

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
FACULTATEA DE INGINERIE HUNEDOARA**

TEZĂ DE DOCTORAT

**Conducător științific:
PROF. DR. ING. SOCALICI ANA**

**Doctorand:
ING. LUPU OANA IZABELA**

**HUNEDOARA
2023**

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
FACULTATEA DE INGINERIE HUNEDOARA**

TEZĂ DE DOCTORAT

**VALORIFICAREA DEȘEURILOR MĂRUNTE
REZULTATE DIN PROCESUL DE ELABORARE ȘI
PROCESARE A OȚELULUI**

**Conducător științific:
PROF. DR. ING. SOCALICI ANA**

**Doctorand:
ING. LUPU OANA IZABELA**

**HUNEDOARA
2023**

**UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA
FACULTATEA DE INGINERIE HUNEDOARA**

TEZĂ DE DOCTORAT

**VALORIFICAREA DEȘEURILOR MĂRUNTE
REZULTATE DIN PROCESUL DE ELABORARE ȘI
PROCESARE A OȚELULUI**

COMISIA

**HUNEDOARA
2023**

PREFAȚĂ

Oțelul are un rol decisiv asupra sustenabilității societății noastre prin implementarea economiei circulare, prin adoptarea și abordarea completă a ciclului de viață a materialelor, care măsoară impactul social, economic și de mediu al unui semifabricat. Industria siderurgică este o parte integrantă a modelului economiei circulare, promovează conceptul zero deșeuri și reutilizează și reciclează materialele. Economia circulară conduce la o eficiență optimă a resurselor iar semifabricatele și produsele finite sunt proiectate pentru a fi durabile, ușor de reparat și reciclabile.

Cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat au fost orientate spre extinderea bazei de materii prime și materiale în industria siderurgică prin obținerea de subproduse cu conținut de fier și reintroducerea acestora în circuitul de producție al oțelului cu avantaje tehnologice, economice și ecologice. S-au identificat metode și tehnologii de reciclare și valorificare sub formă de brichete, aglomerat sau pelete a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier, cu posibilitatea implementării cu ușurință în practica industrială, cu costuri relativ reduse de către firmele procesatoare de deșeuri.

Teza de doctorat prezintă cercetările experimentale și rezultatele obținute cu privire la posibilitățile de valorificare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier din industria siderurgică. Cercetările experimentale în fază de laborator s-au efectuat în cadrul laboratoarelor Facultății de Inginerie Hunedoara, Universitatea Politehnica Timișoara iar cercetările industriale în cadrul unei uzine de elaborare și turnare a oțelului.

Teza de doctorat a fost realizată sub îndrumarea a doamnei Prof.dr.ing.habil. Socalici Ana Virginia, căruia doresc să îi mulțumesc pe această cale pentru sprijinul acordat pe tot parcursul studiilor doctorale.

Mulțumesc comisiei de îndrumare, doamnelor Conf.dr.ing Ardelean Erika și Conf.dr. Bistriana Diana respectiv domnului Director de Departament Ș.l.dr.ing. Puțan Vasile pentru îndrumarea și ajutorul acordat în cadrul experimentărilor efectuate, prelucrării datelor obținute și a definitivării tezei de doctorat. Sugestiile și discuțiile avute cu membrii comisiei de îndrumare respectiv cu membri departamentului de Inginerie și Management, au condus la îmbunătățirea permanentă a tezei precum și elaborarea articolelor științifice.

De asemenea, mulțumesc și domnului Prof.dr.ing. Hepuț Teodor pentru sprijinul acordat, sfaturile oferite și pentru împărtășirea cunoștințelor didactice și profesionale. Aduc mulțumiri cadrelor didactice respectiv cercetătorilor din cadrul Institutului de Cercetări pentru Energii Regenerabile Timișoara și a Facultății de Știința și Ingineria Materialelor de la Universitatea Politehnica din București pentru sprijinul acordat în caracterizarea probelor experimentale.

De asemenea, mulțumesc în mod deosebit domnului Dr.Eng. Ioan Rmulus Director al Uzinei TMK Reșița pentru sprijinul acordat în desfășurarea cercetărilor experimentale industriale din cadrul tezei de doctorat.

Nu în ultimul rând doresc să aduc mulțumiri conducerii Universității Politehnica Timișoara, Facultății de Inginerie Hunedoara și a Departamentului de Inginerie și Management, pentru asigurarea cadrului propice pe toata durata elaborării tezei de doctorat.

Mulțumesc în mod deosebit familiei mele pentru susținerea necondiționată!

Ing. Oana Izabela LUPU

CUPRINS

Listă figuri	8
Listă tabele	11
Cap.1. Plan de desfășurare a experimentărilor și cercetărilor	14
PARTEA I – Stadiul actual al cercetărilor privind valorificarea deșeurilor mărunte și pulverulente rezultate din siderurgie.....	17
Cap.2. Deșeuri mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică	18
2.1. Stadiul actual al tehnologiilor de obținere a oțelului	18
2.2. Surse și tipuri de deșeuri feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică	24
2.3. Tipuri de deșeuri feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică	27
2.3.1. Praful și șlamul de aglomerare – furnale	27
2.3.2. Praful de oțelărie	29
2.3.3. Praful și șlamul de convertizor	31
2.3.4. Țunderul și șlamul de țunder	32
2.3.5. Zgura de oțelărie	33
2.3.6. Deșeul sideritic	34
2.3.7. Șlamul feros	36
2.4. Concluzii	36
Cap.3. Analiza tehnologiilor de valorificare a deșeurilor rezultate din industria siderurgică	39
3.1. Considerații generale	39
3.2. Tehnologii de preparare a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente	40
3.2.1. Tehnologii de preparare mecanică a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente ..	41
3.2.2. Tehnologii de preparare termică a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente.....	42
3.3. Valorificarea deșeurilor feroase pulverulente prin procedee pirometalurgice.....	49
3.3.1. Procedee de valorificare în cuptoare rotative	49
3.3.2. Procedee de valorificare în cuptoare cu vatră rotativă.....	49
3.3.3. Procedee de valorificare în cuptoare cu cuvă înaltă.....	51
3.4. Procedee hidrometalurgice de valorificare a deșeurilor pulverulente.....	52
3.5. Concluzii.....	53
PARTEA a II – a Cercetări și experimentări proprii privind valorificarea deșeurilor rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului	54
Cap.4. Caracteristici calitative ale deșeurilor feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică.....	55
4.1. Caracterizarea șlamului de aglomerare – furnale.....	56
4.2. Caracterizarea șlamului de convertizor.....	59
4.3. Caracterizarea prafului de oțelărie electrică	62
4.4. Caracterizarea țunderului și a șlamului de țunder	66
4.5. Caracterizarea calitativă a șlamului feros.....	67
4.6. Caracterizarea zgurii de oțelărie.....	73
4.7. Caracterizarea deșeului/sterilului sideritic.....	81
4.8. Concluzii.....	81

Cap.5.	Experimentări în fază de laborator privind valorificarea deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier.....	83
5.1.	Instalații și echipamente folosite în cadrul experimentărilor de laborator.....	83
5.2.	Procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente prin brichetare.....	87
5.2.1.	Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea șlamului feros sub formă de brichete.....	90
5.2.2.	Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea țunderului sub formă de brichete.....	97
5.2.3.	Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea zgurii de oțelărie sub formă de brichete.....	101
5.2.4.	Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea șlamurilor (feros, aglomerare furnale și de țunder) sub formă de brichete.....	109
5.2.5.	Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea șlamului feros și a prafului de oțelărie sub formă de brichete.....	114
5.2.6.	Concluzii	118
5.3.	Procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente prin aglomerare.....	120
5.3.1.	Experimentări în fază de laborator privind valorificarea șlamului feros sub formă de aglomerat.....	121
5.3.2.	Experimentări în fază de laborator privind valorificarea țunderului și a zgurii sub formă de aglomerat.....	125
5.3.3.	Experimentări în fază de laborator privind valorificarea șlamurilor feroase sub formă de aglomerat.....	130
5.3.4.	Concluzii.....	132
5.4.	Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea deșeurilor sub formă de pelete.....	133
5.5.	Concluzii.....	139
Cap.6.	Optimizarea structurii rețetelor experimentale la procesarea deșeurilor sub formă de brichete.....	140
6.1.	Modelarea matematică a procesului de valorificare a zgurii de oțelărie sub formă de brichete.....	141
6.2.	Modelarea matematică a procesului de valorificare a șlamurilor sub formă de brichete.....	144
6.3.	Modelarea matematică a procesului de valorificare a deșeurilor feroase pulverulente sub formă de brichete.....	147
6.4.	Concluzii.....	150
Cap.7.	Valorificarea industrială a datelor privind valorificarea deșeurilor mărunte și pulverulente sub formă de brichete	151
7.1.	Cadrul tehnologic experimental	151
7.2.	Raport șarje-bilanț utilizare sortiment E3P	153
7.2.1.	Bilanț încărcătură cuptor cu arc electric EBT.....	153
7.2.2.	Bilanț încărcătură cuptor cu arc electric tip EBT- turnare continuă TC	158
7.3.	Concluzii	162
Cap.8.	Concluzii finale. Contribuții originale. Direcții viitoare de cercetare.....	163
8.1.	Concluzii finale	163
8.2.	Contribuții originale	165
8.3.	Direcții de continuare a cercetărilor	167
	Diseminarea rezultatelor	168

Bibliografie	170
Anexa 1	175
Anexa 2	178
Anexa 3	180
Anexa 4	182
Anexa 5	183
Anexa 6	184
Anexa 7	185
Anexa 8	186
Anexa 9	187
Anexa 10.....	188

LISTĂ FIGURI

- Figura 2.1. Evoluția producției de oțel 1950-2022, în milioane tone
Figura 2.2. Distribuția geografică a producției de oțel în 2019
Figura 2.3. Utilizarea oțelului pe sectoare industriale
Figura 2.4. Fluxurile tehnologice de producere a oțelului
Figura 2.5. Agregate/utilaje pentru fabricarea și turnarea semifabricatelor din oțel
Figura 2.6. Cuptorul electric cu arc tip EBT
Figura 2.7. Cuptorul electric cu arc în curent continuu
Figura 2.8. Elaborarea oțelului cu posibilitatea preîncălzirii încărcăturii metalice
Figura 2.9. Elaborarea oțelului prin procedeul Contiarc
Figura 2.10. Elaborarea oțelului prin procedeul CONARC
Figura 2.11. Tratamentul secundar al oțelului
Figura 2.12. Procede speciale de elaborare a oțelurilor
Figura 2.13. Alternative de obținere a oțelului
Figura 2.14. Tipuri de deșeuri și sursele de generare a acestora în siderurgie
Figura 2.15. Cantități specifice de deșeuri pulverulente generate în cadrul unui combinat siderurgic
Figura 2.16. Conceptul de reciclare integrată a deșeurilor feroase pulverulente în siderurgie
Figura 2.17. Deșeuri rezultate la elaborarea oțelului
Figura 2.18. Domenii de utilizare a zgurii metalurgice
Figura 2.19. Mărimea granulelor și distribuirea greutateii prafului rezultat în procesul de aglomerare
Figura 2.20. Depozitul de șlam aglomerare-furnale ArcelorMittal Hunedoara
Figura 2.21. Depozitul de șlam aglomerare - furnale platforma industrială Sidermet Călan
Figura 2.22. Structura ecranelor sistemului de desprăfuire la un cuptor cu arc electric tip EBT
Figura 2.23. Iazul decantor a șlamului de furnal și convertizor rezultat pe platforma industrială a combinatului de la Galați
Figura 2.24. Halda de zgură, Călan
Figura 2.25. Halda de zgură, Hunedoara
Figura 2.26. Halda de zgură, Galați
Figura 2.27. Halda de talc-dolomită, Hunedoara
Figura 2.28. Iazurile de depozitare a deșeurilor sideritice, suprafața ocupată și cantitățile depozitate
Figura 2.29. Obiective de dezvoltare durabilă
Figura 2.30. Aplicații ale subproduselor din industria oțelului
Figura 3.1. Maturitatea diferitelor tehnologii de producere a fontei și oțelului
Figura 3.2. Procede de reducere directă a fierului din minereuri
Figura 3.3. Procede de reducere directă cu producere de metal lichid
Figura 3.4. Schema instalației de tratament al șlamului de furnal în hidrocicloane
Figura 3.5. Mecanismul formării peletelor crude
Figura 3.6. Instalații pentru producerea peletelor
Figura 3.7. Fluxul tehnologic de peletizare a uzinei KOBELCO
Figura 3.8. Instalația de brichetare a prafului de convertizor, Thyssen Stahl AG
Figura 3.9. Aglomerarea termică
Figura 3.10. Fluxul tehnologic de obținere și utilizare a Carbofer-ului în cuptorul cu arc electric
Figura 3.11. Metode de procesare a țunderului și șlamului uleios
Figura 3.12. Banda pentru procesul de aglomerare cu două straturi
Figura 3.13. Procesarea țunderului și șlamului de laminare prin procedeul Altwert Oecotec
Figura 3.14. Valorificarea deșeurilor pulverulente prin procedeul Waelz
Figura 3.15. Valorificarea deșeurilor pulverulente prin procedeul INMETCO
Figura 3.16. Procesul FASTMET, dezvoltat de Midrex Technologies and Kobe Steel
Figura 3.17. Procedeul FASTMELT, dezvoltat de Midrex Technologies and Kobe Steel

- Figura 3.18. Procedeeul PRIMUS - cuptor cu vetre multietajate
- Figura 3.19. Valorificarea deșeurilor pulverulente prin procedeul EnvIRONment
- Figura 4.1. Distribuția claselor granulometrice pentru șlamul de aglomerare-furnale
- Figura 4.2. Cinetica umectării a șlamului de aglomerare-furnale
- Figura 4.3. Imaginea de microscopie electronică cu baleiaj a șlamului de aglomerare furnale
- Figura 4.4. Imagini de distribuție de raze X pentru șlamul de aglomerare-furnale
- Figura 4.5. Spectrul de raze X dispersiv în energie (EDAX) pentru șlamul de aglomerare-furnale
- Figura 4.6. Cinetica umectării șlamului de convertizor
- Figura 4.7. Imagini de microscopie electronică cu baleiaj pentru șlamul de convertizor
- Figura 4.8. Imagini de distribuție de raze X pentru șlamul de convertizor
- Figura 4.9. Spectrul de raze X dispersiv în energie (EDAX) pentru șlamul de convertizor
- Figura 4.10. Distribuția granulometrică a prafului de oțelărie
- Figura 4.11. Cinetica umectării prafului de oțelărie de la TMK Reșița
- Figura 4.12. Imagini de microscopie electronică cu baleiaj pentru praful de oțelărie TMK Reșița
- Figura 4.13. Imagini de distribuție de raze X pentru praful de oțelărie de la TMK Reșița
- Figura 4.14. Spectrul de raze X dispersiv în energie (EDAX) pentru praful de oțelărie de la TMK Reșița
- Figura 4.15. Distribuția granulometrică a țănderului
- Figura 4.16. Imagine SEM și spectrele EDS pentru proba de țănder ArcelorMittal Hunedoara
- Figura 4.17. Rezultatele analizei XRD pentru proba de țănder ArcelorMittal Hunedoara
- Figura 4.18. Componenta granulometrică a șlamului de țănder
- Figura 4.19. Probă șlam feros
- Figura 4.20. Instalația pentru clasarea șlamului feros
- Figura 4.21. Componenta granulometrică a șlamului feros
- Figura 4.22. Imagini SEM pentru șlamul feros
- Figura 4.23. Imagini la microscopul electronic și elemente existente – P1 șlam feros
- Figura 4.24. Imagini la microscopul electronic și elemente existente – P2 șlam feros
- Figura 4.25. Imagini la microscopul electronic și elemente existente – P3 șlam feros
- Figura 4.26. Imagini la microscopul electronic și elemente existente – P4 șlam feros
- Figura 4.27. Diagrame ternare reprezentative a zgurilor siderurgice
- Figura 4.28. Instalația de procesare a zgurii – Halda Buituri
- Figura 4.29. Sorturi de zgură – Halda Buituri
- Figura 4.30. Probe de zgură prelevate de pe haldă
- Figura 4.31. Analiza zgurii de oțelărie-cuptor electric (imagine SEM, analiza și spectrul EDS și identificarea fazelor componente)
- Figura 4.32. Analiza zgurii de oțelărie-tratament secundar (imagine SEM, analiza și spectrul EDS și identificarea fazelor componente)
- Figura 5.1. Schema tehnologică de procesare a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică
- Figura 5.2. Matriță brichete experimentale
- Figura 5.3. Procesare brichetă experimentală
- Figura 5.4. Fluxul tehnologic de producere a brichetelor
- Figura 5.5. Componenta rețetelor experimentale
- Figura 5.6. Diagrama de durificare a brichetelor
- Figura 5.7. Aspecte din timpul experimentărilor și testelor
- Figura 5.8. Analiza EDS pentru bricheta experimentală R1
- Figura 5.9. Fluxul tehnologic de prelucrare a materialelor componente din șarja de brichetare
- Figura 5.10. Loturile experimentale de brichete
- Figura 5.11. Aspecte din timpul determinării rezistenței la compresiune
- Figura 5.12. Cuptorul Tamann
- Figura 5.13. Clase granulometrice – material feros - granulația sub 10mm
- Figura 5.14. Flux tehnologic de brichetare

- Figura 5.15. Diagrama de durificare a brichetelor
Figura 5.16. Compoziția chimică a componentilor rețetelor experimentale
Figura 5.17. Aspecte din timpul obținerii brichetelor experimentale
Figura 5.18. Flux tehnologic de brichetare
Figura 5.19. Diagrama de durificare a brichetelor
Figura 5.20. Compoziția chimică medie a brichetelor
Figura 5.21. Încercările de rezistență la compresiune pentru brichetele experimentale
Figura 5.22. Analiza SEM pentru bricheta experimentală R1
Figura 5.23. Fluxul tehnologic de procesare a deșeurilor prin brichetare
Figura 5.24. Componenta rețetelor experimentale
Figura 5.25. Diagrama de durificare a brichetelor
Figura 5.26. Determinări ale caracteristicilor de rezistență pentru brichetele experimentale
Figura 5.27. Compoziție chimică brichete experimentale după reducere
Figura 5.28. Gradul de eliminare a Zn
Figura 5.29. Schema instalației pilot pentru aglomerare
Figura 5.30. Flux tehnologic experimental de procesare a aglomeratului
Figura 5.31. Evoluția temperaturii și zonele de ardere la producerea aglomeratului
Figura 5.32. Flux tehnologic de peletizare
Figura 5.33. Flux tehnologic de producere a aglomeratului
Figura 5.34. Aspecte din timpul obținerii aglomeratului experimental
Figura 5.35. Probă aglomerat experimental supusă analizei SEM
Figura 5.36. Imagine SEM aglomerat
Figura 5.37. Clasele granulometrice a șlamului de aglomerare furnale
Figura 5.38. Clasele granulometrice a șlamului feros
Figura 5.39. Clasele granulometrice a șlamului de tunder
Figura 5.40. Analizele SEM a deșeurilor utilizate
Figura 5.41. Fluxul tehnologic de obținere a aglomeratului experimental
Figura 5.42. Aspecte din timpul obținerii aglomeratului în instalația pilot de aglomerare
Figura 5.43. Flux tehnologic de procesare a șlamurilor feroase
Figura 5.44. Aspecte din timpul experimentărilor de laborator
Figura 5.45. Flux tehnologic de peletizare [82]
Figura 5.46. Aspecte din timpul experimentărilor de laborator
Figura 5.47. Rezultatele analizei EDS (Spot 1)
Figura 5.48. Rezultatele analizei EDS (Spot 2)
Figura 5.49. Rezultatele analizei liniare EDS pentru peletele experimentale
Figura 6.1. $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$
Figura 6.2. $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$
Figura 6.3. $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$
Figura 6.4. $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$
Figura 6.5. $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$
Figura 6.6. $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$
Figura 6.7. $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$
Figura 6.8. $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$
Figura 6.9. $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$
Figura 7.1. Fluxul tehnologic de elaborare și turnare a oțelului
Figura 7.2. Cuptorul electric cu arc tip EBT
Figura 7.3. Instalația de tratament secundar LF
Figura 7.4. Instalația de tratament în vid tip VD
Figura 7.5. Instalația de turnare continuă
Figura 7.6. Repartiția încărcăturii metalice la șarjele de oțel elaborate
Figura 7.7. Încărcătura metalică la șarjele de oțel elaborate cu evidențierea sortimentului E3P
Figura 7.8. Sortimentul E3P utilizat în încărcătura metalică a șarjelor de oțel

