specifice (SSB) a materialului mărunțit folosind metoda permeabilimetrului Blaine. Procedura Blaine este aplicabilă pentru toate cimenturile definite în standardul EN 196-6: 2018.
6. Rezultatele obținute pentru determinarea aptitudinii la măcinare în moara de laborator CEPROCIM S.A. și la aparatul de laborator Zeisel confirmă afirmațiile din literatura de specialitate că la presiuni mici influența presiunii nu se remarcă existând un minimum de 50 MPa la care aceasta trebuie realizată. Din analiza datelor prezentate rezultă că utilizarea pretensionării materialelor prin presare devine rentabilă la presiuni de peste 200 Mpa.
7. Rezultatele obținute pe aparatul de laborator Zeisel confirmă afirmațiile din literatura de specialitate că o presiune de până la 100 MPa exercitată asupra materialului nu este suficientă pentru a obține

rezultate care să justifice utilizarea unor mori cu valțuri sau concasoare, fapt demonstrat și în cazul determinării aptitudinii la măcinare pe moara de laborator tip CEPROCIM S.A .

8. Proba supusă analizei granulometrice laser a fost reprezentată de materialul trecut prin sita de 1000 μm . Valoarea rezidului pe sita de 1000 μm a fost de $R_{1000} = 0,0\%$. În urma rezultatelor obținute s-a trasat graficul trecerii cumulate de material(%vol) în funcție de clasa granulometrică (μm) de la 0,10 μm la 1000 μm .

9. În urma experimentelor putem trage concluzia că la cantitate mica de clincher (5 kg) și bile mari $\text{Ø}70+\text{Ø}65$ cantitatea de material rămasă este mare și începe să scadă pe parcurs ce se mărește dimensiunea bilelor de măcinare ($\text{Ø}70+\text{Ø}65+\text{Ø}45$)mm.

10. Determinările prin microscopie optică au arătat că analiza cantitativă a considerat fazele distincte ale clincherului, optic identificabile, incluzând atât fazele principale (alit, belit, aluminat tricalcic și feritaluminat de calciu), cât și fazele minore (var stins, oxid de magneziu cristalizat).

11. Referitor la determinările experimentale privind procesul de mărunțire și caracteristicile materialului la mărunțirea clincherului în fabricile de ciment, s-a observat că finețea de măcinare este corespunzătoare tipului de ciment fabricat.

12. Pentru determinări privind eficiența separării, conform parametrilor de eficiență ai separatorului WEDAG al morii de ciment, calculați pe baza rezidiilor pe sita cu latura ochiului de 90 μm s-a constatat următoarele: separare bună a finului, separare deficitară a grișului, eficiență relativ bună a separării și un coeficient de recirculare scăzut.

13. Este necesară corelarea rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale cu cele constatate din modelarea – simularea procesului de lucru al morilor cu bile, în vederea obținerii unor randamente ridicate de măcinare a clincherului cu consumuri de energie mici și emisii de pulberi rezultate scăzute. Conform cercetărilor teoretice numărul necesar de bile cu diametrul diferit într-o moară ar trebui să fie proporțional cu numărul de granule care se pot măcina cu diametre diferite. Abordarea DEM a fost aplicată într-un mod eșantionat pentru a investiga procesul de măcinare cu bile, inclusiv traiectoria, viteza și distribuția particulelor de pulbere și bile în interiorul morii și corelarea cu cele industriale.

14. În cadrul măsurătorilor de pulberi totale (emisii) de la sursele staționare de emisie, efectuate la o fabrică de ciment din România, la punctele de măsură: moara de ciment - ieșire moară și ieșire separator, s-a urmărit determinarea concentrației medii lunare (mg/Nm^3) la cele 2 puncte menționate în raport cu limita maximă din autorizația integrată de mediu - AIM a fabricii de ciment. Valorile prevăzute în AIM (sub 30 mg/Nm^3) au fost confirmate prin repartiția concentrațiilor obținute pe toată perioada măsurărilor la cele două puncte de măsură (valorile măsurate nu au depășit 5 mg/Nm^3).