LISTĂ TABELE

- Tabelul 2.1. Compoziția chimică a șlamului de la aglomerare – furnale (Bataga)
- Tabelul 2.2. Compoziția chimică a prafului de furnal ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 2.3. Compoziția chimică a prafului de furnal Reșița
- Tabelul 2.4. Compoziția chimică a prafului de furnal Călan
- Tabelul 2.5. Compoziția chimică a prafului de furnal Galați
- Tabelul 2.6. Compoziția chimică a prafului de la electrofiltru (O.S.M. II Hunedoara)
- Tabelul 2.7. Compoziția chimică a prafului de oțelărie ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 2.8. Compoziția chimică a prafului de oțelărie TMK Reșița
- Tabelul 2.9. Compoziția chimică a prafului de oțelărie MECHEL Oțelul Roșu
- Tabelul 2.10. Compoziția chimică a prafului de convertizor (Galați)
- Tabelul 2.11. Compoziția chimică șlamului de convertizor (Galați)
- Tabelul 2.12. Componenta țunderului de laminare
- Tabelul 2.13. Compoziția chimică a țunderului, %
- Tabelul 2.14. Deșeuri industriale generate în cadrul ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 2.15. Compoziția chimică a țunderului ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 2.16. Compoziția chimică a șlamului de țunder ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 2.17. Halde de zgură din România
- Tabelul 2.18. Compoziția zgurii de oțelărie, fracție feroasă
- Tabelul 2.19. Compoziția chimică a deșeurilor de la prepararea minereurilor sideritice
- Tabelul 2.20. Compoziția chimică a șlamului feros
- Tabelul 2.21. Indicatorii de dezvoltare durabilă aferenți industriei siderurgice
- Tabelul 3.1. Procesarea deșeurilor pulverulente
- Tabelul 3.2. Dimensiunile granulometrice ale materialelor reciclate la aglomerare
- Tabelul 4.1. Subproduse generate pe fluxul de producere a oțelului, în kg/t produs.
- Tabelul 4.2. Compoziția chimică a șlamului de aglomerare-furnale Bataga
- Tabelul 4.3. Granulometria șlamului de aglomerare-furnale
- Tabelul 4.4. Caracteristica de umectare a șlamului de aglomerare-furnale
- Tabelul 4.5. Compoziția chimică a șlamului de convertizor
- Tabelul 4.6. Caracteristica de umectare a șlamului de convertizor
- Tabelul 4.7. Compoziția chimică a prafului de oțelărie de la ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 4.8. Compoziția chimică a prafului de oțelărie de la TMK Reșița
- Tabelul 4.9. Compoziția chimică a prafului de oțelărie de la MECHEL Oțelul Roșu
- Tabelul 4.10. Granulometria prafului de oțelărie de la TMK Reșița
- Tabelul 4.11. Caracteristicile cinetice capacității de umectare ale prafului de oțelărie de la TMK Reșița
- Tabelul 4.12. Fazele posibile de amestec ale oxizilor de Zn și Fe
- Tabelul 4.13. Analiza chimică a deșeurilor tip țunder din industria siderurgică
- Tabelul 4.14. Analiza chimică a probei de țunder de la ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 4.15. Compoziția chimică a șlamului de țunder de la ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 4.16. Compoziția chimică a șlamului feros
- Tabelul 4.17. Componentele minerale a zgurilor de oțelărie
- Tabelul 4.18. Compoziția chimică a probelor de zgură de oțelărie - haldă
- Tabelul 4.14. Analiza chimică a probei de țunder de la ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 4.15. Compoziția chimică a șlamului de țunder de la ArcelorMittal Hunedoara
- Tabelul 4.16. Compoziția chimică a șlamului feros
- Tabelul 4.17. Componentele minerale a zgurilor de oțelărie
- Tabelul 4.18. Compoziția chimică a probelor de zgură de oțelărie - haldă
- Tabelul 4.19. Compoziția chimică a deșeurilor sideritice iaz decantare
- Tabelul 4.20. Compoziția granulometrică a deșeurilor sideritice

- Tabelul 5.1. Instalații și echipamente utilizate în cadrul experimentărilor în fază de laborator
- Tabelul 5.2. Componenta rețetelor
- Tabelul 5.3. Compoziția chimică medie a brichetelor experimentale
- Tabelul 5.4. Brichete experimentale /imagini stereomicroscop
- Tabelul 5.5. Compoziția chimică a oțelului la topire
- Tabelul 5.6. Bilanțul încărcăturii
- Tabelul 5.7. Compoziția chimică a oțelului
- Tabelul 5.8. Compoziția chimică a zgurii
- Tabelul 5.9. Bilanțul fierului
- Tabelul 5.10. Compoziția chimică a deșeurilor supuse experimentărilor
- Tabelul 5.11. Componenta rețetelor experimentale
- Tabelul 5.12. Rezistența la fisurare [N/mm^2] și rezistența la compresiune [N/mm^2] a brichetelor
- Tabelul 5.13. Componenta încărcăturii pentru cuptorul Tamann
- Tabelul 5.14. Componenta rețetelor experimentale
- Tabelul 5.15. Compoziția chimică a rețetelor
- Tabelul 5.16. Analiza brichetelor experimentale
- Tabelul 5.17. Analiza brichetelor experimentale după durificare
- Tabelul 5.18. Compoziția chimică a oțelului la topire
- Tabelul 5.19. Compoziția chimică a oțelului elaborat
- Tabelul 5.20. Compoziția chimică a zgurii
- Tabelul 5.21. Bilanțul încărcăturii
- Tabelul 5.22. Bilanțul fierului
- Tabelul 5.23. Rețete experimentale
- Tabelul 5.24. Analiza brichetelor experimentale după durificare
- Tabelul 5.25. Rețete
- Tabelul 5.26. Analiza brichetelor experimentale
- Tabelul 5.27. Aglomeratul experimental
- Tabelul 5.28. Indicatori calitativi - șarje experimentale
- Tabelul 5.29. Compoziția chimică a oțelului la topire
- Tabelul 5.30. Compoziția chimică finală a oțelului
- Tabelul 5.31. Compoziția chimică a zgurii
- Tabelul 5.32. Bilanțul încărcăturii
- Tabelul 5.33. Bilanțul fierului
- Tabelul 5.34. Compoziția chimică a țunderului
- Tabelul 5.35. Compoziția chimică a fracției feroase a zgurii de oțelărie
- Tabelul 5.36. Compoziția chimică a șlamului de aglomerare furnale
- Tabelul 5.37. Compoziția chimică a șlamului feros
- Tabelul 5.38. Compoziția chimică a șlamului de țunder
- Tabelul 5.39. Componenta rețetelor aglomeratului experimental
- Tabelul 5.40. Compoziția chimică a aglomeratului experimental
- Tabelul 5.41. Indicatori calitativi - șarje experimentale
- Tabelul 5.42. Caracterizare aglomerat experimental
- Tabelul 5.43. Componenta rețetei experimentale
- Tabelul 5.44. Compoziția chimică a aglomeratului experimental
- Tabelul 5.45. Caracterizare aglomerat experimental
- Tabelul 5.46. Compoziția chimică a oțelului la topire
- Tabelul 5.47. Compoziția chimică finală a oțelului
- Tabelul 5.48. Compoziția chimică a zgurii
- Tabelul 5.49. Bilanțul încărcăturii
- Tabelul 5.50. Bilanțul fierului
- Tabelul 5.51. Compoziția chimică a peletelor/micropeletelor
- Tabelul 5.52. Pelete experimentale

- Tabelul 5.53. Rezistența la compresiune a peletelor
Tabelul 5.54. Compoziția chimică a oțelului la topire
Tabelul 5.55. Bilanțul încărcăturii
Tabelul 5.56. Compoziția chimică a oțelului
Tabelul 5.57. Compoziția chimică a zgurii
Tabelul 5.58. Bilanțul fierului
Tabelul 6.1. Tabloul experimentelor pentru valorificarea zgurii de oțelărie sub formă de brichete
Tabelul 6.2. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_1
Tabelul 6.3. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_2
Tabelul 6.4. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_3
Tabelul 6.5. Tabloul experimentelor pentru valorificarea șlamurilor feroase sub formă de brichete
Tabelul 6.6. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_1
Tabelul 6.7. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_2
Tabelul 6.8. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_3
Tabelul 6.9. Tabloul experimentelor pentru valorificarea deșeurilor pulverulente sub formă de brichete
Tabelul 6.10. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_1
Tabelul 6.11. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_2
Tabelul 6.12. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_3
Tabelul 7.1. Date inițiale elaborare șarje oțel cu adaos de brichete E₃P
Tabelul 7.2. Structura încărcăturii metalice a șarjelor de oțel
Tabelul 7.3. Bilanțul de metal
Tabelul 7.4. Consumuri specifice – situație globală șarje de oțel
Tabelul 7.5. Consumuri specifice (șarjele 1-2), oțel marca 4140, țagă Ø220
Tabelul 7.6. Consumuri specifice (șarja 3), oțel marca 4130, țagă Ø220
Tabelul 7.7. Consumuri specifice (șarjele 4-5), oțel marca 4140, țagă Ø280
Tabelul 7.8. Consumuri specifice materii prime, combustibil, energie și electrozi la șarjele de oțel
Tabelul 7.9. Compoziția chimică la topire la șarjele de oțel
Tabelul 7.10. Analize chimice probe brichete E₃P
Tabelul 7.11. Grad metalizare
Tabelul 7.12. Date experimentale capacitate diluție și recuperare elemente
Tabelul 7.13. Bilanț CEA-TC pentru șarjele 1 și 2
Tabelul 7.14. Analiza chimică la elaborare în cuptor pentru șarjele 1 și 2
Tabelul 7.15. Analiza chimică finală pentru șarjele 1 și 2
Tabelul 7.16. Consumuri specifice pentru CEA - TC la șarjele 1 și 2
Tabelul 7.17. Bilanț CEA-TC la șarja 3
Tabelul 7.18. Analiza chimică chimică la elaborare în cuptor pentru șarja 3
Tabelul 7.19. Analiza chimică finală pentru șarja 3
Tabelul 7.20. Consumuri specifice pentru CEA - TC la șarja 3
Tabelul 7.21. Bilanț CEA – TC la șarjele 4 și 5
Tabelul 7.22. Analiza chimică chimică la elaborare în cuptor pentru șarjele 4 și 5
Tabelul 7.23. Analiza chimică chimică finală pentru șarjele 4 și 5
Tabelul 7.24. Consumuri specifice pentru CEA - TC la șarjele 4 și 5

CAPITOLUL 1

PLAN DE DESFĂȘURARE A EXPERIMENTĂRILOR ȘI CERCETĂRILOR

În industria siderurgică, pe lângă produsul principal de fabricație rezultă o serie de produse secundare și deșeuri, deșeuri mărunte și pulverulente cu conținut de fier, de carbon, elemente de aliere, fier și carbon, precum și oxizi, în regim continuu în cantități apreciabile, proporționale cu producția realizată. Cantitățile generate pe fluxurile curente de fabricație se adaugă cantităților de deșeuri existente, depozitate și prezintă un impact negativ asupra mediului.

Industria siderurgică este un sector important al economiei unde este operaționalizat conceptul de dezvoltare durabilă și trebuie implementată economia circulară prin reciclarea produselor secundare și transformarea acestora în subproduse utilizate în industria siderurgică sau alte sectoare de activitate ca și componente de capital natural (materii prime, materiale auxiliare, etc).

Este necesară o continuare a cercetărilor în domeniu pentru a stabili cele mai performante procedee sau tehnologii de reciclare din punct de vedere tehnologic, economic și ecologic.

Cercetările trebuie orientate spre experimentări care să determine caracteristicile calitative a deșeurilor mărunte și pulverulente cu potențial real de reciclare și perfecționarea tehnologiilor, tehnicilor și metodelor de reciclare și valorificare la costuri minime.

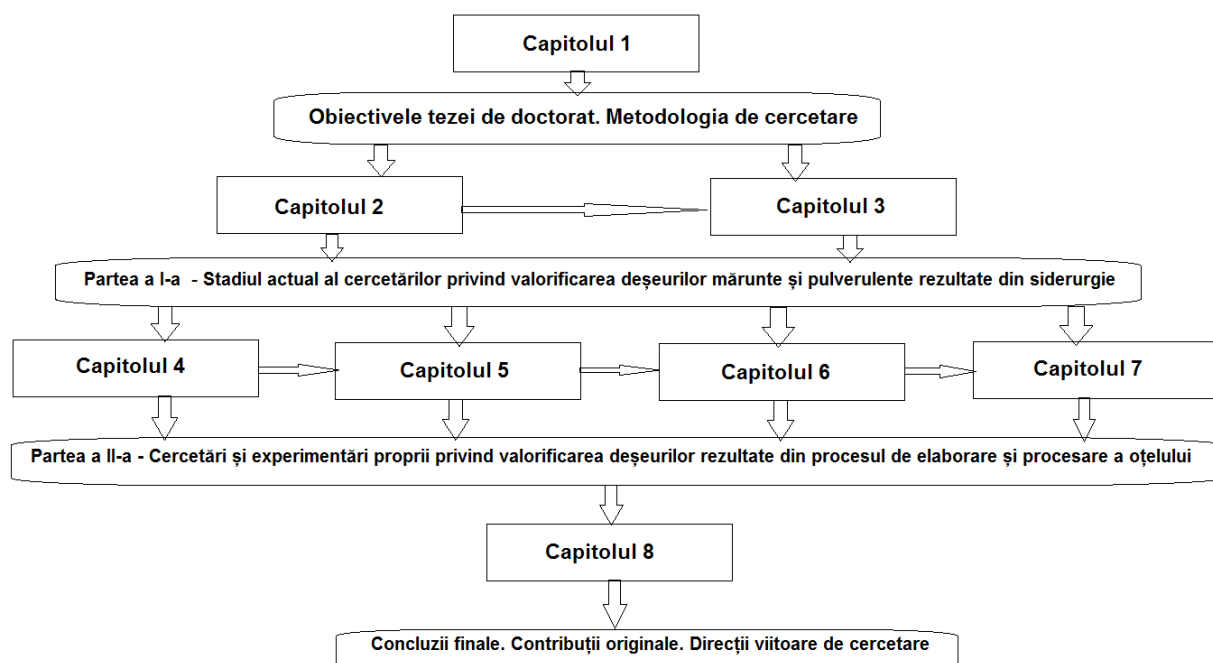
În industria siderurgică rezultă deșeuri feroase pulverulente și mărunte, cu un conținut ridicat de Fe, legat chimic, uneori metalic care pot înlocui materia primă, respectiv minereul de fier/fonta/fierul vechi în procesele de elaborare a oțelului.

Obiectivul fundamental al tezei de doctorat constă în identificarea soluțiilor de procesare și valorificare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului.

Pentru îndeplinirea obiectivului fundamental s-au stabilit următoarele **obiective specifice**:

- Analiza privind situația deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului;
- Analiza stadiului actual a tehnologiilor și procedeele de valorificare a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente;
- Caracterizarea calitativă și tehnologică a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului;
- Realizarea de experimentări în fază de laborator privind posibilitățile de procesare și valorificare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului;
- Stailirea rețetelor optime de procesare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului;
- Verificarea industrială a datelor rezultatelor obținute în cadrul experimentărilor în fază de laborator;
- Analiza globală a rezultatelor;
- Formularea de concluzii și contribuții originale precum și identificarea direcțiilor de cercetare viitoare referitoare la tematica abordată.

Teza de doctorat **Valorificarea deșeurilor mărunte rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului** este structurată în două părți, șase capitole urmată de concluzii finale, contribuții originale, diseminarea rezultatelor cercetării, bibliografie și anexe.



Partea a I-a - Stadiul actual al cercetărilor privind valorificarea deșeurilor mărunte și pulverulente rezultate din siderurgie cuprinde două capitole în care se analizează stadiul actual al tehnologiilor de elaborare a oțelului cu scoaterea în evidență a generării deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier, caracterizarea acestor produse secundare și identificarea tehnicilor, tehnologiilor și metodelor de transformare a acestora în subproduse utilizabile în industria siderurgică ca și componente de capital natural prin extinderea bazei de materii prime.

Capitolul 2 – Deșeuri mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică prezintă sursele de deșeuri pulverulente și mărunte cu conținut de fier, principalele caracteristici tehnologice, precum și stadiul de valorificare a acestora pe plan național și internațional.

Capitolul 3 - Analiza tehnologiilor de valorificare a deșeurilor rezultate din industria siderurgică situația pe plan mondial a metodelor, procedeele și a tehnologiilor de procesare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier.

Partea a II-a - Cercetări și experimentări proprii privind valorificarea deșeurilor rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului, este structurat pe patru capitole și prezintă cercetările proprii efectuate în fază de laborator cu privire la identificarea soluțiilor de procesare și valorificare a deșeurilor pulverulente și mărunte în industria siderurgică.

Capitolul 4 - Caracteristici calitative ale deșeurilor feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică prezintă caracterizarea calitativă și tehnologică a probelor de deșeuri, efectuată în laboratoarele Facultății de Inginerie Hunedoara respectiv a Institutului de Cercetări de Energii Regenerabile din cadrul Universității Politehnica Timișoara. Probele supuse determinărilor au fost prelevate de la societățile ArcelorMittal Hunedoara, TMK Reșița, SC Hoeganaes Corporation Europe SA Buzău și diverse societăți care procesează sau au în administrare depozite de deșeuri feroase mărunte și pulverulente. S-au determinat o serie de caracteristici a produselor secundare rezultate din industria siderurgice, și anume: analize chimice, granulometrice, unghiul de taluz natural, densitatea în vrac, cinetica de umectare a materialelor și analiza mineralogică și morfologică a acestora.

Capitolul 5 - Experimentări în fază de laborator privind valorificarea deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier prezintă rezultatele și subprodusele obținute în urma cercetărilor experimentale în fază de laborator efectuate la Facultatea de Inginerie Hunedoara. Testările de laborator s-au efectuat pe echipamentele și instalațiile pilot existente în

laboratorul Topituri metalice respectiv în Hala tehnologică a facultății. S-au experimentat și identificat posibilitățile de valorificare a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente, utilizând tehnologiile clasice (brichetare, aglomerare, peletizare) cu obținerea de subproduse experimentale (brichete/aglomerat/pelete) utilizabile ca și materie primă în industria siderurgică.

S-au experimentat mai multe loturi de rețete pentru fiecare tehnologie de procesare în parte. Pentru testările experimentale în fază de laborator s-au utilizat deșeuri rezultate din industria siderurgică, deșeuri mărunte și pulverulente cu conținut de fier, și anume: șlam feros, șlam de țunder, șlam aglomerare-furnale, țunder, zgură feroasă, concentrat de deșeu sideritic, praf de oțelărie. S-au testat aproximativ 8 loturi de rețete a câte 10-12 rețete la procesarea prin brichetare, 6 rețete la procesarea prin aglomerare și 10 rețete la procesarea prin peletizare. Subprodusele obținute au caracterizate calitativ și tehnologic și pentru fiecare lot de subproduse (brichete/aglomerat/pelete) s-a determinat gradul de recuperare al fierului, prin utilizarea acestora în încărcătura metalică a cuptorului cu inducție din laborator.

Capitolul 6 - Optimizarea structurii rețetelor experimentale la procesarea deșeurilor sub forma de brichete prezintă modelarea matematică a datelor experimentale efectuată, aplicând metoda proiectării experimentelor, metoda celor mai mici pătrate și algoritmi genetici. Pentru stabilirea unor relații de corelație între factorii tehnologici de rezistență la compresiune a brichetelor experimentale, datele au fost prelucrate în programul de calcul Matlab, optimizarea făcându-se utilizând algoritmi genetici. Utilizând metoda suprafețelor de răspuns s-a determinat legătura dintre parametrii procesului și răspunsurile caracteristice ale acestuia ca suprafețe în spațiul multidimensional al variabilelor. Variabilele independente au fost variate simultan, luând un număr limitat de valori în domeniul de experimentare considerat. Rezultatele obținute conduc la îmbunătățirea performanțelor procesului studiat iar o analiză tehnologică a corelațiilor prezentate au permis identificarea intervalelor optime de variație pentru componența rețetelor subproduselor experimentale.

Capitolul 7 – Verificarea industrială a datelor privind valorificarea deșeurilor mărunte și pulverulente sub formă de brichete prezintă experimentările industriale efectuate într-o uzină siderurgică efectuate pentru verificarea și validarea rezultatelor experimentale obținute în fază de laborator cu privire la procesarea șlamului feros sub formă de brichete.

Capitolul 8 – Concluzii finale. Contribuții originale. Direcții viitoare de cercetare prezintă concluzii finale obținute, contribuțiile originale, modul de implementare în practică a rezultatelor cercetării respectiv a direcțiilor de continuare a cercetărilor.

În partea finală sunt prezentate sursele bibliografice, diseminarea rezultatelor cercetării și anexele.

**PARTEA I-a STADIUL ACTUAL AL
CERCETĂRILOR PRIVIND VALORIFICAREA
DEȘEURILOR MĂRUNTE ȘI PULVERULENTE
REZULTATE DIN SIDERURGIE**

CAPITOLUL 2

DEȘEURI MĂRUNTE ȘI PULVERULENTE CU CONȚINUT DE FIER REZULTATE DIN INDUSTRIA SIDERURGICĂ

2.1. Stadiul actual al tehnologiilor de obținere a oțelului

Oțelul este un material omniprezent în viața noastră, acesta fiind un material durabil și reciclabil 100%. Producția de oțel la nivel mondial este prezentată în figura 2.1.

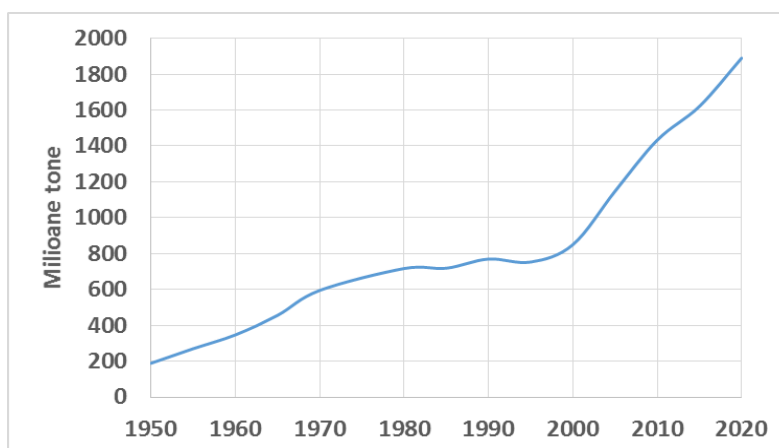


Figura 2.1. Producția de oțel [1]

Piața oțelului este dominată de China [1,2,3], aceasta produce peste jumătate din producția de oțel (figura 2.2). Producția de oțel brut din China, cel mai mare producător, dar și cel mai mare consumator mondial de profil, a crescut cu 8,4% în august 2020, în ritm anual, la 94,8 milioane de tone. În aceeași lună însă, producția de oțel a scăzut cu 24,4% în SUA, la 5,6 milioane de tone, cu 20,6% în Japonia, la 6,4 milioane de tone, și cu 16,6% în Uniunea Europeană, la 9,31 milioane de tone [4]. România în anul 2019 ocupă locul 38 în topul țărilor producătoare de oțel cu o producție de 3,4 milioane de tone.

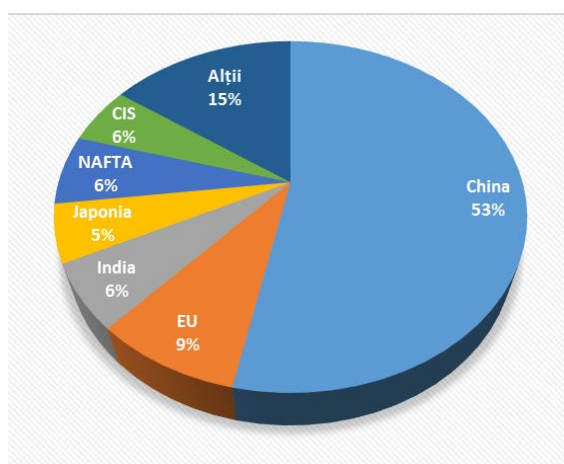


Figura 2.2. Distribuția geografică a producției de oțel în 2019 [1]

Piața mondială de oțel este influențată de o serie de factori. Sectorul industrial se va dezvolta în continuare iar cererea de oțel va crește în următorii ani. În figura 2.3 se prezintă sectoarele industriale consumatoare de oțel și aliaje metalice [1,3].

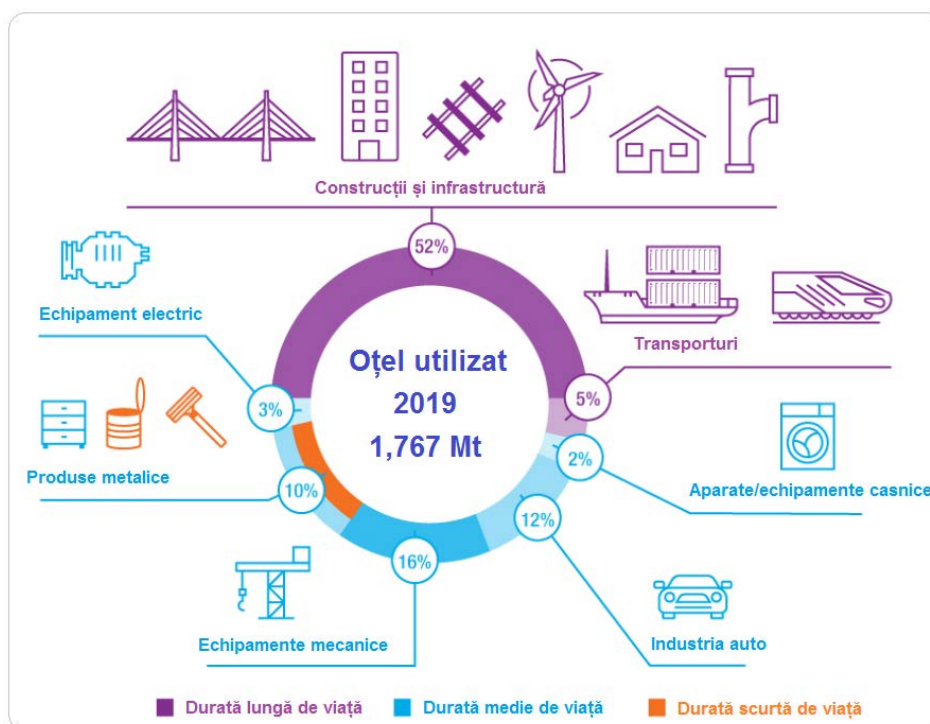


Figura 2.3. Utilizarea oțelului pe sectoare industriale [1]

Fluxurile tehnologice de producere a oțelului, prezentate în figura 2.4, sunt [5]:

- fluxul integrat de fabricare a oțelului, agregatul de elaborare fiind convertizorul cu oxigen, care utilizează ca și materii prime minereul de fier, cărbune, calcar și oțel reciclat/subproduse feroase. În medie, acest flux utilizează 1400kg de minereu de fier, 800kg de cărbune, 300kg de calcar și 120kg de oțel reciclat pentru a produce 1000kg de oțel brut;
- fluxul tehnologic miniuzină, agregatul de elaborare fiind cuptorul cu arc electric, acesta utilizează în principal oțeluri reciclate/subproduse feroase și burete de fier (DRI). În medie, acest flux utilizează 880kg oțel reciclat combinat cu cantități diferite burete de fier, 16kg de cărbune și 64kg de calcar, pentru a produce 1000kg de oțel brut.

Aproximativ 70% din producția mondială de oțel brut este produsă de oțelăriile integrate restul de mini-uzine (figura 2.5) [1,6]. De asemenea, în prezent se pune un accent deosebit pe dezvoltarea și implementarea în practica industrială a procedeelelor noi. Se urmărește o scădere a consumurilor de energie, materii prime și materiale.

Cuptorul electric cu arc de tip EBT este prezentat în figura 2.6. Materia primă utilizată este deșeurile feroase (fier vechi, fontă veche, subproduse feroase sub formă de pelete, brichete) și buretele de fier, iar principalele materiale auxiliare sunt: minereuri de fier, var, dolomita, feroaliaje, cocs, fluorina [7-9]. Elaborarea oțelurilor în oțelăriile electrice presupune utilizarea unei încărcături de calitate. Aceasta nu trebuie să conțină elemente ca: zinc, cupru, plumb, staniu, nichel, molibden, cobalt, arsen iar pentru creșterea calității oțelului se utilizează în încărcătură burete de fier și pelete metalizate.

Cuptorul cu arc electric de curent continuu este prezentat în figura 2.7 [10-12].

Tehnologiile moderne de producere a oțelului au integrat preîncălzirea fierului vechi. Figura 2.8 prezintă câteva procedeele care utilizează preîncălzirea deșeurilor feroase (MSP – scrap preheating chamber on shell, SSP - scrap preheating chamber beside shell, Consteel). [13,14]. Aceste tehnologii, prin utilizarea preîncălzirii deșeurilor feroase obțin economii de minim 70-100kWh/t.

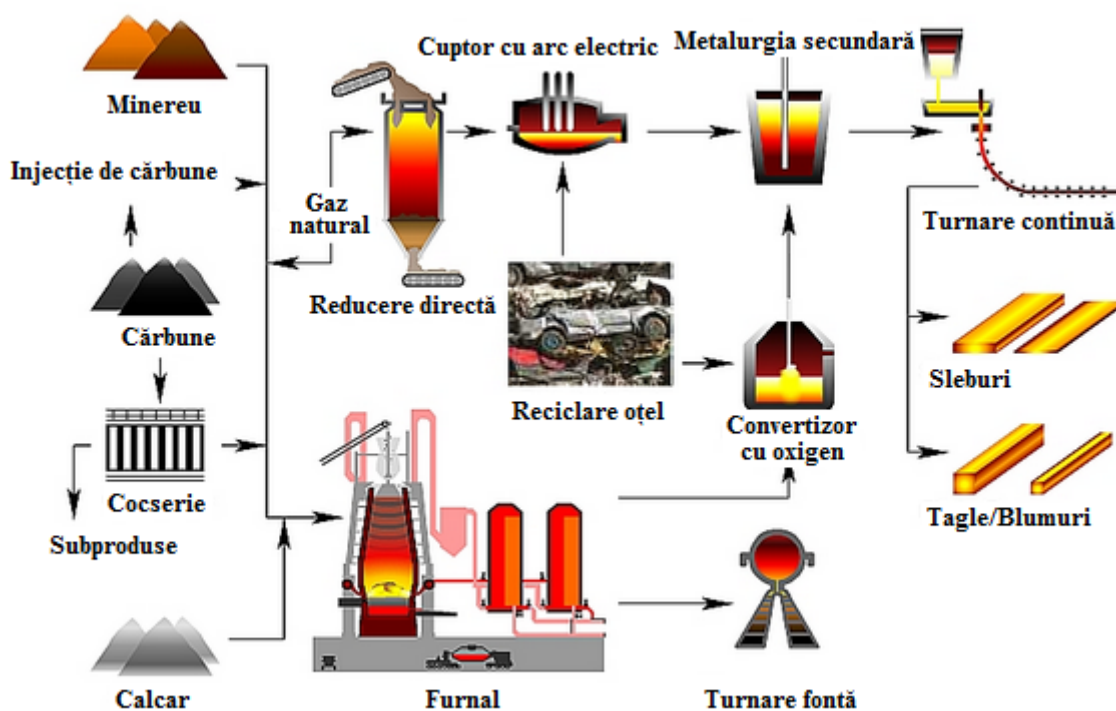


Figura 2.4. Fluxurile tehnologice de producere a oțelului [5]

Procesele moderne de elaborare a oțelului maximizează utilizarea energiei și recuperarea energiei din gazele de arse (Cuptor cu cuvă Fuchs, Consteel, EOF, IHI Shaft) [14,15]. Producerea oțelului prin aceste tehnologii conduce la: flexibilitatea procesului tehnologic, creșterea productivității și îmbunătățirea eficienței energetice, îmbunătățirea calității produsului finit și satisfacerea cerințelor de mediu la un cost minim [13-16]. Concepte noi de tehnologii de elaborare care au fost implementate, la scară industrială: Comelt, Conarc, Contiarc, Hytemp, Finger respectiv Shaft Furnace.

Elaborarea oțelului prin procedeul Contiarc utilizează un cuptor cu funcționare continuă cu un electrod central [11,12,16]. În figura 2.9 se prezintă schematic procedeul de elaborare a oțelului. Deșeurile se preîncălzesc prin ascensiunea gazelor fierbinți din cuptor. Avantaje: reducerea pierderilor de energie, reducerea considerabilă a volumului de gaze reziduale și a volumului de praf, consum mai mic de energie electrică, reducerea consumurilor de electrozi.

Elaborarea oțelului prin procedeul Conarc utilizează în încărcătura metalică aliaje lichide astfel se recuperează energie și are loc o maximizare a productivității. În figura 2.10 se prezintă procesul de elaborare a oțelului într-un astfel de agregat [15,16]. Astfel, procesul decurge în două cuve, în prima cuvă are loc topirea iar în a doua cuvă are loc decarburarea băii metalice. Ca și încărcătură metalică procedeul utilizează: fontă lichidă, deșeuri feroase și burete de fier. Avantajele [15,16]: reducerea consumului de energie respectiv flexibilitate în ce privește materia primă disponibilă și a energiei utilizate.

Pe plan mondial ponderea oțelului elaborat în cuptorul electric cu arc este de circa 30%. Se constată o creștere a cantităților de oțel elaborate în cuproarele cu arc electric. Există și în acest caz probleme cu privire la calitatea încărcăturii metalice utilizate în aceste agregate.

Procedee alternative [17]:

- reducerea directă (DR) - MIDREX, HyL, FIOR, FASTMET, IRON CARBID, CIRCORED, INMETCO și FINMET; se obține burete de fier (DRI) din minereu de fier și este folosit în încărcătura agregatelor de elaborare;
- reducere prin topire (SR) – COREX, HISMELT, DIOS, AISI-DOE/CCF și ROMELT este un proces de combinare a minereului de fier cu topirea într-un reactor fără a mai utiliza cocsul iar fontă brută în stare lichidă rezultată se folosește ca și materie primă la elaborarea oțelului.

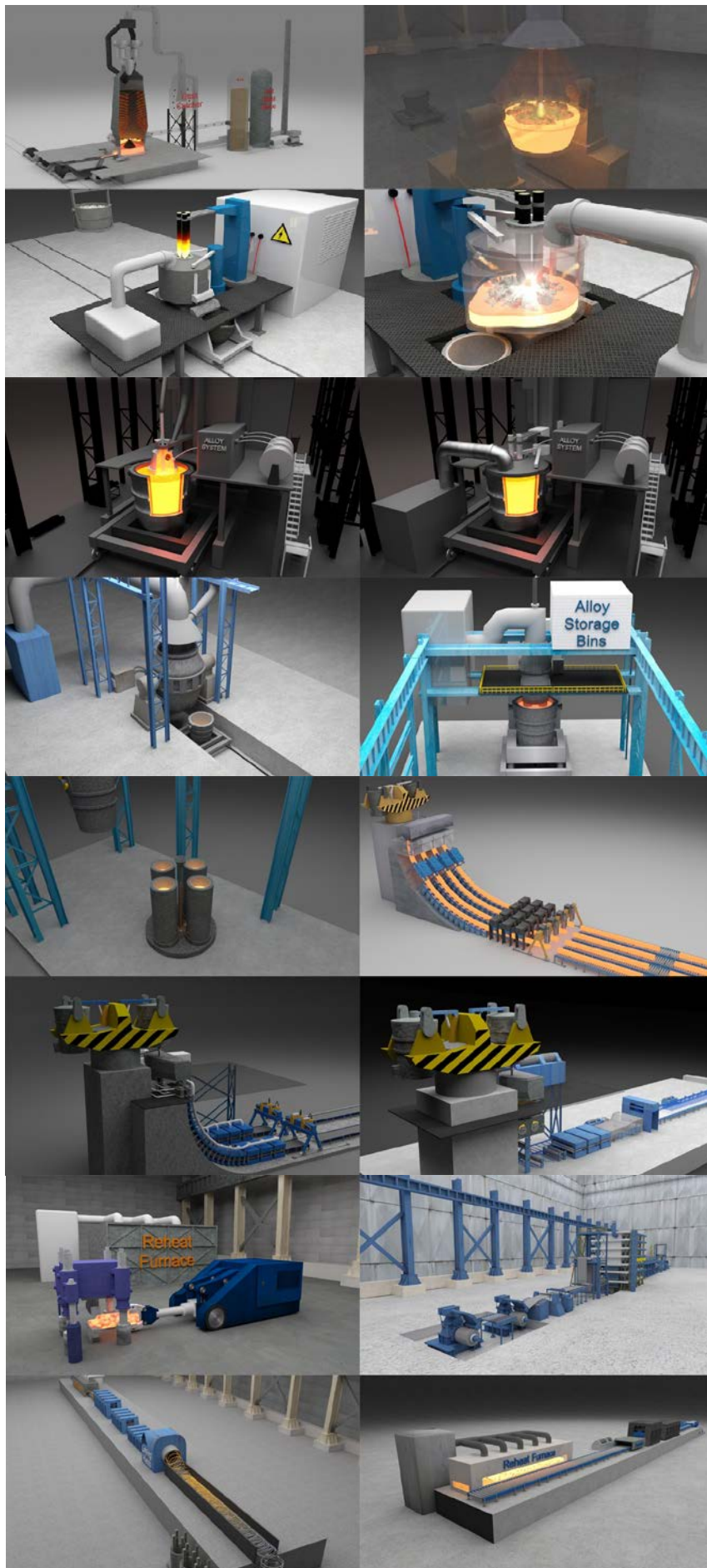


Figura 2.5. Agregate/utilaje pentru fabricarea și turnarea semifabricatelor din oțel [6]

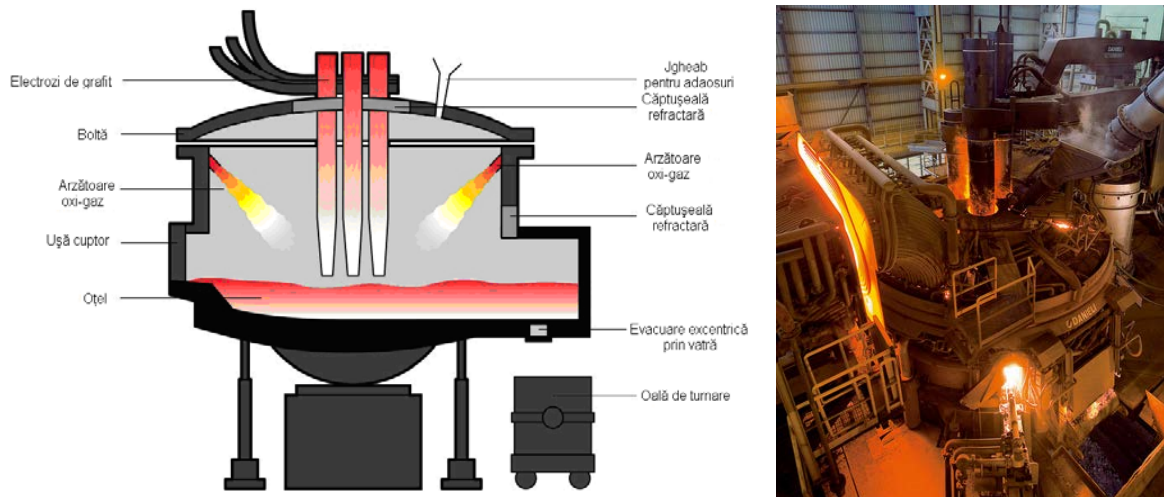


Figura 2.6. Cuptorul electric cu arc tip EBT [9]

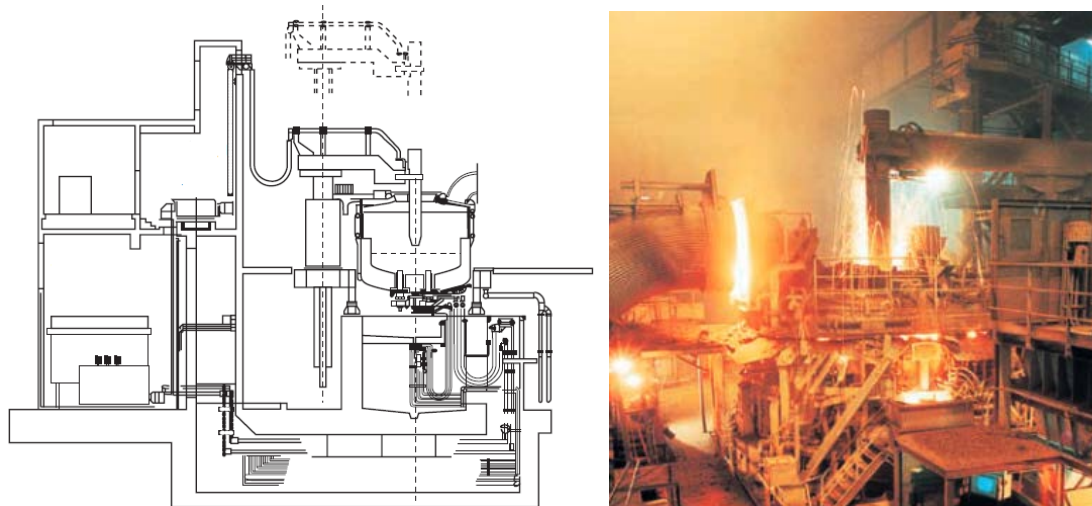


Figura 2.7. Cuptorul electric cu arc în curent continuu (120t DC EAF Stahlwerk Thüringen, Germany) [10]

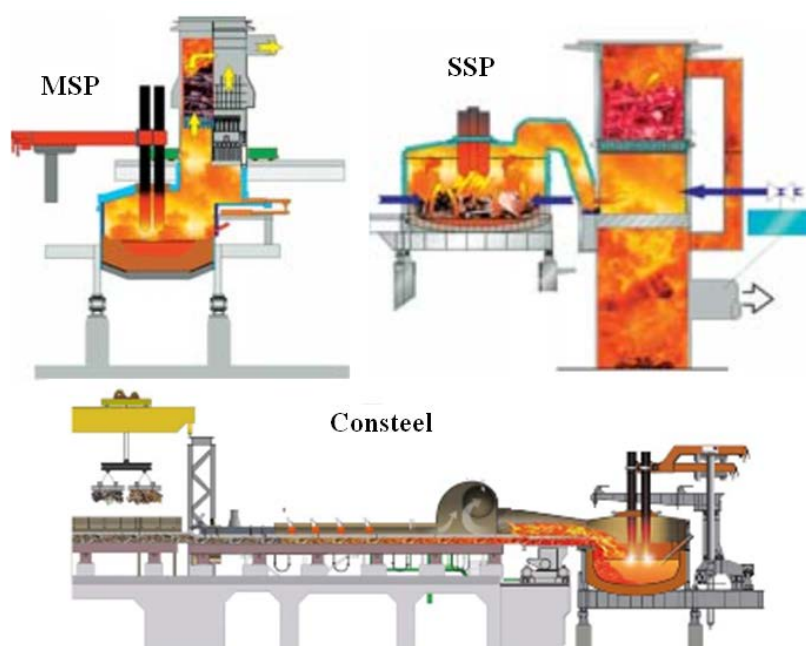


Figura 2.8. Elaborarea oțelului cu posibilitatea preîncălzirii încărcăturii metalice [13,14]

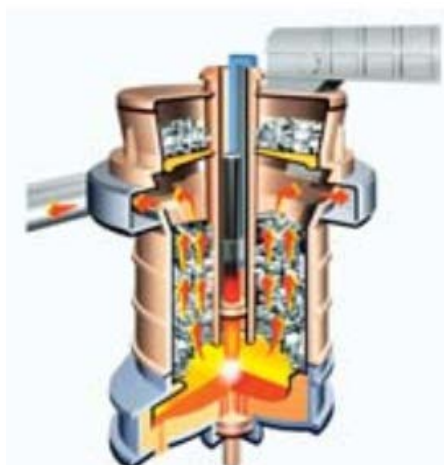


Figura 2.9. Elaborarea oțelului prin procedeul Contiarc [16]

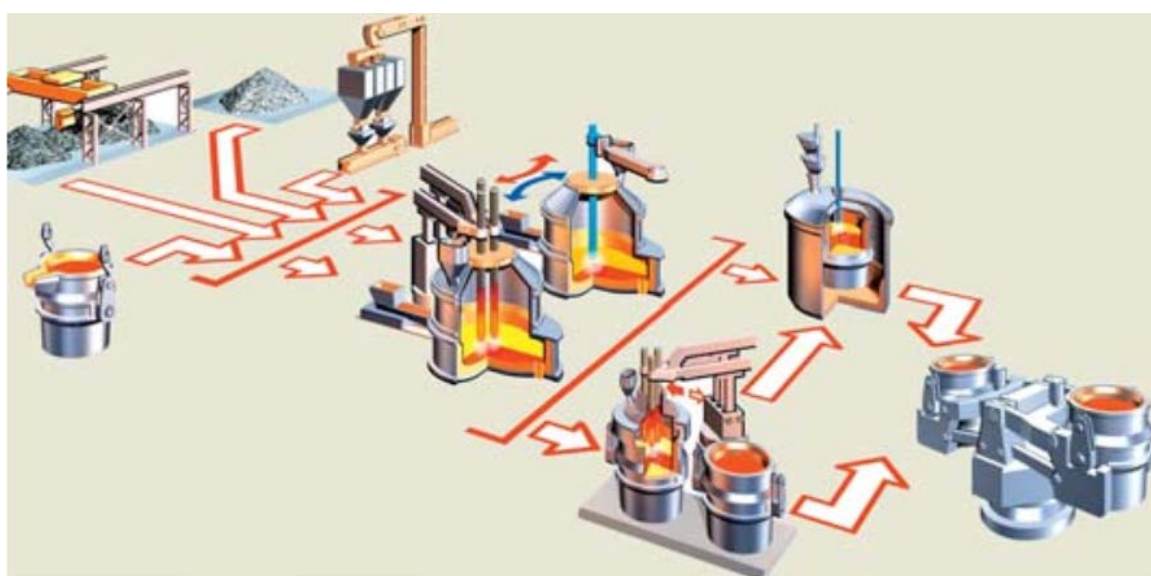


Figura 2.10. Elaborarea oțelului prin procedeul CONARC [16]

Utilizarea pe scară largă a oțelurilor aliate și cu caracteristici superioare a condus la dezvoltarea unor tehnologii de tratament secundar în afara agregatului de elaborare [10,14,17,18]. În figura 2.11 se prezintă tehnologiile de tratament secundar al oțelului.