7.3. Recomandări și perspective de cercetare

Pentru viitoarele activități de cercetare se recomandă:

1. Continuarea cercetării procesului de lucru al morilor tubulare cu bile bicamerale, din fabrici, prin efectuarea de audituri de proces și energetice, precum și cercetări de laborator folosind și alte tipuri de materiale (specifice industriei cimentului) în vederea stabilirii influenței diferiților parametri structurali și funcționali ai morii industriale asupra parametrilor de proces (consum de energie, calitate material măcinat) ai acestora.

2. Continuarea și extinderea cercetărilor privind comportarea materialului mărunțit (clincher, gips, zgura, calcarul , etc. în timpul procesului de măcinare prin analize specifice de laborator.

3. Realizarea unor modele de lucru ale procesului de măcinare a clincherului prin modelarea și simularea procesului de lucru al unei mori cu bile, biconic sau corp tronconic.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [16] **Ciobanu C., Istrate I.A., Tudor P., Voicu Gh., Dust Emission Monitoring in Cement Plant Mills: A Case Study in Romania**, Int.J.Enviro. Res. Public Health (IJERPH) 2021, MDPI, 18(17), 9096, ISSN 1661-7827 <https://doi.org/10.3390/ijerph18179096>.
- [17] **Ciobanu C., Istrate I.A., Tudor P., Voicu Gh., IJERPH | Free Full-Text | Dust Emission Monitoring in Cement Plant Mills: A Case Study in Romania | HTML** (mdpi.com).
- [18] **Ciobanu C., Tudor P., Constantin G.A., Musuroi G., Determination of granulometrical composition of the clinker by grinding in a ball mill to determine the specific consumption of additional energy**, 9 th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, E3S Web of Conferences, 180, 04007 (2020), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018004007>.
- [19] **Ciobanu C., Voicu Gh., Istrate I.A., Voicu P., Munteanu M.G., Variation of energy consumption and Specific Surface Blaine resulting from simulation of clinker grinding in a cement mill**, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 6-8 October 2022, ISB-INMA TEH' International Symposium.
- [20] **Ciobanu C., Voicu Gh., Istrate I.A., Tudor P., Aspects Regarding Polluting Emissions to the Stack of Clincher Ovens in Romanian Cement Factories | Scientific.Net**
- [21] **Ciobanu C., Voicu Gh., Istrate I.A., Tudor P., Grinding ability of unprocessed and processed clinker from cement industry**, U.P.B. Scientific Bulletin (Submission ID: 12745), 2022, ISSN 1454-2358.
- [22] **Ciobanu C., Voicu Gh., Toma M.L., Tudor P., Aspects on the working process of the cement mills and dimensional characteristics of the raw material**, 7 th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development. Conference Proceedings is indexed (BDI) in EBSCO Publishing Databases and INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL, pp 205-210, Proceedings-TE-RE-RD-2018-CD-ROM.pdf (pub.ro)
- [53] **Ipate G., Ciobanu C., Voicu Gh., Ilie F., Manaila F., Cardei P., Gageanu I., Cujbescu D., Adaptive Neuro-Fuzzy Model for the control system of the clinker grinding process in ball mills in cement factories**, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 6-8 October 2022, ISB-INMA TEH' International Symposium.
- [70] **Neville A.M., Proprietățile betonului**, Edit. Tehnică București, 2003
- [71] **Oprîș S., Manualul Inginerului din industria cimentului-volumul I**, Editura tehnica 1994.
- [96] **Voicu Gh., Ciobanu C., Istrate I. A., Tudor P., Aspects regarding dust emissions at cement factories in Romania and methods to reduce them**, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 30 October 2020, ISB-INMA TEH' International Symposium.
- [97] **Voicu Gh., Ciobanu C., Toma M.L., Tudor P., Aspects regarding the grinding efficiency of a cement mill from Romania**, (ISBN 978-619-7408-47-8, ISSN 1314-2704), 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2018, 02-08 July, 2018, pp 89-96, Albena, Bulgaria, DOI:10.5593/sgem2018/5.2/S20.012012.
- [99] **Wei Du, Lixiu Ma, Hongkui Li, Peng Huang, Zhenzhen Li, System dynamics model of output of ball mill** (sciendo.com).
- [107] ***, <https://cirom.ro/obiective-de-mediul/>
- [108] ***, ISO 14001 - Sistemul de Management de Mediu - Romanian Certification SystemsRS Cert - Certificari ISO Romania
- [109] ***, www.tuv-austria.ro/certificari/certificare-iso-9001-sisteme-managementul-calitatii/
- [110] ***, www.tuv-austria.ro/certificari/certificare-iso-45001-ohsas-18001-sanatate-securitate-munca/
- [111] ***, SA 8000 - certificare - responsabilitate socială | SGS România (sgsgroup.ro)
- [112] ***, ROMPRFIEN034-20160212121510 (anpm.ro)
- [113] ***, DECIZIA ETAPEI DE INCADRARE „Amplasare instalatie reducere noxe bazata pe apa amoniacala SC CRH CIMENT (ROMANIA) SA - Drafturi acte reglementare - ANPM
- [114] ***, <http://cementnet.ro/resurse/csr-si-ciment>