Figura 2.11. Tratamentul secundar al oțelului [18]

În figura 2.12 se prezintă procedeele speciale de elaborare a oțelurilor [5, 20-23]:

- VIM – topire în vid în cuptorul cu inducție;
- ESR – retopire sub strat de zgură;
- VAR – retopire cu arc în vid.

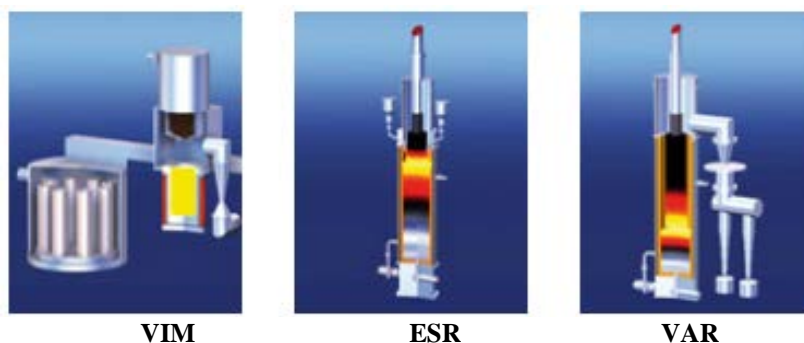


Figura 2.12. Procedee speciale de elaborare a oțelurilor [18]

Fierul vechi este un material deficitar atât din punct de vedere economic, cât și tehnologic. Din astfel de motive se intensifică preocupările pentru fabricarea unor materiale noi cu rolul de înlocuitori ai fierului vechi.

2.2. Surse și tipuri de deșeuri feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică

În prezent, există patru modalități alternative de a produce oțel prezentate în figura 2.13. Primele trei se bazează pe minereul de fier ca și materie primă iar a patra utilizează în încărcătură deșeuri feroase.

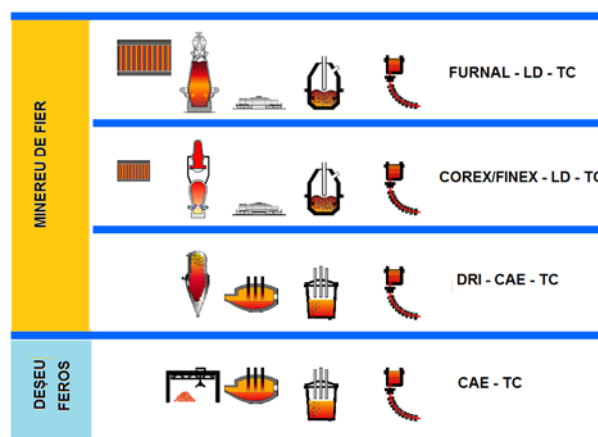


Figura 2.13. Alternative de obținere a oțelului [22]

În siderurgie, pe lângă produsul principal de fabricație, rezultă produse secundare și deșeuri, deșeurile mărunte și pulverulente, mărunte și de dimensiuni mari cu conținut de carbon, fier, elemente de aliere și uneori componenți utili pentru formarea și corecția compoziției chimice a zgurii, praf de carbon.

Deșeurile semnalate sunt:

- praf de carbon;
- praf și șlam aglomerare;
- praf și șlam furnale;
- praf de oțelărie (Siemens Martin);
- praf de electrofiltru de la oțelăria electrică;
- praf și șlam de convertizor;
- țunder și șlam de țunder;
- pilitură de fier de la polizarea laminatelor;
- șlam de la tratamente termice, termochimice și acoperiri anticorozive;
- fracția feroasă din zgurile de oțelărie.

Din procesele tehnologice din alte ramuri industriale, rezultă de asemenea deșeuri pulverulente și mărunte cu conținut de fier, de carbon, oxid de calciu, de aluminiu, magneziu, și anume [23]: nămolurile roșii; cenușile de pirită; concentrat de fier din cenuși de termocentrală; concentrat de fier din deșeu sideritic.

În funcție de condițiile specifice fiecărei unități siderurgice, precum și în funcție de cererea pe piața locală (variabilă în timp) a fiecărui material utilizabil, orice deșeu poate deveni subprodus și orice subprodus poate deveni deșeu [23].

Din totalitatea deșeurilor generate în procesele siderurgice, prezentate schematic în figura 2.14, deșeurile pulverulente și mărunte cu conținut de fier, carbon și alte componente utile, potențiale subproduse, ridică problem la valorificare. Pentru aprecierea procesului tehnologic prezintă importanță deosebită cunoașterea cantităților specifice de deșeuri (figura 2.14-2.15.) [23,24]

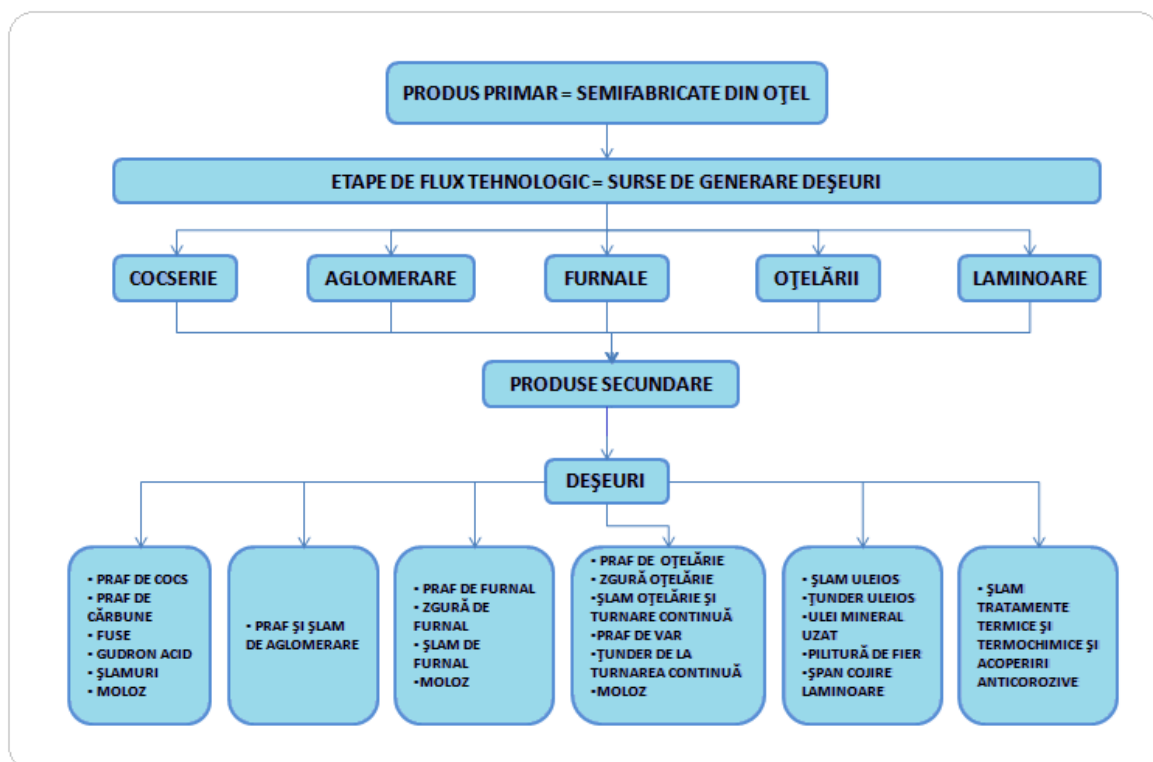


Figura 2.14. Tipuri de deșeuri și sursele de generare a acestora în siderurgie [24]

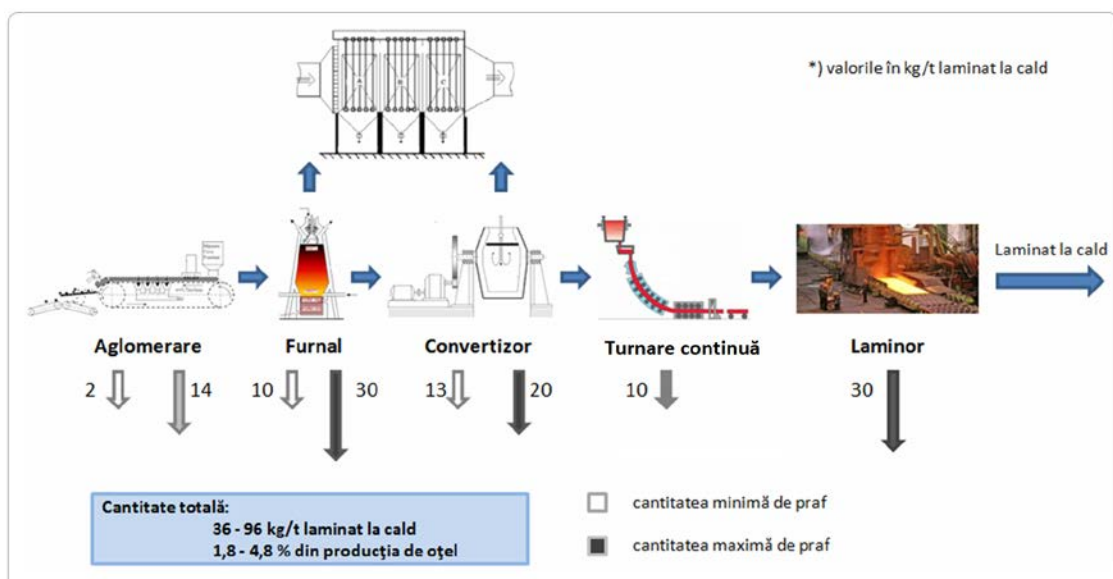


Figura 2.15. Cantități specifice de deșeuri pulverulente generate în cadrul unui combinat siderurgic [24]

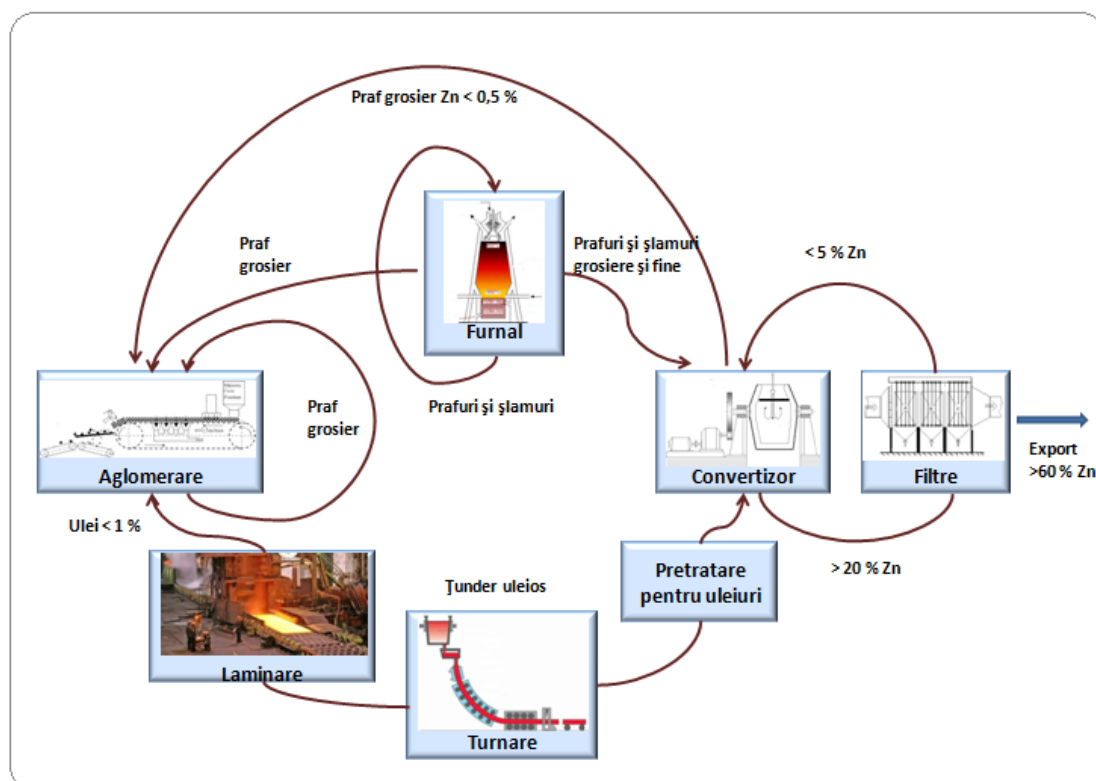


Figura 2.16. Conceptul de reciclare integrată a deșeurilor feroase pulverulente în siderurgie [24]

În prezent, pe plan mondial, se pune în mod deosebit problema valorificării prin reciclare a deșeurilor pulverulente și mărunte generate în siderurgie, propunându-se conceptul de reciclare integrată a acestora. Exemplificarea acestui concept este prezentată în figura 2.16, din care se poate observa că întreaga cantitate de prafuri, șlamuri și tunder, zgură de oțelărie - fracția feroasă, generate în cadrul unei societăți siderurgice integrate se poate recicla în diferite etape de flux tehnologic [23, 24].

Principalele deșeuri solide rezultate la elaborarea oțelului sunt zgura (90%), praful de electrofiltru și șlamurile (nămolurile). În figura 2.17 se prezintă deșeurile rezultate la elaborarea oțelului prin procedeele utilizate pe plan mondial [21]: aproximativ 200kg deșeu/t oțel la fluxul tehnologic care utilizează ca și agregat de elaborare cuptorul cu arc electric respectiv 400kg deșeu/t oțel la fluxul tehnologic care utilizează ca și agregat de elaborare convertizorul cu oxigen. În figura 2.18 se prezintă domeniile de utilizare a zgurii metalurgice pe plan mondial.

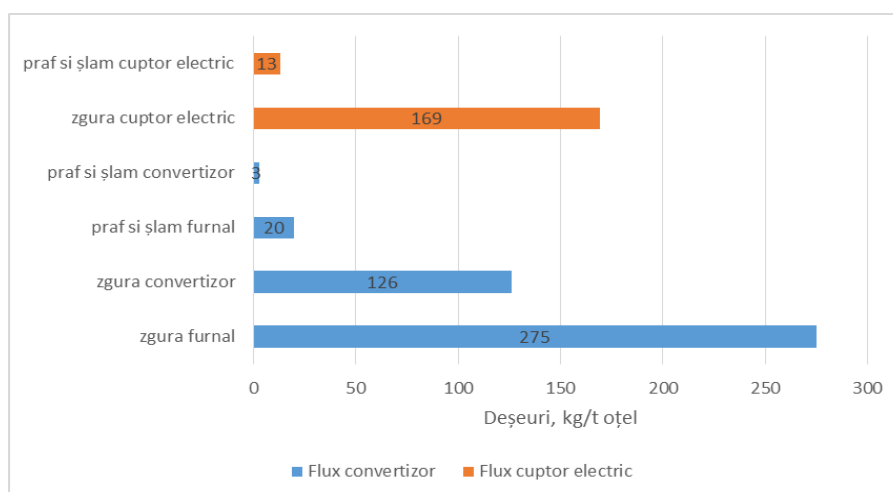


Figura 2.17. Deșeuri rezultate la elaborarea oțelului [21]

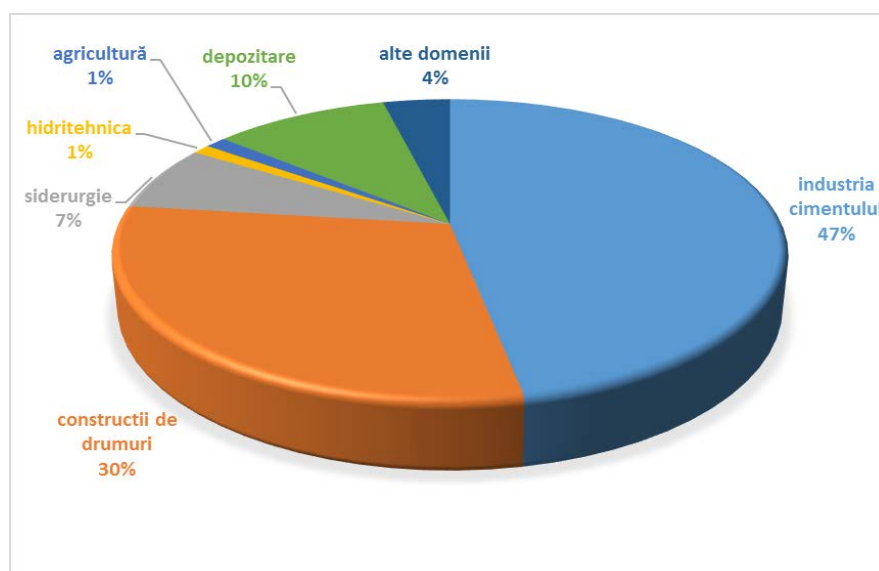


Figura 2.18. Domenii de utilizare a zgurii metalurgice [21]

Permanent se încearcă identificarea și implementarea metodelor celor mai eficiente pentru reținerea tuturor surselor posibile cu conținut de fier în interiorul ciclului producție-utilizare-reciclare în scopul protejării resurselor naturale, a reducerii costurilor și impactului deșeurilor eliminate asupra mediului [5,20].

Este necesar să fie promovate tehnologii care să asigure [21-23]:

- gestionarea riguroasă a deșeurilor;
- depozitarea controlată a tuturor categoriilor de deșeuri;
- reducerea la sursă a cantității și nocivității deșeurilor produse.

2.3. Tipuri de deșeuri feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică

2.3.1. Praful și șlamul de la aglomerare - furnale

Furnalele moderne utilizează încărcătura avansat pregătită pentru îmbunătățirea permeabilității coloanei de materiale și a reductibilității, încărcătura fiind formată din aglomerat și pelete metalizate. La procesul de aglomerare rezultă gaze arse care conțin o mare varietate de poluanți [25]. Anexa 1 prezintă fluxurile masice de intrare și ieșire a procesării oțelului. Figura 2.19 prezintă analizele cantitative ale mării granulelor de praf din procesul de aglomerare și prezintă două maxime, și anume: unul pentru praful cu granulație mai mare (cu o mărime a granulei de aproximativ $100\mu\text{m}$) și unul pentru praful fin ($0,1-1\mu\text{m}$). Praful cu granulație grosieră rezultă de la începutul procesului de aglomerare iar praful fin se formează în zona de sinterizare după terminarea procesului de evaporare a apei din amestec.

Pregătirea minereului pentru încărcătura furnalului cu toate operațiile aferente: manipulare în depozite, concasare, sortare, omogenizare, aglomerare, transport pe bandă, constituie o sursă importantă de praf feros. În acest lanț de operații în care minereul de fier este manipulat la zi, în majoritatea cazurilor, eliminarea degajărilor de praf (ponderea minereurilor mărunte și a concentratelor fine devine din ce în ce mai importantă în structura producției de minereu pentru alimentarea furnalelor) nu se poate rezolva decât printr-o folosire cât mai atentă și corectă a utilajelor de manipulare și prin luarea unor măsuri locale. Instalațiile de captare a prafului se pot folosi doar la punctele de transbordare de pe circuitul benzilor transportoare, la instalațiile de concasare-sortare și în fabricile de aglomerare (sau peletizare și brichetare) [23,25]. Instalațiile de pregătire a încărcăturii feroase a furnalului sunt surse deosebit de importante de degajări de praf cu un conținut de fier de circa 30-40%. Astfel în 24h, la o instalație de aglomerare cu o capacitate de aglomerare anuală de un milion de tone, se elimină din proces între 12-18 milioane Nm^3 de gaze cu un conținut de praf de 3-6g/ Nm^3 . Generarea de praf în procesul tehnologic de aglomerare se face în primul rând în zona benzii de aglomerare

(zona de absorbție a aerului de combustie) și apoi în zona de ciuruire a aglomeratului cald sau rece și punctele de transbordare din circuitul transportoarelor cu bandă [23,24]. Prin utilizarea de instalații de desprăfuire adecvate conținutul de praf al gazelor evacuate poate fi redus până la valori de $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ în condiții normale de funcționare. În cazul utilizării unui filtru cu saci, emisiile de praf ating valori de $10\text{-}20\text{mg}/\text{Nm}^3$, adică se poate recupera peste 99% din cantitatea de praf inițială [23].

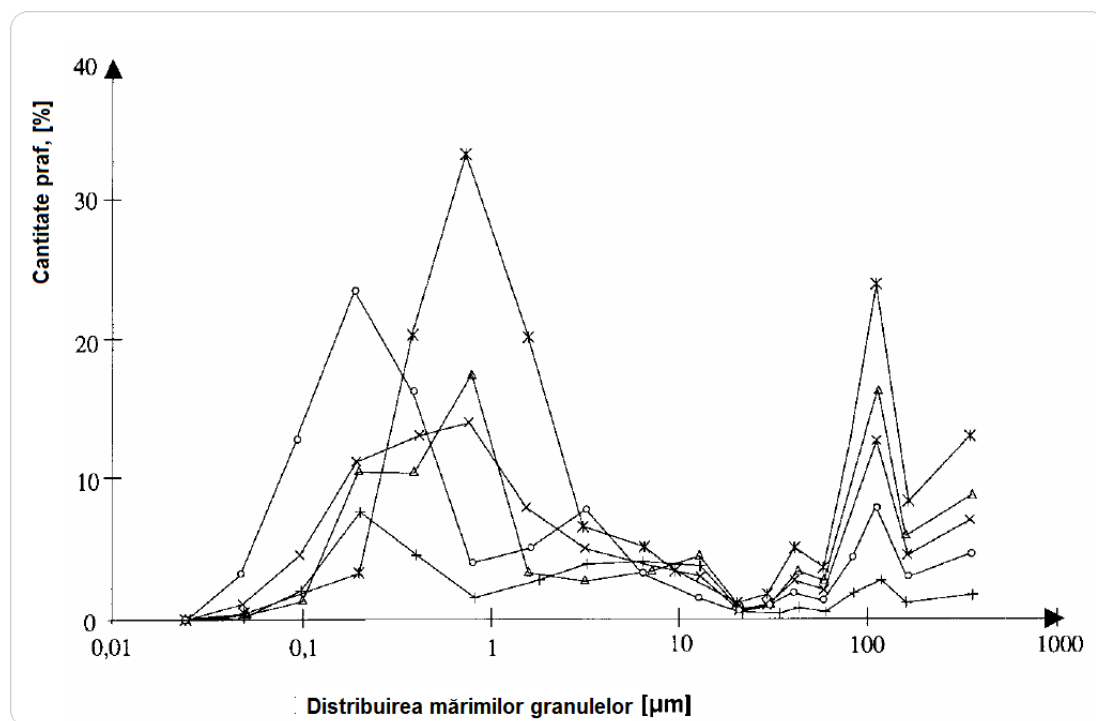


Figura 2.19. Mărimea granulelor și distribuția greutății prafului rezultat în procesul de aglomerare [25]

Folosindu-se un sistem de epurare în mai multe trepte, conținutul de praf de furnal din gazele evacuate se reduce la $0,01\text{g}/\text{Nm}^3$ față de $25\text{-}100\text{g}/\text{Nm}^3$ la evacuare, praful de furnal astfel recuperat, fiind evaluat la cca. $30\text{kg}/\text{t}$ de fontă (are un conținut de 40% Fe și 18-20% C). Având în vedere utilizarea gazului de furnal drept combustibil gazos pentru preîncălzirea cowperelor, se impune obligatoriu epurarea acestuia (deși este un combustibil cu putere calorică scăzută cca. $4\text{MJ}/\text{Nm}^3$, prin faptul că rezultă în cantitate apreciabilă $1900\text{-}3100\text{Nm}^3/\text{t}$ fontă este rentabilă utilizarea lui în scopul precizat mai anterior) [25]. Epurarea gazelor se realizează prin intermediul sacului de praf, epurarea brută și sisteme tuburi venturi și uneori cu electrofiltre [23,25]. Având în vedere cantitățile de praf, se impune ca obligatorie epurarea gazelor și reciclarea acestora în procesul tehnologic, iar în cazul în care nu se poate recicla întreaga cantitate, depozitarea se va face în iazuri acoperite în permanență de apă. Nu este de dorit această variantă deoarece se produce o anumită poluare la nivel de apă de suprafață și subterană, iar în cazul secării iazului, poluarea aerului.

În zona Hunedoara există două depozite de șlam de la aglomerare – furnale prezentate în figurile 2.20 și 2.21, rezultate de la combinele siderurgice de la Hunedoara și Călan.

În tabelul 2.1 este prezentată compoziția chimică a șlamului de la aglomerare furnale după uscare - ArcelorMittal Hunedoara (Bataga) iar în tabelele 2.2 -2.5 se prezintă compoziția chimică a prafului de furnal (încărcătură aglomerat bazic) de la ArcelorMittal Hunedoara, Reșița, Călan și Galați.

Tabelul 2.1. Compoziția chimică a șlamului de la aglomerare – furnale (Bataga) [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	C	PC
30,37	8,57	36,02	9,1	9,76	9,85	2,54	0,88	1,53	0,15	21,1	1,18



Figura 2.20. Depozitul de șlam aglomerare-furnale ArcelorMittal Hunedoara [26]



Figura 2.21. Depozitul de șlam aglomerare - furnale platforma industrială Sidermet Călan [26]

Tabelul 2.2. Compoziția chimică a prafului de furnal ArcelorMittal Hunedoara [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	FeO	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	S	P	Altele
38,76	40,35	13,47	14,39	9,04	4,66	7,52	0,78	0,64	0,27	0,16	1,20

Tabelul 2.3. Compoziția chimică a prafului de furnal Reșița [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	FeO	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	Altele
38,83	40,81	13,97	15,48	7,27	4,51	7,82	1,14	0,70	0,29	0,15	1,14

Tabelul 2.4. Compoziția chimică a prafului de furnal Călan [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	FeO	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	Altele
39,89	41,66	13,21	12,93	6,89	3,87	7,08	1,32	0,56	0,29	0,11	0,18

Tabelul 2.5. Compoziția chimică a prafului de furnal Galați [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	FeO	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	Altele
32,05	33,03	14,02	37,54	5,88	2,15	5,80	1,98	0,33	0,13	0,06	0,15

2.3.2. Praful de oțelărie

La oțelăriile Siemens-Martin oxigenul s-a utilizat pentru intensificarea procesului de ardere a combustibililor (aer îmbogățit în oxigen până la 30%, suflat prin arzător) și pentru intensificarea procesului de oxidare (oxigen suflat prin lance). În cazul utilizării combinate a oxigenului, pentru o îmbogățire a aerului cu până la 30% oxigen, înainte de intrarea în camerele regeneratoare gazele arse au un conținut de 30g praf/Nm³. Cantitatea de praf în gaze era cu atât mai mare cu cât conținutul de carbon al băii este mai mare. Dintre cele patru oțelării Siemens – Martin (OSM) care au funcționat în România (OSM I și OSM II la Hunedoara, una la Reșița și una la Oțelul Roșu, primele trei pe varianta fontă lichidă – fier vechi și ultima pe fier vechi – fontă solidă) numai la OSM II Hunedoara s-a utilizat oxigen pentru intensificarea arderii și suflat prin lance pentru intensificarea oxidării [23,27-29]. Desprăfuirea gazelor la OSM II Hunedoara s-a efectuat cu ajutorul electrofiltrelor, iar o parte din praful rezultat există și azi depozitat în spații închise (hale dezafectate de la laminoare). În tabelul 2.6 este prezentată compoziția chimică a prafului de la electrofiltru. Până la închiderea fluxului principal cea mai mare parte a prafului de oțelărie s-a reciclat prin aglomerare, restul a fiind depozitat și există și în prezent.

Tabelul 2.6. Compoziția chimică a prafului de la electrofiltru (O.S.M. II Hunedoara) [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	Zn	Altele
61,89	3,49	84,56	2,24	0,57	2,12	0,83	4,23	0,97	0,36	0,55	0,18

Epurarea gazelor rezultate în cursul procesului de elaborare a oțelului ridică probleme deosebite datorită temperaturii ridicate ale acestor gaze (variabilă în funcție de procedeu și tehnologia de elaborare, de exemplu la convertizoarele cu oxigen până la 2400 – 2600°C), a necesității răcirii acestora înaintea desprăfuirii, a fineței particulelor de praf și naturii intermitente a procesului [23, 25]. Prin operația de epurare, în gazele evacuate conținutul de praf se reduce la mai puțin de 15mg/Nm³, praful obținut având în proporție de 80% o granulație de 0,05-0,8μm și conținând în jur de 60% Fe [23,24].

Sursa principală de praf de electrofiltru pe fluxul de elaborare a oțelului într-un combinat siderurgic este de la desprăfuirea gazelor emise de aceste cuptoare. Din punct de vedere a compoziției chimice a acestui material, caracteristic este conținutul ridicat de Zn [24]. Finețea mare a acestor praful și efectuarea mai mult operații de manipulare creează puncte de poluare a aerului cu efect sesizabil în timp asupra zonei limitrofe. În figura 2.22 se prezintă schematic structura ecranelor sistemului de desprăfuire la un cuptor cu arc electric tip EBT de 100 tone capacitate.

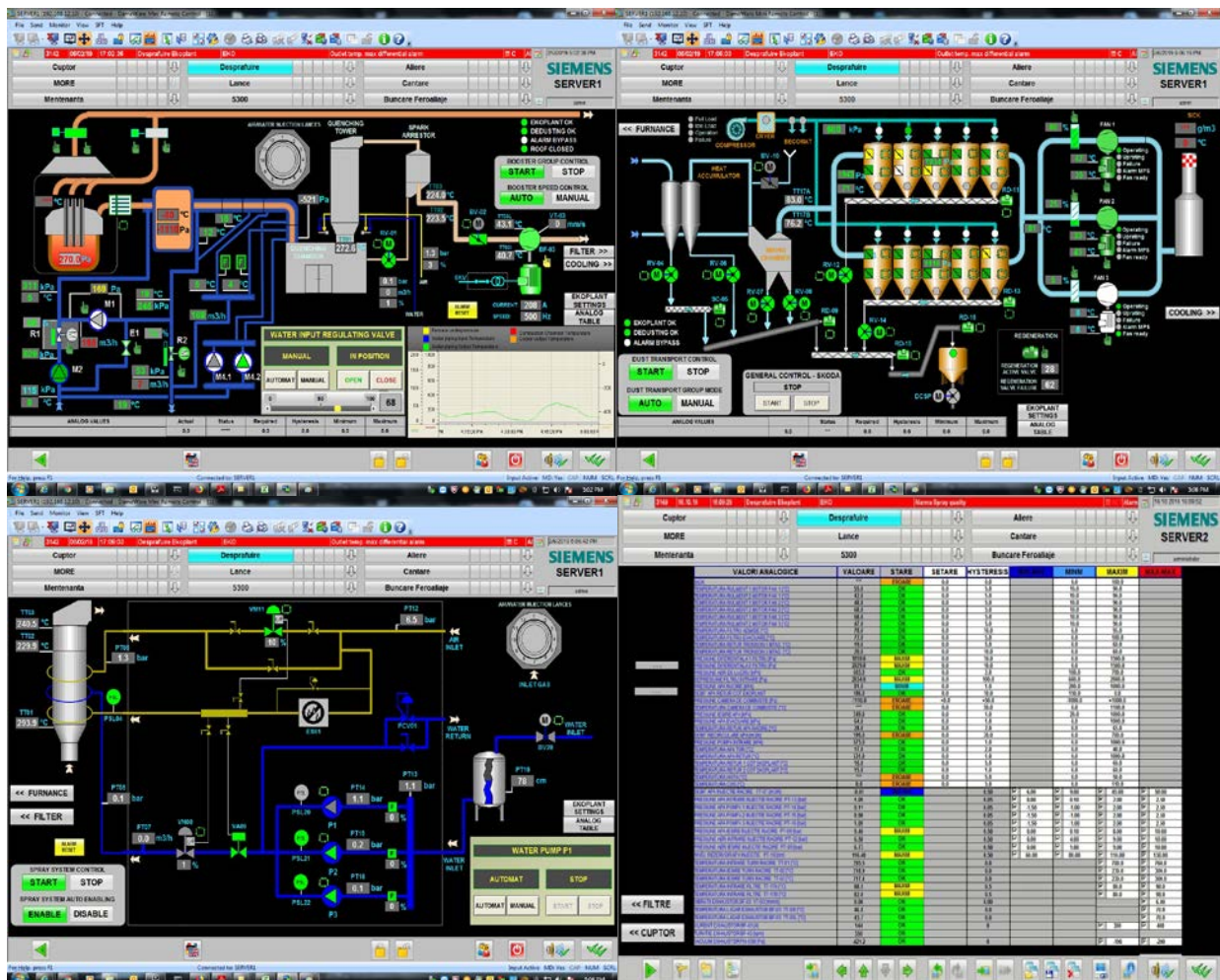


Figura 2.22. Structura ecranelor sistemului de desprăfuire la un cuptor cu arc electric tip EBT [30]

Cunoașterea compoziției chimice a acestor deșuri este foarte importantă, de aceea un studiu asupra lor ne indică impactul depozitării acestora asupra mediului. În tabelele 2.7- 2.9 sunt prezentate caracteristicile chimice ale prafului de oțelărie de la Oțelăriile electrice ArcelorMittal Hunedoara, T.M.K. Reșița și MECHEL Oțelul Roșu.

Tabelul 2.7. Compoziția chimică a prafului de oțelărie ArcelorMittal Hunedoara [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	ZnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	Altele
29,08	41,48	21,21	5,28	0,68	4,61	3,38	3,11	3,00	3,36	3,23	10,70

Tabelul 2.8. Compoziția chimică a prafului de oțelărie TMK Reșița [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	ZnO	Altele
44,56	4,11	59,09	3,62	1,12	8,64	2,82	4,12	0,64	0,32	13,92	1,6

Tabelul 2.9. Compoziția chimică a prafului de oțelărie MECHEL Oțelul Roșu [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	ZnO	Altele
45,86	4,37	60,68	3,24	0,65	5,36	2,98	4,2	0,82	0,56	16,28	0,86

2.3.3. Praful și șlamul de convertizor

Acest deșeu provine din fracția fină a gazelor de la oțelăriile cu convertizoare, aflate în exploatare la Galați și ridică probleme deosebite datorită temperaturii ridicate ale acestor gaze (o temperatură locală de 2400–2600°C), a necesității răcirii acestora înaintea desprăfuirii, a fineții particulelor de praf și naturii intermitente a procesului [23]. Cantitățile generate anual sunt de aproximativ 50–70mii tone, iar conținutul de fier mediu, de SiO₂ și CaO, asigură valori metalurgice medii, ceea ce îl face reciclabil în siderurgie [10, 12].

Acest șlam a fost depozitat în iazuri (figura 2.23) (au fost deversate controlat) deoarece recuperarea lui este foarte anevoioasă din cauza fineții foarte mari și a faptului că trebuia uscat.



Figura 2.23. Iazul decantor a șlamului de furnal și convertizor rezultat pe platforma industrială a combinatului de la Galați [26].

Compoziția chimică a prafului și șlamului de convertizor Galați se prezintă în tabelele 2.10 și 2.11.

Tabelul 2.10. Compoziția chimică a prafului de convertizor (Galați) [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	Zn	Altele
58,56	4,47	83,57	2,23	0,87	2,34	1,32	4,11	0,97	0,16	0,21	0,11

Tabelul 2.11. Compoziția chimică șlamului de convertizor (Galați) [23]

Compoziția chimică, [%]											
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	Zn	Altele
63,39	5,89	84,11	0,94	0,10	2,45	1,05	3,21	0,06	0,07	1,37	0,75

2.3.4. Țunderul și șlamul de Țunder

Țunderul rezultă pe fluxul de elaborare a oțelului de la turnarea continuă și de la laminoare. Cantitatea de Țunder, având dimensiuni de 0,1-50mm și forme variate, exprimată în % din cantitatea de oțelului supus laminării este: 0,8-1,2% la laminoarele de profile mici și sârmă, 1,1-1,8% la laminoarele de profile mijlocii și 1,5-2,5% la laminoarele de profile grele. Importanța acestui deșeu este dată de: conținutul mare de fier (60-72%), cantitate mică de steril respectiv lipsa elementelor volatile sau a celor dăunătoare oțelului (Pb, Cu, Sn).

Țunderul este format din amestecuri de oxizi de fier (FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3) și de părți sterile (nisip, cărbuni, etc.) (Anexa 1) [23].

Ca urmare a extinderii turnării continue în industria siderurgică, a crescut și cantitatea de deșeuri rezultată, care include și șlamul de Țunder, un deșeu care poate fi reintrodus în circuitul industrial. O problemă, în ce privește depozitarea, o constituie Țunderul rezultat pe fluxurile curente, respectiv cel deja depozitat. În funcție de societatea siderurgică sau miniuzină, din procesul tehnologic de laminare rezultă în mod curent Țunder (cod deșeu 10.02.10) [8, 25].

O componență orientativă a Țunderului rezultat în procesul de laminare este prezentată în tabelul 2.12 [23]. Compoziția Țunderului variază în funcție de oțelul din care provine, și îl impun ca un material foarte important în balanța de Fe a oricărei uzine siderurgice. Analiza chimică orientativă a Țunderului este prezentată în tabelul 2.13.

Tabelul 2.12. Componența Țunderului de laminare [23]

Componența Țunderului, [%]	
Țunder uscat	94,40 ($\approx 71\% \text{Fe}_{\text{tot}}$)
Apă	3,00
Ulei	2,60

Tabelul 2.13. Compoziția chimică a Țunderului, % [23]

Fe_{tot}	FeO	Fe_2O_3	MnO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Alți
59 – 73	63,0 - 70,0	18,0- 30,0	0,8 - 1,5	1,0 - 3,5	0,1 – 0,40	0,3 - 0,5	0,9 - 2,0	3,0- 4,0

În tabelul 2.14 sunt prezentate tipurile de deșeuri industriale generate, cantitatea, starea fizică și modul de eliminare. Activitățile desfășurate în cadrul Uzinei de Laminoare produc atât deșeuri industriale nemetalice cât și metalice. Colectarea acestor deșeuri se face în funcție de starea lor fizică: în containere, chible, bidoane sau rezervoare. [8,31].

Tabelul 2.14. Deșeuri industriale generate în cadrul ArcelorMittal Hunedoara [31]

Nr. Crt	Denumire	UM	Cantitate anuală	Starea fizică	Mod de eliminare
<i>Deșeuri industriale generate la OE2-TC</i>					
1.	Ulei uzat	kg	1020	lichid vâscos	reciclare internă
2.	Deșeu otel	tone	10223	solid	reciclare internă
3.	Fier vechi	tone	38	solid	reciclare internă
4.	Moloz	tone	1116	solid	eliminare pe haldă
5.	Țunder	tone	1352	solid	depozitare SF2
<i>Deșeuri industriale generate la secția Laminoare</i>					
6.	Deșeuri metalice	tone	32093	solid	reciclare internă
7.	Ulei uzat	tone	50	lichid vâscos	reciclare internă
8.	Țunder	tone	8150	solid	depozitare spațiu închis
9.	Deșeuri refractare	tone	1500	solid	depozitare pe haldă

Depozitul de Țunder amenajat în hala Laminorului de Semifabricate 2 ArcelorMittal Hunedoara este un depozit acoperit, cu platforma betonată, pe care se face depozitarea Țunderului și a șlamului de Țunder deshidratat. Suprafața depozitului este de 2400m^2 , iar volumul de depozitare este de 5820m^3 .

Din cauza friabilității ridicate este greu de definit o compoziție granulometrică pe fluxul de transport și manipulare S.C. ArcelorMittal Galați S.A. a utilizat ținderul în procesul de aglomerare și direct în furnal, în perioada 2000-2001 s-au consumat pentru aglomerare 82427t iar pentru furnale 36092t [23].

Ținderul a fost consumat în cantități mici sau deloc în celelalte uzine siderurgice care nu dispun de flux de aglomerare a minereurilor de fier. Astfel producătorii de țevi (Roman, Iași, Zalău,), de sârmă (ISCT Câmpia Turzii) îl haldează, ocupând suprafețe de teren foarte mari. Fostul Combinat Siderurgica Hunedoara, actualmente S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A. a consumat ținderul propriu produs până în 1999, iar după închiderea definitivă a sectorului primar cocserie-aglomerare-furnale-oțelărie Siemens-Martin II și a laminoarelor degrositoare 1100 și 1300, a început de asemenea să-l haldeze [23,31,32]. În tabelul 2.15 se prezintă compoziția chimică medie a ținderului de la ArcelorMittal Hunedoara iar tabelul 2.16 compoziția șlamului de ținder de la ArcelorMittal Hunedoara.

Tabelul 2.15. Compoziția chimică a ținderului ArcelorMittal Hunedoara [31]

Compoziția chimică, [%]								
Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Alți oxizi
68,60	66,57	26,27	0,83	1,73	0,14	0,41	0,92	3,01

Tabelul 2.16. Compoziția chimică a șlamului de ținder ArcelorMittal Hunedoara [31]

Compoziția chimică, [%]								
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Alți oxizi
62,64	89,57	1,70	3,15	2,12	0,65	1,14	0,40	1,27

2.3.5. Zgura de oțelărie

O cantitate mare de subproduse oxidice sunt produse anual de industria siderurgică la nivel mondial. De departe volumul de zgură este cel mai mare, fiind generat de diferite etape de producție a oțelului. Pentru a evita depozitarea deșeurilor producătorii de oțel încearcă să proceseze zgura în resurse utile [23]. Cantitatea de zgură de oțelărie din România, depozitată în halde, este prezentată în tabelul 2.17.

Tabelul 2.17. Halde de zgură din România [23]

Nr. Crt.	Halda de zgură	Haldare/Depozitare, anul	Inceput Valorificare, anul	Estimare cantitate zgură, mil. tone
1.	Reșița	1771	2006	70
2.	Hunedoara	1884	1983	100
3.	Galați	1968	2003	50
4.	Câmpia Turzii	1920	2002	1,5
5.	Târgoviște	1971	1998	5,0
6.	Oțelul Roșu	1857	1999	12
Total				238,5

În figurile 2.24-2.27 se prezintă haldele de zgură de la Călan, Hunedoara și Galați respectiv depozitul de talc-dolomită de la Zlaști. Compoziția chimică medie a zgurii de pe halda Buituri este prezentată în tabelul 2.18.

Având în vedere cantitatea mare de zgură depozitată în zona Hunedoara (halda veche de zgură și halda nouă de zgură de la Buituri) în ultimii cinci ani au existat preocupări intense în vederea valorificării. Astfel, pe halda de zgură Buituri se află câteva firme care procesează și valorifică zgură [23,31].

Tabelul 2.18. Compoziția zgurii de oțelărie, fracție feroasă [23]

Compoziția chimică a zgurii, %											
Fe _t	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _m	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	B
46,87	13,17	10,25	29,45	16,47	4,65	5,09	18,89	6,79	0,37	0,27	1,16



Figura 2.24. Halda de zgură, Călan [26]



Figura 2.25. Halda de zgură, Hunedoara [26]



Figura 2.26. Halda de zgură, Galați [26]



Figura 2.27. Halda de talc-dolomită, Hunedoara [26]

2.3.6. Deșeul sideritic

Minerul de fier de tip siderită se supune în practică operației de prăjire pentru îndepărtarea dioxidului de carbon, și ulterior, operației de concentrare magnetică. În timpul operației de prăjire carbonatul de fier se transformă în oxizi de fier astfel încât crește concentrația în fier din minerul prăjit, creștere care se accentuează prin concentrarea magnetică. Concentratul rezultat are un conținut de fier între 49-51% și este utilizat în șarjele de aglomerare. Temperatura de disociere a carbonatului de fier este de 400°C, inferioară carbonaților de calciu (910°C), de magneziu (650°C) și respectiv carbonatului dublu de calciu și magneziu (750°C), care nu disociază în procesul de prăjire.

În zona Hunedoarei, în urma preparării minerului sideritic utilizat în procesarea aglomeratului, există trei iazuri de decantare cu deșeu sideritic la Teliuc. Caracteristicile sterilului sunt date de minerul din care provine și de finețea de măcinare determinate de procesul de preparare, uneori fiind posibil ca unele caracteristici ale sterilului să fie înrăutățite de adaosurile din procesul de preparare.

Pentru determinarea cantităților de deșeuri depozitate în iazuri s-au realizat măsurători topografice în sistem de coordonate stereografic 1970 și sistem de referință al cotelor Marea Neagră, în cadrul unui contract de cercetare realizat de colectivul coordonat de prof.dr.ing. Teodor Hepuș. La realizarea măsurătorilor s-a folosit aparatură de măsură electrooptică de tip Leica TCR 307. Măsurătorile s-au realizat la Iazul de decantare nr.1, 2 și 3 - Exploatarea Minieră Teliuc. Aspectele privind iazurile, suprafețele ocupate de deșeul sideritic respectiv cantitățile depozitate se prezintă în figura 2.28.

Tabelul 2.19 prezintă compozițiile chimice a deșeurilor de la prepararea minereurilor de tip siderită prin concentrare.