LISTA DE LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE ELABORATE

Drd. Ing. Cristian-Bogdan CIOBANU

2016

1. **Cristian Ciobanu**, Gheorghe Voicu, Magdalena-Laura Toma, Silviu Marcu, *Dioxins / Furans (PCDDs/PCDFs) Control in Cement Industry in Romania*, Journal of Engineering studies and research **2016**, pp 18-23, Bacău, Volume 22, No.3, Revistă categoria B+, <https://doi.org/10.29081/jesr.v22i3.99>.

2017

2. **C. Ciobanu**, Gh.Voicu, M.L. Toma., *Continuous monitoring equipment calibration of the dust and gaseous compounds emission from a cement plant*, (ISBN 978-619-7408-09-6, ISSN 1314-2704), 17th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2017, 29 June-05 July, 2017, pp 225-232, Albena, Bulgaria, DOI:10.5593/sgem2017/52/S20.030

2018

3. **C. Ciobanu**, Gh.Voicu, M.L. Toma, Paula Tudor, *Emissions Monitoring of Heavy Metals and their compounds resulted from combustion processes in clinker kilns in Romania*, Journal of Engineering studies and research, pp 17-23, Bacău, Volume 24 (2018) No.1, Revistă categoria B+, <https://doi.org/10.29081/jesr.v24i1.63>
4. **C. Ciobanu**, Gh Voicu, M.L. Toma, P. Tudor, *Aspects on the working process of the cement mills and dimensional characteristics of the raw material*, 7 th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development. Conference Proceedings is indexed (BDI) in EBSCO Publishing Databases and INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL, pp 205-210, Proceedings-TE-RE-RD-2018-CD-ROM.pdf (pub.ro)
5. Voicu Gh., **C. Ciobanu**, M.L. Toma, P. Tudor., *Aspects regarding the grinding efficiency of a cement mill from Romania*, (ISBN 978-619-7408-47-8, ISSN 1314-2704), 18th International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM 2018, 02-08 July, 2018, pp 89-96, Albena, Bulgaria, DOI:10.5593/sgem2018/5.2/S20.012012