Tabelul 2.19. Compoziția chimică a deșeurilor de la prepararea minereurilor siderită [10]

Material	Compoziție chimică, [%]							
	SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO
Deșeu iaz decantare	34,41	7,09	7,76	9,18	2,89	16,31	6,62	1,38
Concentrat sideritic secundar	19,83	9,96	18,69	21,08	3,18	20,28	7,59	2,21
Steril secundar	37,65	6,8	5,56	6,39	2,82	15,17	6,50	1,49

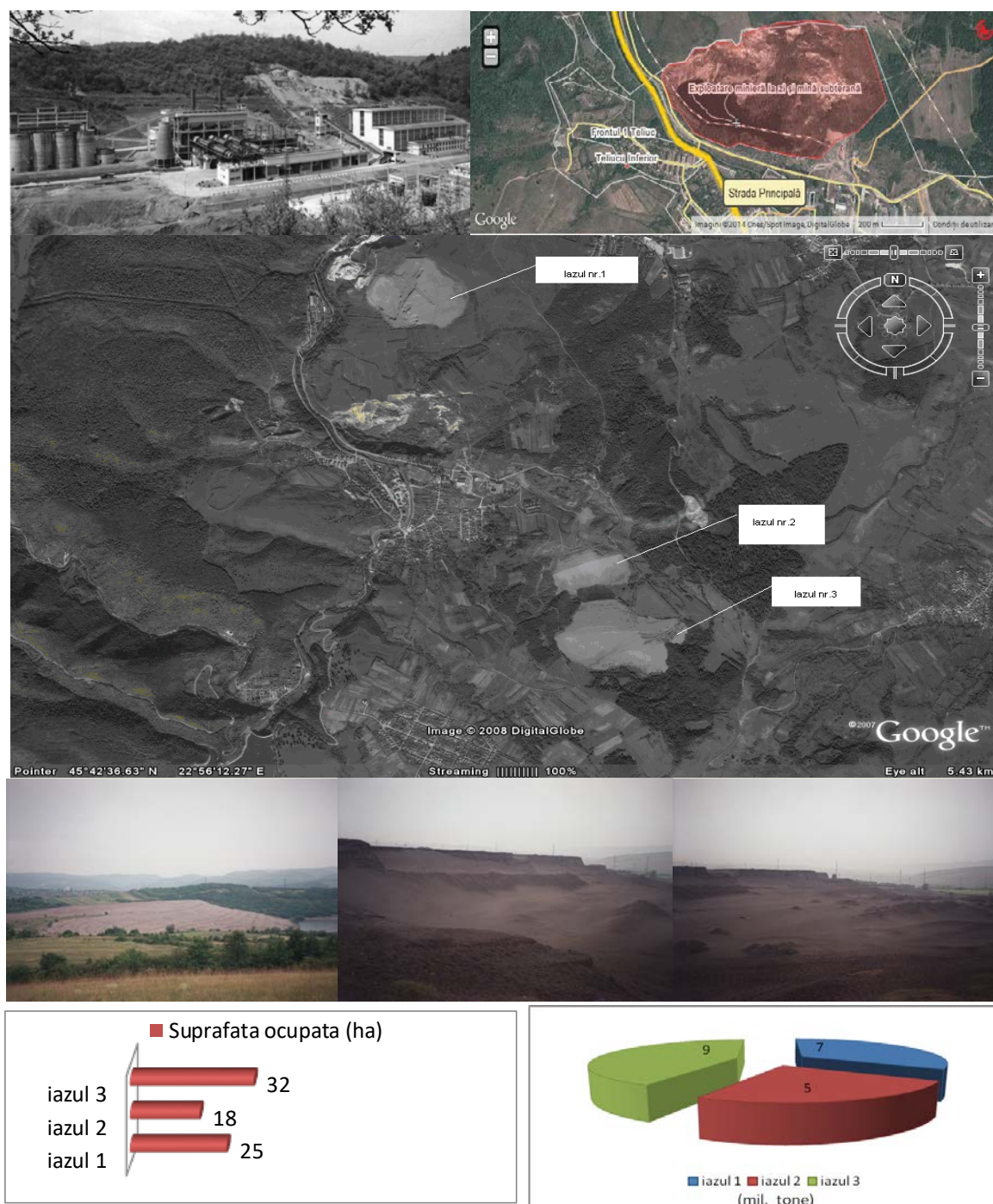


Figura 2.28. Iazurile de depozitare a deseului sideritic, suprafața ocupată și cantitățile depozitate [23]

Este inevitabilă apariția unei variații în timp a caracteristicilor sterilului. În aceeași problemă a caracteristicilor materialelor de care depinde starea depozitului de steril se încadrează și evoluția în timp a însușirilor materialului.

2.3.7. Șlamul feros

Șlamul feros a provenit de la SC Hoeganaes Corporation Europe SA Buzău. Aceasta are ca obiect de activitate, producerea de pulbere brută de fier (75t/zi) și de pulbere redusă (150t/zi) [33,34]. Societatea este lider mondial în producerea pulberilor atomizate și are o gamă largă de produse și o răspândire a fabricilor pe trei continente (America de Nord, Europa și Asia). Produsele societății din Buzău sunt utilizate în industria auto (piese sinterizate pentru motoare, cutii de viteze, direcție, scaune, oglinzi), în industria electromagnetică, în industria aparatelor electrocasnice și de grădina, industria electrozilor de sudură, industria lacurilor și vopselurilor.

Producerea pulberii brute constituie activitatea de baza din cadrul societății, aceasta dispune de un cuptor de topire cu arc electric cu capacitatea maximă proiectată de 75tone/zi. Materia primă de baza utilizată constă în deșeurile de fier vechi. Fierul vechi este procesat și încărcat în benele metalice de șarjare cu care este transportat și încărcat în cuptor. Materiale auxiliare folosite: fonanți (bulgări sau pulberi), var, feroaliaje, cocs, dolomită, produse refractare, etc. Oțelul topit se obține în cuptorul cu arc electric, cu captușeală bazică, capacitatea cuptorului este de 75tone/zi. Durata șarjei 120-205min. După topirea încărcăturii, cuptorul electric este basculat și oțelul topit este evacuat în oala de turnare. Oala de turnare este prevăzută la baza cu un sertar care prin deschidere permite oțelului lichid să curgă controlat într-o pâlnie de turnare prevăzută cu o duză ceramică cu orificiul calibrat, montată în zidăria de la baza pâlniei. Oțelul lichid curge prin orificiul calibrat al pâlniei și ajunge într-un con cu apă de înaltă presiune realizat cu ajutorul unei duze metalice și în vârful acestui con se produce atomizarea propriu-zisă prin care jetul de oțel lichid este transformat în particule de pulbere de fier [35]. Apele tehnologice uzate provenite de la pulverizarea oțelului sunt recirculate (gradul de recirculare este de 94,7%).

La limpezirea apei uzate în bazine rezultă pulberi de fier (șlam feros – cod 10.02.12) care sunt stocate temporar în cadrul secției în containere metalice [34,35].

Compoziția chimică a șlamului feros este prezentată în tabelul 2.20.

Tabelul 2.20. Compoziția chimică a șlamului feros

Compoziția chimică, [%] ASTM E 1479/2016												
Al	Cd	Cu	Cr	Mg	Mn	Ni	Pb	Fe	Sn	Sb	Zn	Alte el
0,003	0,003	0,70	0,54	0,003	0,079	0,046	0,008	84,40	0,016	0,003	0,003	14.196

2.4. Concluzii

În Agenda pentru Dezvoltare Durabilă sunt precizate 17 obiectivele de dezvoltare durabilă (figura 2.29), obiective convenite la nivel internațional și care ar trebui să fie atinse până în 2030. Cele mai relevante obiective pentru industria siderurgică, conform Asociației Mondiale a Oțelului, sunt obiectivele (4), (7), (8), (9), (11), (12), (13), (16) [1,20].

Industria siderurgică este una dintre industriile consumatoare de energie din lume, procesul de fabricație al oțelului necesitând o cantitate mare de energie, care poate fi economisită prin reintroducerea deșeurilor feroase în sectorul de elaborare și turnare a aliajelor, aspect care generează și economii anuale ale emisiilor de CO₂. Asociația Mondială a Oțelului utilizează opt indicatori pentru a măsura aspectele cheie ale performanței economice, de mediu și sociale a industriei siderurgice, indicatori prezentați în tabelul 2.21.

Figura 2.30 prezintă exemple de aplicații ale subproduselor din industria oțelului [33].

Strategia de dezvoltare a industriei metalurgice, pe plan mondial, constă în dezvoltarea tehnologiilor performante în scopul reducerii emisiilor respectiv creșterea randamentelor de recuperare și reciclare a subproduselor [32,33].



Figura 2.29. Obiective de dezvoltare durabilă [20]

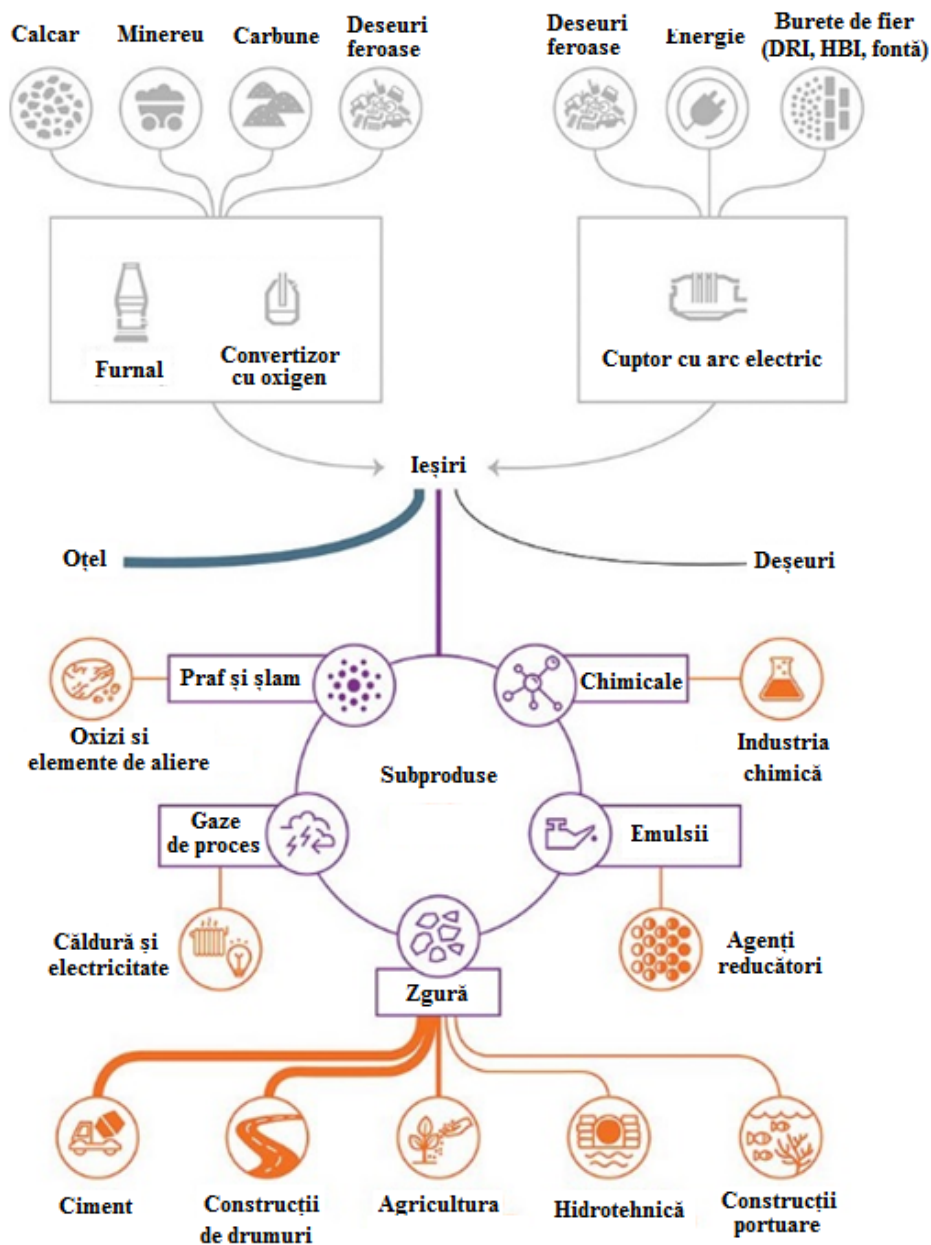


Figura 2.30. Aplicații ale subproduselor din industria oțelului [33]

Tabelul 2.21. Indicatorii de dezvoltare durabilă aferenți industriei siderurgice [1]

Indicatorii performanței de mediu	Indicatorii de performanță socială	Indicatorii performanței economice
Emisii de CO ₂	Rata de frecvență a accidentărilor cu timpul pierdut	Investiții în procese și produse noi
Intensitate energetică	Formarea angajaților	Valoarea economică distribuită
Eficiența materialelor		
Sistemul de management de mediu		

Din analiza caracteristicilor calitative (compoziție chimică și granulometrică) a deșeurilor, a genezei acestora și a cantităților existente (depozitate, respectiv rezultate în mod curente pe fluxuri tehnologice), pot fi concluzionate următoarele:

- deșeuri feroase pulverulente și mărunte rezultă din industria siderurgică dar și din alte ramuri industriale;

- în zona de Vest și Nord - Vest (Hunedoara, Călan, Oțelu Roșu și Reșița) există cantități mari de deșeuri feroase (o mare parte depozitate și o parte care rezultă din procesele tehnologice pe fluxurile de fabricație ale oțelului);

- deșeurile analizate, rezultate din industria siderurgică, au conținut de fier diferit și variază în limitele 20 – 87%;

- pe lângă fier, unele dintre deșeurile rezultate din industria siderurgică au și un conținut ridicat de carbon de 14 – 36% precum și componenți cu caracter bazic (CaO și MgO) sau cu caracter fluidificator (Al₂O₃), acestea având rol, în procesul de reciclare, ca și lianți sau fluidificatori, pe lângă recuperarea elementului util (fier).

În prezent, există o creștere a ponderii utilizării deșeurilor cu conținut de fier (pelete, brichete, aglomerat) respectiv a fierului vechi în încărcătura metalică a agregatelor de elaborare a oțelului. Folosirea subproduselor cu conținut de fier în agregatele de elaborare generează reduceri substanțiale de energie. Indicatorul privitor la eficiența materialelor măsoară procentul de materii prime utilizate în industria siderurgică pentru a transforma oțelul brut în produse și subproduse. Obiectivul principal al industriei siderurgice fiind zero deșeuri, astfel că recuperarea și utilizarea subproduselor în cadrul și în afara industriei siderurgice, combinate cu gestionarea responsabilă a resurselor naturale, contribuie la eficiența materialelor și la prevenirea generării deșeurilor.

CAPITOLUL 3

ANALIZA TEHNOLOGIILOR DE VALORIFICARE A DEȘEURILOR
REZULTATE DIN INDUSTRIA SIDERURGICĂ

3.1. Considerații generale

Dezvoltarea și introducerea de noi tehnologii în industria siderurgică urmează în mod obișnuit etapele: Concept/Stadiul de laborator; Etapa pilot/Dezvoltare; Comercial/Creștere; Consolidare/Maturitate; Declin/Procedee noi, evoluție prezentată în figura 3.1 [36-39]. Aceste noi tehnologii de producere a fontei sau a buretelui de fier pot fi clasificate în mai multe moduri, în funcție de mecanismele principale din procese, tipul de produs rezultat, tipul de cuptor, combustibil, etc.

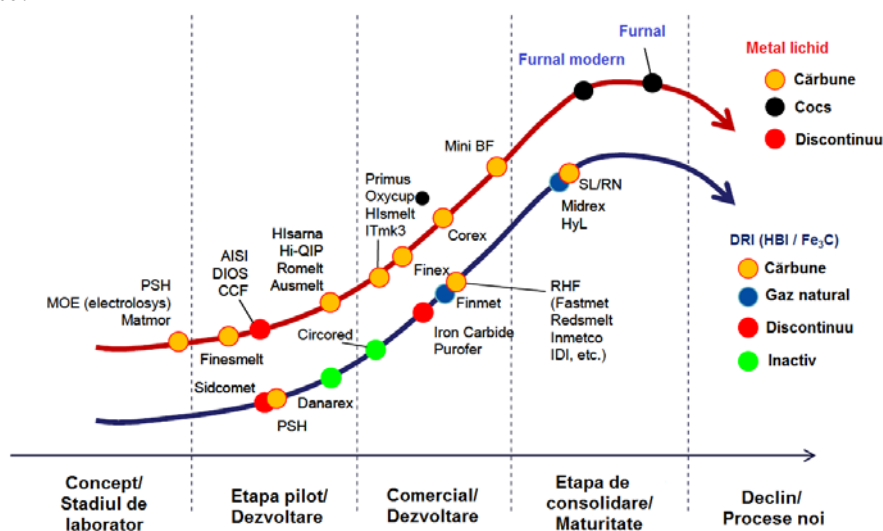


Figura 3.1. Maturitatea diferitelor tehnologii de producere a fontei și oțelului [37]

Datorită faptului ca, cocsul metalurgic a devenit un combustibil deficitar și scump s-au dezvoltat o serie de procese alternative de producere a buretelui de fier, a fontei și oțelului. Din anii 1950, aproximativ 72 de procese de reducere directă din minereurile de fier au fost inventate și testate, acestea fiind prezentate în figura 3.2. O parte din aceste procedee sunt aplicate în prezent în industrie (Midrex, Danarex și HyL III, Finmet și unele procese cu cuptor și vatră rotativă sau cuptorul cu vatră multiplă Primus) [37-39]. Figura 3.3 prezintă 59 de procedee de reducere directă cu producere de metal lichid, din acestea, până în prezent, doar procedeele Corex și Finex au ajuns la aplicații industriale celelalte fiind în diferite stadii (de procedee pilot sau experimentale) [37,38]. Procesele principale utilizate de aceste tehnologii sunt [1,2]:

- Topirea băii: oxizii de fier, dizolvați în straturile de topitură și zgură lichidă, sunt reduși rapid fie prin intermediul cărbunului prezent în zgură, fie prin dizolvarea carbonului în topitură (Hismelt, HIsarna, Romelt și Ausmelt);

- Reducere în stare solidă (strat fluidizat) - au loc reacții gaz-solid în interiorul agregatelor, reducerea cu gaze reducătoare (H₂ și CO) rezultând fie DRI, fie topitură (Midrex, Tenova HyL, Corex și Finex);

- Auto-reducere: reacția urmează un model solid-solid rezultând un produs aglomerat (Oxycup, Hi-QIP, ITmk3 și Fastmet).

Tabelul 3.1 Procesarea deșeurilor pulverulente

Denumire procedeu	Descriere	Caracteristici
Hidrociclonaie (1980 Japonia)	hidrociclonaie cu separarea Zn și a Pb → micropeletizare → aglomerare	60-80% Zn este îndepărtat înainte ca praful să fie utilizat la aglomerare; %C conținut în praf este recuperat eficient.
Hidrociclonaie (1987 Japonia)	hidrociclon → → ↓ evacuare parte inferioară ↓ deshidratare ↓ reciclare proc. siderurgice	evacuare parte superioară ↓ coagulare și sedimentare ↓ deshidratare ↓ vândut (conținut mare de Zn)
Micropeletizare	deshidratare → omogenizare → micropeletizare → aglomerare	construcție relativ simplă a echipamentului; impediment moderat la permeabilitatea gazului la aglomerare.
Peletizare oxidantă	deshidratare → uscarea → omogenizare → peletizare → calcinare → reducere → furnale	a) aglomerare foarte bună a prafului fin
Peletizare și prereducere	prăjire oxidantă → omogenizare → peletizare → prăjire clorurantă → furnale (la combinatul Koho Kogyo se prelucrează ~ 7.000 t praf/lună)	dezincare eficientă, ~ 80%; reducerea consumului de combustibil.
Peletizare oxidantă cu clorurare volatilizantă	prăjire oxidantă → omogenizare → peletizare → prăjire clorurantă → furnale (la combinatul Muroran se prelucrează ~ 5.500-6.000t praf/lună)	a) se pot prelucra toate tipurile de praf; b) dezincare și îndepărtarea eficientă a altor impurități; c) recuperarea metalelor prețioase.
Peletizare cu autoîntărire (1980 Japonia)	deshidratare → amestecare cu ciment → peletizare → întărire → furnale → convertizor	a) praful fin poate fi aglomerat utilizând un echipament simplu
Peletizare cu autoîntărire (1987 Japonia)	Dozare → amestecare → peletizare → sitare → întărire → sitare → furnale → aglomerare	consum scăzut de energie la aglomerare; reducerea substanțială a emisiilor de NO _x și SO _x .

3.2.1. Tehnologii de preparare mecanică a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente

Tehnologiile de preparare mecanică se bazează pe operații de clasare și concentrare a materialelor pulverulente.

Hidrociclonaia șlamului de furnal

În Olanda la combinatul Ijmuiden Hoogovens, funcționează o astfel de instalație cu o capacitate de 60.000t/an, care prelucrează șlamul de furnal cu următoarea compoziție: Fe = 35%; Zn = 0,8%; Pb = 0,2% și C = 31%.

Acest procedeu a fost adoptat din anul 1989 și în Germania la uzina Thyssen Stahl AG, unde hidrociclonaia se face într-o instalație cu trei trepte, schema acestui procedeu fiind prezentat în figura 3.4 [23].

Acest procedeu, relativ simplu ca și construcție, procesează doar șlamul de furnal în vederea reciclării acestuia la aglomerare după ce metalele neferoase au fost concentrate într-o fracție separată ce urmează a fi îmbogățită în mod continuu până când conținutul de Zn și Pb ajunge la valoarea recomandată pentru utilizarea în metalurgia neferoasă.

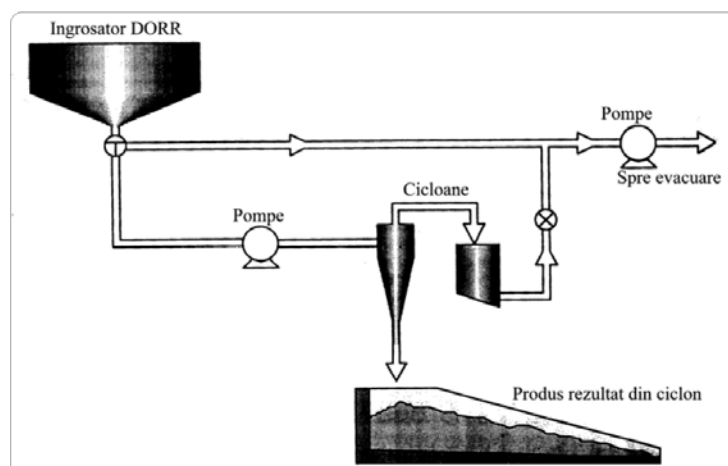


Figura 3.4. Schema instalației de tratament al șlamului de furnal în hidrocicloane [23]

3.2.2. Tehnologii de preparare termică a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente

Procedeele de valorificare a deșeurilor mărunte și pulverulente necesare transformării lor în bucăți mari se realizează prin:

- procedee de aglomerare mecanică: brichetarea și peletizarea;
- procedee de aglomerare termică: aglomerarea sau sinterizarea.

Peletizarea - reprezintă este o metodă de transformare a materialului mărunț (minereuri, deșeuri feroase pulverulente) în material cu dimensiuni mai mari numit **pelete**.

În procesul de peletizare, granulația materialului are un rol esențial. Granulația optimă trebuie să fie sub 0,1-0,2mm (65-80% material cu granulație sub 0,07mm), ajungând la 1-3mm dacă materialul peste 0,2mm nu depășește 10-15%. Umiditatea optimă a materialului depinde de granulație și de proprietățile superficiale ale granulelor. Peletizarea este favorizată de prezența lianților (argilă, var, CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl , bentonite, zgură LF, zgură VD). Dimensiunile peletelor sunt influențate de viteza de rotație și variază între 10-30mm.

Mecanismul formării peletelor crude, prezentat în figura 3.5 constă în aderarea sub formă de sfere a unor particule fine de minereu, printr-o mișcare de rostogolire, ca urmare a unor forțe de coeziune create de un lichid (apa) [40].

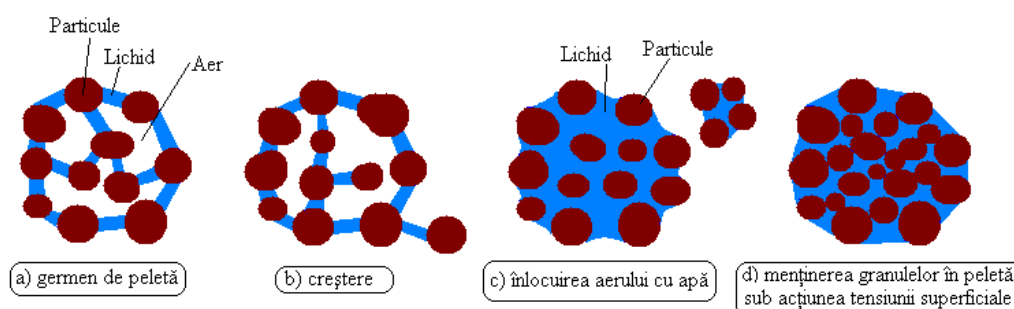


Figura 3.5. Mecanismul formării peletelor crude [40]

Mărimea forței de coeziune depinde de o serie de factori, printre care: compoziția chimică și mineralogică a materialului, forma și mărimea granulelor, natura lianților folosiți, puritatea și cantitatea de apă de adaos. Prezența apei este decisivă, iar numărul și mărimea porilor materialului peletizat sunt foarte importante. Funcție de natura și mărimea porilor, trebuie determinat necesarul de apă de adaos, astfel încât acesta să ducă la umplerea completă a porilor și eliminarea aerului din interior, efectul capilar fiind simțitor redus de prezența aerului în pori [40]. Rezistența peletelor crude este dată de însumarea presiunilor capilare pe care le creează apa de amestec, deci de tensiunea superficială a peletei, însă este direct proporțională cu

dimensiunile și numărul porilor care depind la rândul lor de natura materialului și de gradul de măcinare a acestuia. Îmbunătățirea rezistenței peletelor poate fi asigurată și de folosirea unor lianți, cel mai folosit fiind bentonita. În privința granulației amestecului de peletizare, tehnologia din estul Europei prevede ca minim 80% din amestec trebuie să nu depășească 0,061mm. Tehnologia aplicată în statele din Vest iau în considerare granulația sub 0,044mm, iar valoarea procentuală a acestei fracții trebuie să fie mai mare de 60%.

Instalațiile pentru producerea peletelor crude sunt prezentate în figura 3.6 [40].

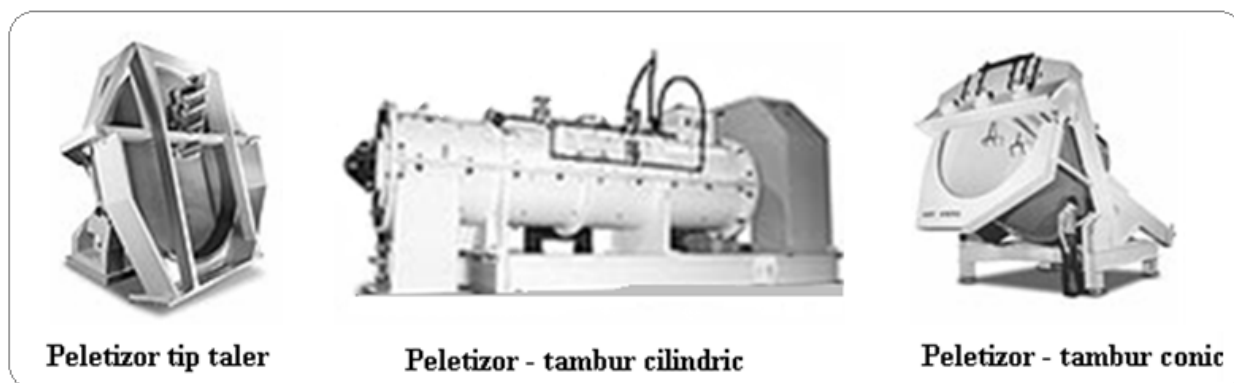


Figura 3.6. Instalații pentru producerea peletelor [40]

Prosesul de durificare se poate realiza prin:

- **durificare la cald** - ardere la temperaturi de până la 1300°C conform unei diagrame de încălzire, în instalații de tipul benzilor continue (asemănătoare din punct de vedere constructiv mașinilor de aglomerare, peletele trecând pe sub cuptorul de aprindere unde sunt uscate și arse) sau în cuptoare rotative. Durificarea peletelor prin încălzire (tratament termic) constă în parcurgerea unor etape (uscarea, preîncălzire, ardere și răcire). Peletele pot fi durificate la cald în cuptoare verticale sau pe pe bandă.

- **durificare cu liant la rece** - prin întărire cu adaos de ciment sau CO₂. Procedeu cel mai cunoscut este procedeul Grancold (Suedia) și constă în utilizarea unui liant în proporție de 10% din amestec, care este format din 60% ciment Portland și 40% zgură de furnal fin măcinată. Pe lângă acest liant se mai adaugă și 3-5% cocs petrol. La procedeul de durificare cu ajutorul dioxidului de carbon în amestecul de peletizare se introduce praf de CaO, hidroxidul de carbon care se formează în prezența umidității reacționează cu CO₂ și formează carbonatul de calciu, care durifică peletele. După durificare, peletele sunt uscate într-un uscător rotativ.

În prezent, producerea peletelor se realizează în instalații complexe cuprinzând toate fazele tehnologice de producere a peletelor în stare crudă până la durificare. În figura 3.7 se prezintă fluxul tehnologic de peletizare a uzinei KOBELKO, capacitatea uzinei de peletizare este de 4 milioane tone/an iar peletele obținute sunt utilizate ca și materie primă pentru furnalul propriu al uzinei, dar și în alte furnale din Japonia [40].

Întrucât peletele se transportă la distanțe foarte mari, o mare atenție se acordă proprietăților fizico-chimice a peletelor:

- rezistența la rostogolire și abraziune – în stare rece se măsoară prin procedeul de rostogolire într-o tobă rotativă. Prin metoda ASTM rezistența reprezintă fracția mai mare de 6mm rezultată în urma trecerii peletelor prin tobă, care trebuie să aibă valori mai mari 94%, valoarea sub 6mm max. 6%;

- rezistența la compresiune – variază de la peletă la peletă;

- dimensiunile peletelor – granulația trebuie să fie uniformă, variază 9,5-25mm, în general media 12,5mm, fracția mai mică de 5mm trebuie să fie sub 5%;

- porozitatea – la peletele crude în limitele 31-36% iar la peletele arse 22-30%;

- compoziția chimică – ex. pelete pentru furnal: 65,35%Fe, 0,45%CaO, 0,42%MgO, 4,72%SiO₂, 0,33%Al₂O₃, 0,008%P, 0,006%S;

- reductibilitatea - este determinată de gradul de îndepărtare a oxigenului în condițiile de reducere. Peletele se încadrează în materialele mediu reductibile;

- indicele de umflare liberă – umflarea peletelor reprezintă o caracteristică foarte importantă privind comportarea acestora în condițiile din furnal. Prin creșterea temperaturii și în prezența gazelor reducătoare, peletele au tendința de a-și crește volumul, pentru peletele cu steril acid o creștere cu 20-25% a volumului reprezintă o evoluție normală.

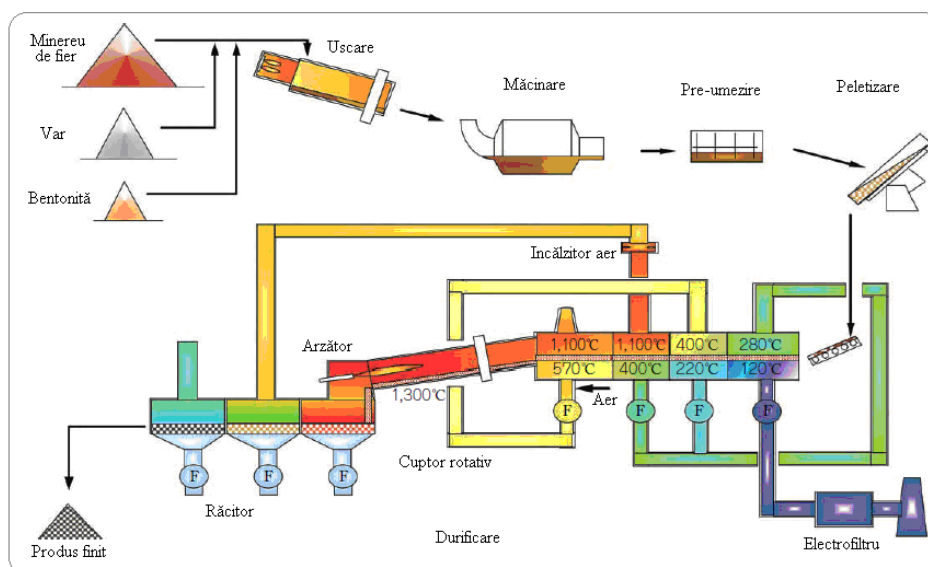


Figura 3.7. Fluxul tehnologic de peletizare a uzinei KOBELCO [40]

Brichetarea reprezintă procesul de transformare a materialelor pulverulente și mărunte în bucăți (brichete) prin presare pe utilaje specializate, urmate de un proces de uscare – prăjire pentru creșterea caracteristicilor mecanice ale acestora [23,24,36,40,41].

La brichetarea minereurilor și concentratelor fine de fier au importanță practică numai metodele fără tratament termic, cele cu tratament termic fiind neeconomice [41]. Dintre acestea se exclud metodele de brichetare cu lianți organici, cum ar fi smoala și gudronurile, deoarece la încărcarea unor asemenea brichete în furnal, rezistența brichetelor scade repede prin arderea lianților. În consecință, metodele de brichetare cu tendințe de utilizare sunt cele fără lianți și cele cu adaosuri de lianți anorganici [23, 24, 41].

Brichetarea se aplică deșeurilor pulverulente (prafuri colectate în instalațiile de desprăfuire) precum și produselor fine obținute prin precipitare. Pentru brichetarea deșeurilor (la 50-60°C) se utilizează lianți anorganici (var, Na_2SiO_3) și uneori lianți organici (leșii sulfite, gudroane grele). Brichetarea nămolurilor din hidrometalurgie sau a șlamurilor din instalațiile de desprăfuire umedă se realizează după desecare și amestecare cu fonanți (borax, sodă, var) care au și rol de lianți. Lianții se adaugă până la 0,5-1%. Presarea se face la $100-200 \cdot 10^5 \text{N/m}^2$. Brichetarea materialelor pulverulente se face mai rar fără liant (doar la materialele cu proprietăți liante) și cu lianți inerti sterili (ciment, Na_2CO_3 , MgCl_2) sau utili (varul în proporție de 510%), în acest ultim caz se obțin brichete autofondate [23,24,41].

Brichetarea la cald, ca procedeu de corecție a compoziției granulometrice a deșeurilor pulverulente se aplică, în prezent, la Voest Alpine Linz Austria, Posco Coreea și Thyssen Stahl AG Germania, fiind utilizat pentru valorificarea prafului de convertizor [23,41]. Instalația prezentată în figura 3.8, are în componență un reactor tip tambur pentru fluidizarea particulelor de praf încălzit până la aproximativ 570°C.

Brichetele astfel obținute au un grad ridicat de metalizare și pot fi încărcate în convertizor ca înlocuitor al fierului vechi. Plumbul și zincul se concentrează în praful colectat, concentrația lor crescând de la 2% până la peste 20%. Atunci când conținutul de plumb și zinc este suficient

de mare (>20%), praful îmbogățit este dirijat spre metalurgia neferoasă ca materie primă secundară. Datorită pericolului de autoaprindere, transportul și stocarea se realizează în atmosferă de azot.

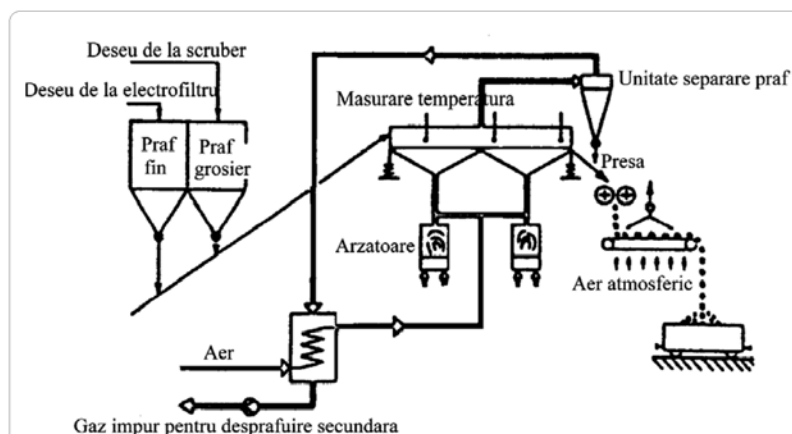


Figura 3.8. Instalația de brichetare a prafului de convertizor, Thyssen Stahl AG [23]

Aglomerarea termică este procedeul de transformare în bucăți a minereurilor fine și mărunte respectiv a deșeurilor pulverulente (figura 3.9).



Figura 3.9. Aglomerarea termică [42]

Consumul mediu de căldură pentru aglomerare este de 4185kJ/kg aglomerat [23,40].

Procesul de aglomerare cuprinde fazele: pregătirea șarjei (sfărâmare, clasare, dozarea și omogenizarea materialelor supuse aglomerării, încărcarea și repartizarea uniformă a șarjei crude pe mașina de aglomerare), uscarea și preîncălzirea șarjei, aglomerarea propriu-zisă, răcirea concasarea și clasarea volumetrică [40]. Creșterea conținutului de faialită în aglomerat are influența pozitivă asupra rezistenței aglomeratului, dar din considerente privind reductibilitatea se limitează la cel mult 18%, de dorit să fie în limitele 12-14% [40-46].

În proporție de peste 98% aglomerarea minereurilor are loc pe instalații cu funcționare continuă (mașini de aglomerare cu bandă) și restul în instalații cu funcționare discontinuă (cutii de aglomerare tip Greenwalt). La instalațiile cu funcționare discontinuă încărcarea materialului se face pe deasupra cutiei într-un strat de 200-300mm. După încărcare are loc aprinderea încărcăturii, concomitent, cu creșterea presiunii sub grătarele instalației. Cutiile de aglomerare au formă dreptunghiulară sau circulară. Aprinderea șarjei se face cu ajutorul unui cuptor de aprindere amplasat deasupra cutiilor, timpul de aprindere fiind de 1-2minute. Procedeul discontinuu prezintă avantajul unor cheltuieli de investiții mai reduse. Se poate adapta relativ ușor la minimal pentru aglomeratul metalizat.

Pentru încărcături mixte, compuse din minereuri de fier și adaosuri de deșeuri recirculabile (prafuri, șlamuri, ținder, minereu mărunț), aglomerarea se desfășoară în intervalul de temperatură 1200-1450°C și este favorizată de producerea unor compuși chimici cu temperaturi de fuziune scăzute: faialită (Fe_2SiO_4), eutecticele sale cu oxidul ferros, silicați și feriți de calciu.

Instalația de aglomerare este *soluția optimă* pentru reciclarea deșeurilor mărunte și pulverulente, oferind posibilitatea prelucrării unor mari cantități de astfel de materiale. Pentru valorificare în instalația de aglomerare este necesar ca aceasta să aibă o serie de adaptări constructive care să facă posibilă prezența în încărcătura supusă aglomerării a materialelor foarte fine, precum materialele prăfoase și șlamurile. Cantitățile de materiale care pot fi prelucrate prin sinterizare sunt limitate de influența pe care acestea o au asupra calității aglomeratului sau fontelor respectiv a funcționării instalației de aglomerare. Restricțiile sunt impuse de conținutul de substanțe alcaline, plumb și zinc. Pentru a mări posibilitatea folosirii acestor materiale cu rezultate pozitive asupra funcționării instalațiilor, calității produselor metalurgice și protecției mediului, combinatele integrate au adoptat o serie de soluții de preparare a deșeurilor mărunte și pulverulente, înaintea introducerii lor la aglomerare, și anume: recernerea ținderului de laminare, prelucrarea zgurilor de convertizor, încorporarea unui separator magnetic pentru fracțiile fine, utilizarea unui hidrocyclon pentru procesarea nămolurilor separate în instalațiile de epurare a gazului de furnal - prin separarea particulelor ultrafine, conținutul de zinc se reduce de la ~2% la ~0,4%, iar produsul sărac în zinc se poate utiliza cu bune rezultate prin încărcarea sa omogenă pe banda de aglomerare, chiar dacă are umiditatea între 10-15% [40,46].

Utilizarea acestor deșeuri feroase ca adaosuri în încărcătura supusă aglomerării este condiționată, alături de compoziția chimică, de granulație și de gradul de amestecare. Cu excepția ținderului, toate celelalte materiale sunt constituite din particule foarte fine, granulația lor variind în limite foarte mari, tabelul 3.2.

Tabelul 3.2. Dimensiunile granulometrice ale materialelor reciclate la aglomerare [46]

Material	< 0,5mm, în [%]	< 0,1mm, în [%]	< 0,063mm, în [%]
Praf de aglomerare	95-99,8	44-85	25-61
Praf de furnal	82-100	-	-
Șlam de furnal	100	-	-
Praf de convertizor	97	0,8	0,7
Țunder	30-42	2-5	1-2

Instalațiile de aglomerare se valorifică de la 32 la 102kg deșeuri pe tona de aglomerat. Cantitățile variază între 43,6-85% din totalul acestora, și anume: praful colectat de la electrofiltrele instalațiilor de aglomerare este reciclat, funcție de compoziția sa chimică între 0-100% în încărcătură, praful de furnal fiind aproape în totalitate recirculat. Cantitățile de praf și șlam de convertizor variază funcție de conținutul de zinc; ținderul poate fi procesat la aglomerare dacă conținutul său de ulei este limitat între 0,1-0,5% iar șlamul de furnal este utilizat în funcție de conținutul său de zinc și plumb dar conținutul ridicat de carbon din praful de furnal face ca acesta să furnizeze combustibil suplimentar în procesul de aglomerare.

Procedeele Carbofer – este un amestec mecanic obținut din deșeuri pulverulente cu conținut de fier și carbon. Carbofer-ul se utilizează la elaborarea fontei sau oțelului [23].

Cercetători ai Institutului de Fonte și Oțeluri din Freiberg au propus în urma unor experimentări de laborator, ca produsul denumit Carbofer să fie insuflat la gurile de vânt ale furnalelor în amestec cu praf de cărbune [23]. Primele experimentări de insuflare a Carbofer-ului în amestec cu praf de cărbune au avut loc în anul 1992 la Maxhütte, Unterwellenborn, la furnalul nr. 2, volum util de 500m³ și o capacitate de 800 t fontă/zi. Proporțiile de amestecuri insuflate au fost de [23, 36]: varianta I – 5 % Carbofer + 95 % praf de cărbune și varianta II – 10 % Carbofer + 90 % praf de cărbune.

În figura 3.10 este prezentat fluxul tehnologic de de obținere și utilizare a Carbofer-ului în cuptor electric cu arc.

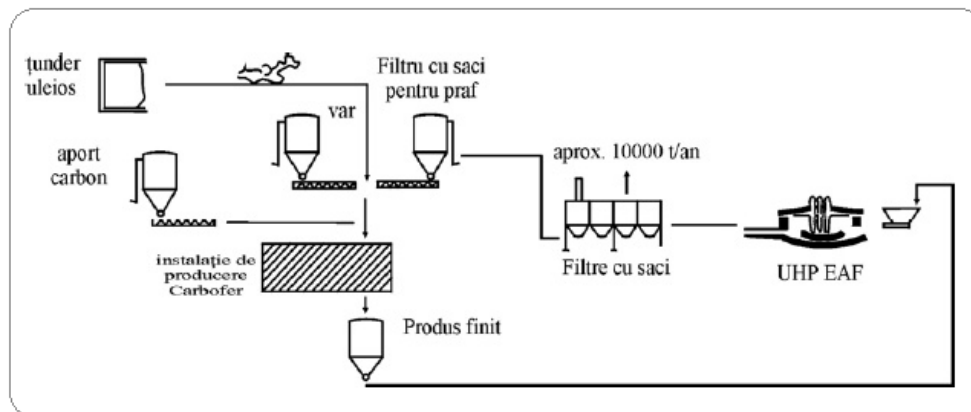


Figura 3.10. Fluxul tehnologic de obținere și utilizare a Carbofer-ului în cuptorul cu arc electric [23]

Avantajul economic constă în transferul imediat al costurilor pentru depozitarea deșeurilor către alte destinații [23,36].