2020

6. Voicu Gh., **C.Ciobanu**, Irina Aura Istrate, P. Tudor, *Emissions control of hydrochloric and fluorhydric acid in cement factories from Romania*, Int.J. Environ. Res. Public Health (IJERPH) **2020**, MDPI, 17(3), 1019, ISSN 1661-7827 <https://doi.org/10.3390/ijerph17031019> (articol ISI, WOS:000517783300344, IF 4, 614, Q1).
7. **C. Ciobanu**, P. Tudor, G.A.Constantin, G.Musuroi, *Determination of granulometrical composition of the clinker by grinding in a ball mill to determine the specific consumption of additional energy*, 9 th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, E3S Web of Conferences, 180, 04007 (2020), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018004007>
8. Voicu Gh., **C. Ciobanu**, I. A. Istrate, P. Tudor, *Aspects regarding dust emissions at cement factories in Romania and methods to reduce them*, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 30 October 2020, pp 138-145, ISSN-L 2344 – 4118, ISSN 2537 – 3773, index Copernicus, ISB-INMA TEH International Symposium, Hunedoara, Vol.19, Iss. 2, May2021:23-30, <https://www.proquest.com/docview/2568721025>

2021

9. **C.Ciobanu**, Voicu Gh., I. A. Istrate, P. Tudor, *Aspects Regarding Polluting Emissions to the Stack of Clinker Ovens in Romanian Cement Factories*, Scientific.Net, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland **2021**, ISSN 2234-991X, Vol 42, pp 159-166, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.42.159>
10. **C.Ciobanu**, I. A. Istrate, P. Tudor, Gh. Voicu, *Dust Emission Monitoring in Cement Plant Mills: A Case Study in Romania*, International Journal Environmental Research Public Health (IJERPH) **2021**, MDPI, 18(17), 9096, ISSN 1661-7827 <https://doi.org/10.3390/ijerph18179096>, (indexat ISI, WOS:000694081200001, IF(2020)=3.39, Q1).
11. **C. Ciobanu**, Gh. Voicu, I. A. Istrate, P. Tudor, *Pollution reduction through waste co- processing in Romanian cement plants*, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 29 October 2021 online, pp 370-377, ISSN-L 2344 – 4118, ISSN 2537 – 3773, index Copernicus, Hunedoara, Vol. 20, Iss. 2, May 2022: 161-166, <https://www.proquest.com/openview/a7e93c1953df9e5d862b8dc60978e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=616472>.

2022

12. **C.Ciobanu**, P. Tudor, I. A. Istrate, Voicu Gh., *Assessment of Environmental Pollution in Cement Plant Areas in Romania by Co-Processing Waste in Clinker Kilns*, *Energies* **2022**, 15(7), 2656, ISSN: 1996-1073; <https://doi.org/10.3390/en15072656>, (articol ISI, WOS:000781541400001, IF. 3,252).
13. **C.Ciobanu**, Voicu Gh., I. A. Istrate, P. Tudor, *Grinding ability of unprocessed and processed clinker from cement industry*, U.P.B. Scientific Bulletin, seria D, vol.85, nr.1/2023, ISSN 1223-7027
14. George Ipate, **C. Ciobanu**, Gh. Voicu, Filip Ilie, Florentina Manaila, Petru Cardei, Iuliana Gageanu, Dan Cujbescu, *Adaptive Neuro-Fuzzy Model for the control system of the clinker grinding process in ball mills in cement factories*, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 6-8 October 2022, vol. 68, no 3/2022, <https://api.inmateh.eu/public/uploads/68-57-N788-George-IPATEa812124f-d528-4774-84ad-b7b84bd5025b.pdf>.
15. **C. Ciobanu**, Gh. Voicu, I. A. Istrate, P.Voicu, M.G. Munteanu, *Variation of energy consumption and Specific Surface Blaine resulting from simulation of clinker grinding in a cement mill*, International Symposium ISB-INMA TEH, Agricultural and Mechanical Engineering, Bucharest 6-8 October 2022, pp 378-387, ISSN-L 2344 – 4118, ISSN 2537 – 3773, index Copernicus, ISB-INMA TEH' International Symposium