Procesarea tunderului și șlamului uleios de laminare

În timpul procesului de laminare a oțelului rezultă produse auxiliare și materiale reziduale impurificate cu hidrocarburi și unsoari. Prelucrarea termică a unor astfel de materiale, de exemplu în instalația de aglomerare, în furnal și/sau în oțelărie, are consecințe negative asupra funcționării utilajelor, instalațiilor și mediului ambiant. Aceasta se întâmplă deoarece, dacă nu se pot menține compușii organici inerenți deasupra unei anumite temperaturi minime, pentru un anumit timp minim de retenție, se ajunge la generarea unor componente organice volatile (COV-uri, PCDD/F), acestea trebuie deci să fie reținute prin filtrarea fluxului de gaze de ardere [46].

Procesarea tunderului și șlamului uleios se poate realiza prin procedee de tratare fizico-chimică și termică. Variantele de procesare și reciclare prezentate în figura 3.11 au fost dezvoltate pentru a realiza în primul rând dezuleierea acestor tipuri de deșuri (conținutul de ulei poate varia între 1-30%), în vederea unei valorificări ulterioare [23,41,45]. Procedeele aplicate, funcție de posibilitățile fiecărei uzine sau combinat siderurgic, trebuie să asigure o procesare benefică atât din punct de vedere economic cât și ecologic.

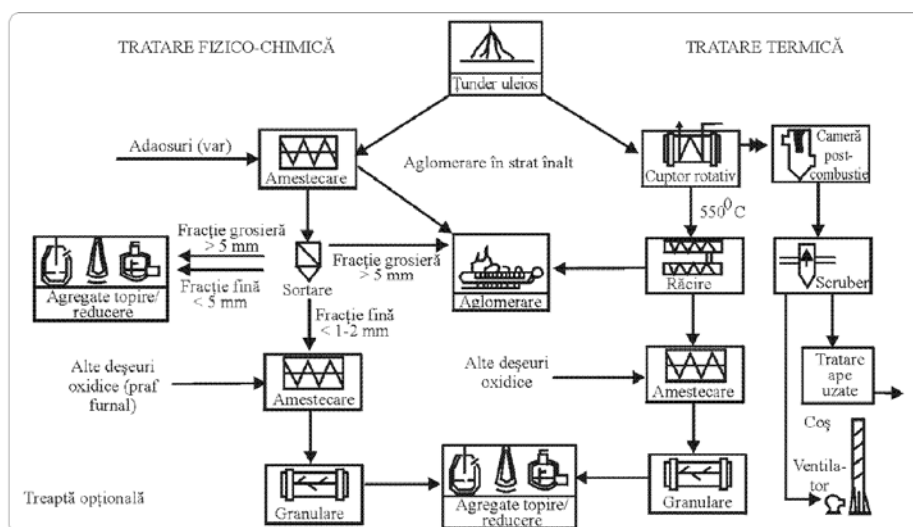


Figura 3.11. Metode de procesare a tunderului și șlamului uleios [46]

Procedeele Thyssen Stahl AG este un procedeu fizico-chimic de uscare a tunderului și șlamului de laminare prin granulare în vederea reciclării ulterioare a acestora, direct în procesul

de elaborare a fontei în furnal, fără o introducere anterioară la aglomerare [23, 46]. Astfel, ținutul și șlamul cu un conținut de ulei de 3-4% și o umiditate de 20-30% sunt amestecate împreună cu praful de “retur” într-un malaxor cu ax dublu. Acest amestec este preparat într-o instalație de granulare numită Lödige și apoi uscat într-un uscător cu pat fluidizat.

Procedeu Preussag - Anlagenbau GmbH, procedeu fizico-chimic, constă dintr-o instalație de procesare hidromecanică a ținutului și șlamului de laminare în vederea dezuleierii acestora. După procesare se obțin ținut și șlam cu conținut de <0,2% ulei, apă și ulei uzat. Ținutul cu conținut scăzut de hidrocarburi poate fi reciclat la aglomerare, apa poate fi reutilizată în acest proces sau în alte etape de flux tehnologic, iar uleiul uzat este de obicei ars într-o instalație specială drept combustibil auxiliar. Instalația procesează 30.000t/an ținut și șlam [45, 46].

La *procedeu de aglomerare în dublu strat*, procedeu termic, în cazul procesului de aglomerare este plasată și cuprinsă în flux o mixtură convențională. Un al doilea strat de amestec este format din materiale ce conțin hidrocarburi (de exemplu, ținut uleios de laminare), minereul de fier fin și praful de cocs este plasat peste stratul principal și este aprins ceva mai târziu. Pe lângă raportul componentelor care participă în procesul de sinterizare, o importanță majoră pentru realizarea condițiilor energetice o are poziționarea exactă și succesiunea aprinderii celui de al doilea strat de sinterizare. Timpul de aprindere al materialului din cel de al doilea strat trebuie să fie astfel determinat încât să se asigure o evaporare completă a uleiului conținut, pentru a se maximiza descompunerea substanțelor organice în H_2O și CO_2 . Aceasta conduce la emisii organice minime, independent de cantitatea de ținut uleios introdusă în fluxul de prelucrare. Deșeurile care conțin substanțe organice sunt încărcate în cel de al doilea strat care are o grosime de 20-50mm, figura 3.12 [40]. O astfel de instalație industrială funcționează la Voest-Alpine Stahl Linz Austria [23,46]. Procedeu permite: reciclarea eficientă și economică a reziduurilor din siderurgie, inclusiv a acelor în care conținutul de substanțe organice poate atinge 3%.

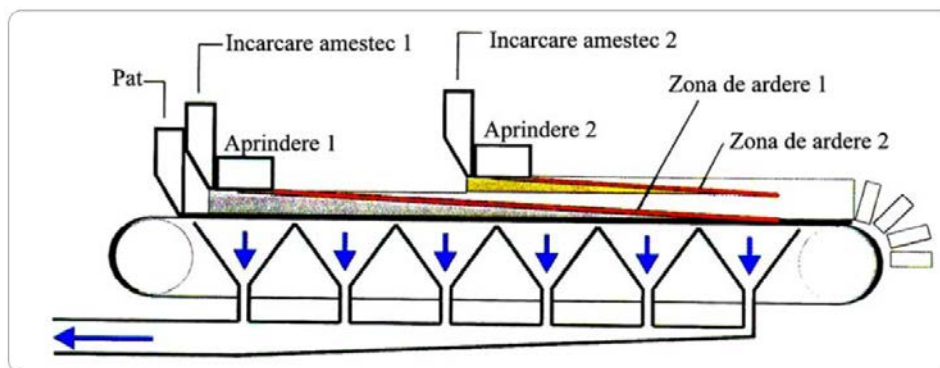


Figura 3.12. Banda pentru procesul de aglomerare cu două straturi [46]

Procedeu de tratare în cuptor rotativ încălzit indirect se utilizează atunci când procesul de sinterizare în două straturi nu poate face față cantităților mari de deșeuri feroase cu conținut de hidrocarburi ce pot exista într-un combinat sau când se impune și procesarea unor deșeuri din exterior în același flux de elaborare a oțelului. Uscarea și îndepărtarea completă a hidrocarburilor din deșeuri are loc la temperaturi cuprinse între 450-550°C, la un timp de menținere de 30-50minute. Distrugerea componentelor organici în camera de combustie are loc la o temperatură mai mare de 1000°C, la un timp de menținere de câteva secunde. Căldura fizică a gazelor de ardere epurate de substanțe organice poate fi utilizată la încălzirea cuptorului rotativ.

Procedeu Altwert Oecotec utilizează un cuptor cu vatră rotativă pentru uscarea și dezuleierea ținutului și șlamului de laminare. În urma aplicării tehnologiei rezultă o pulbere de fier care se utilizează ca și materie primă în sectorul aglomerare sau se brichetează. [23, 46]. Schema tehnologică a acestui procedeu este prezentată în figura 3.13.

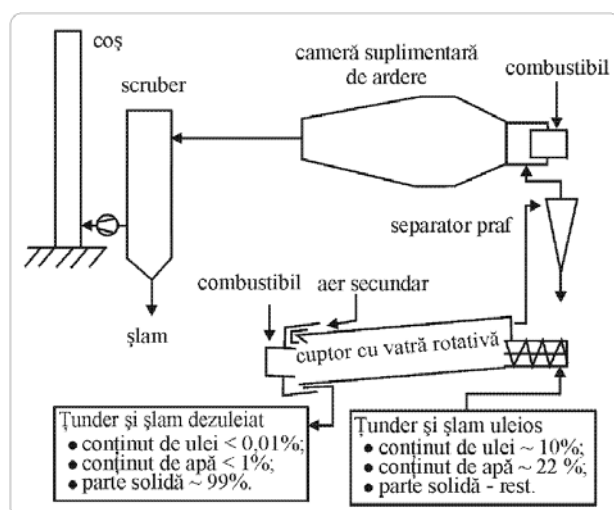


Figura 3.13. Procesarea țunderului și șlamului de laminare prin procedeul Altwert Oecotec [46]

În Müllheim an der Ruhr la combinatul Mannesmann Röhrenwerke AG, firma Altwert Oecotec a construit o instalație care poate procesa 2t/oră țunder și șlam, ceea ce corespunde unei capacități de 12.000t/an.

3.3. Valorificarea deșeurilor feroase pulverulente prin procedee pirometalurgice

3.3.1. Procedee de valorificare în cuptoare rotative

Procedeul Wälz se utilizează în cazul prafurilor generate la elaborarea oțelului, cu conținuturi mari de Zn și Pb (~ 20%) pentru care reciclarea în diverse etape de flux tehnologic din sectorul siderurgic este greu de realizat, schema de principiu a unei instalații Wälz fiind prezentată în figura 3.14 [23].

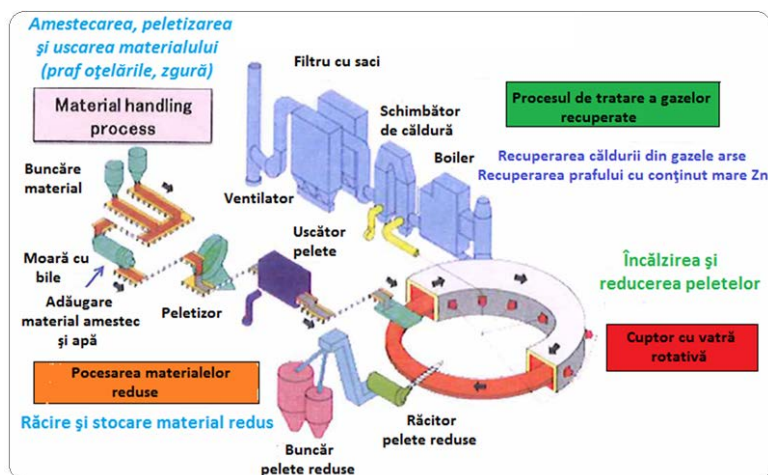


Figura 3.14. Valorificarea deșeurilor pulverulente prin procedeul Waelz [24].

Procedeul ZIA are asociat cuptorului rotativ un reactor vertical pentru producerea zincului metallic. O astfel de instalație, funcționează în SUA și are o capacitate de 27 000t/an.

3.3.2. Procedee de valorificare în cuptoare vatră rotativă

Procedeul INMETCO este un procedeu complex care valorifică o serie de deșuri pulverulente și mărunte cu conținut de fier: praful de cărbune și praful de cocs, praful și șlamul de aglomerare, praful și șlamul de la elaborarea oțelului, țunderul și șlamul de laminare respectiv alte tipuri de deșuri (baterii uzate de Cd-Ni, deșuri de la decapare). Schematic procesarea deșeurilor pulverulente prin procedeul INMETCO este prezentată în figura 3.15.

Procesarea deșeurilor pulverulente prin procedeul INMETCO are în esență două etape, și anume [23]: producerea peletelor crude și reducerea peletelor crude. Se obține burete de fier, un praf bogat în ZnO și PbO (60,3%ZnO, 20%PbO) care este valorificat în metalurgia neferoasă și un gaz cu următoarea compoziție 64%N₂, 2%O₂, 15%CO₂, 19%H₂O, care este folosit la obținerea aburului.

Procedeul FASTMET este un procedeu care presupune valorificarea deșeurilor cu conținut de fier. Produsul final, fier redus direct, poate fi brichetat fierbinte, descărcat ca burete de fier fierbinte în containerele de transfer, răcit dacă este cerut ca și burete de fier rece, sau încărcat direct într-un cuptor electric cu arc (figura 3.16) [23,43,44].

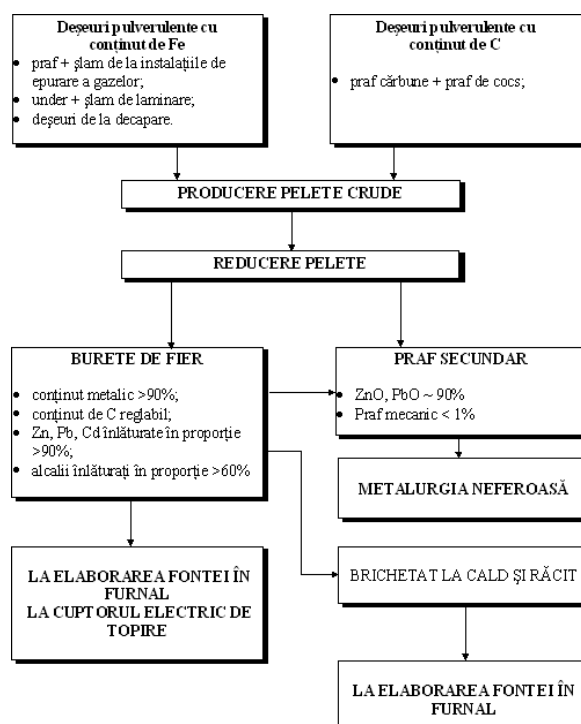


Figura 3.15. Valorificarea deșeurilor pulverulente prin procedeul INMETCO [23].

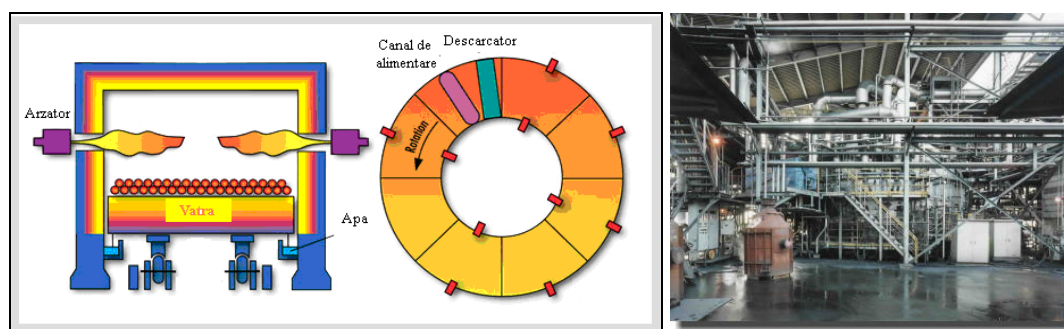


Figura 3.16. Procedeul FASTMET Steel [44]

Procedeul FASTMELT este un procedeu care permite utilizarea buretelui de fier tip FASTMET în aliaj denumit FASTIRON (figura 3.17). Îmbunătățirile obținute utilizând acest procedeu sunt: realizarea unui produs foarte metalizat, optimizarea proceselor de peletizare a materialelor de alimentare și brichetare, optimizarea desing-ului sistemului de gaze reziduale, testarea și colectarea datelor despre mediu, productivitate mare, disponibilitatea mare a uzinei de materii prime, consumarea minimă a materialelor brute, folosirea variată a materialelor brute, producerea de brichete incandescente, producerea de metal incandescent echivalent cu metalul din furnal și longevitatea demonstrată a desing-ului echipamentului.

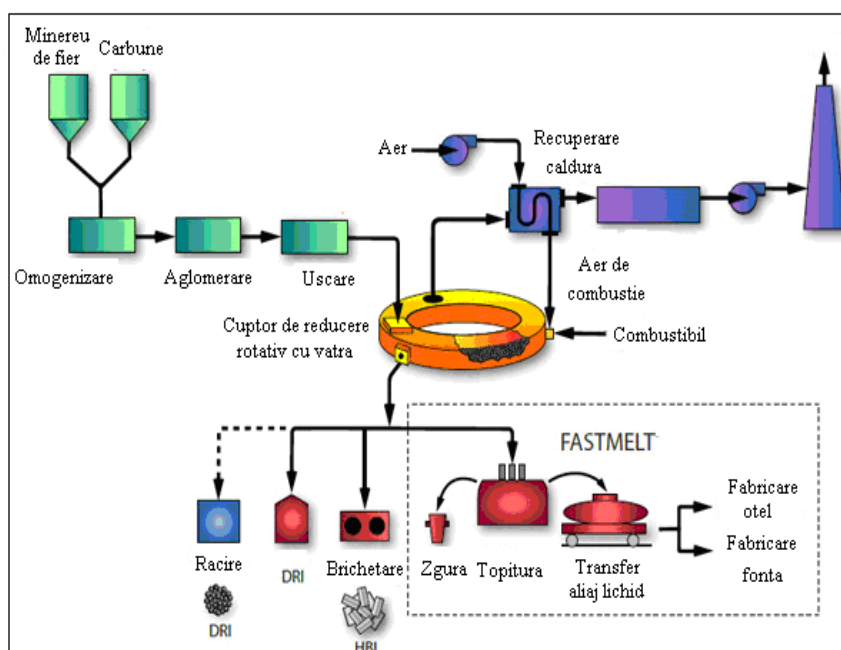


Figura 3.17. Procedul FASTMELT, dezvoltat de Midrex Technologies and Kobe Steel [44]

Astfel, prelucrarea deșeurilor de la oțelăriile uzinale FASTMET și FASTMELT asigură următoarele beneficii: reciclarea deșeurilor care conțin fier, eliminarea nevoii de îndepărtare a deșeurilor, recuperarea fierului valoros pentru producția de oțel și reducerea consumului de cocs.

3.3.3. Procedee de valorificare în cuptoare cu cuvă înaltă

Procedul PRIMUS este un procedeu de valorificare care folosește un cuptor etajat și utilizează deșuri feroase mărunte și pulverulente respectiv șlamuri feroase (figura 3.18).

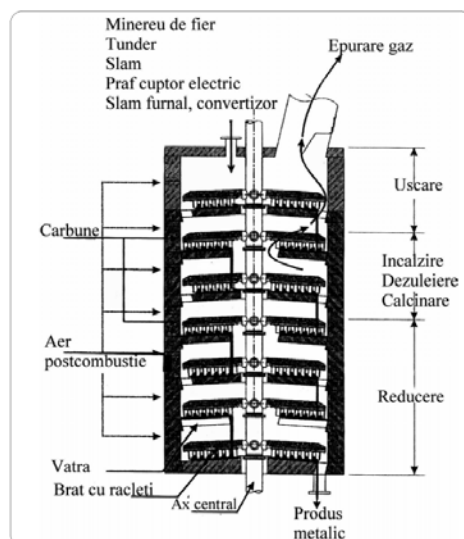


Figura 3.18. Procedul PRIMUS - cuptor cu vetre multietajate [46]

Procedul EPP utilizează o tehnologie care permite procesarea deșeurilor feroase pulverulente rezultate din procesele de elaborare a oțelurilor aliate crom-nichel.

Procedul Plasmadust este utilizat pentru valorificarea prafurilor generate la elaborarea oțelului înalt aliat.

Procedul ZWS Lurgi utilizează ca și materie primă deșuri feroase pulverulente și șlamuri, deshidratate în prealabil [46].

În SUA au fost dezvoltate procedeele: **Ausmelt, Molten Metal Technologies - MMP, AISI - DOE Direct Steel Making Programm și EnvIRONMENT** care urmăresc obținerea unui praf bogat în zinc și plumb [23]. Procedeele EnvIRONMENT (figura 3.19) permite procesarea deșeurilor pulverulente cu conținut de fier, simultan cu alte tipuri de deșeurii pulverulente.

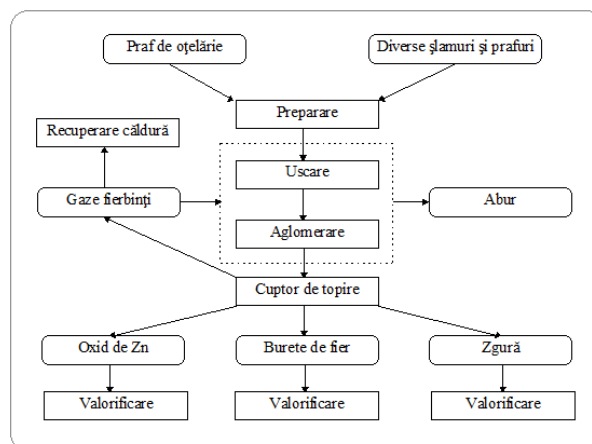


Figura 3.19. Valorificarea deșeurilor pulverulente prin procedeul EnvIRONMENT [23]

Procedeul Contop utilizează ca și materie primă deșeurilor pulverulente siderurgice, cum ar fi: praful și șlamul de furnal; praful și șlamul de convertizor; praful de cuptor electric; praful generat din procesele metalurgiei secundare; Țunderul și șlamul de laminare.

3.4. Procedee hidrometalurgice de valorificare a deșeurilor pulverulente

Etapele procedeelelor hidrometalurgice de prelucrare în vederea recuperării și valorificării elementelor utile precum fierul, zincul, plumbul, cadmiul, etc. din prafulurile captate în fluxurile tehnologice ale combinatelor siderurgice sunt [23, 36, 46]:

- leșierea zincului, plumbului și a altor elemente la temperaturi apropiate de cea ambiantă;
- reciclarea rezidului solid îmbogățit în fier în siderurgie sau alte ramuri industriale;
- purificarea soluțiilor, de exemplu prin cimentare, în vederea separării plumbului, cadmiului etc.;
- recuperarea zincului sub formă de ZnO sau ZnS prin precipitare sau a zincului metalic prin electroliză.

S-au studiat și experimentat numeroase variante de procedee hidrometalurgice. Unele s-au aplicat la scară industrială în fluxuri integrate combinatelor siderurgice sau în linii tehnologice independente. Altele s-au dezvoltat doar la scară de laborator sau în instalații pilot [46]: MRT-US, H-MAR, Cashman, Terra Gaia, Ezinex, Rezeda, INDUTECH, Amax, Cebedeau, SCEGI și Zincex modificat.

Procedeul Zincex modificat a fost adaptat în Spania pentru recuperarea zincului din prafulurile de la oțelăriile electrice și se bazează pe leșierea în soluție slab acidă cu utilizarea acidului sulfuric, urmată de o separare lichid/lichid înaintea etapei de electroliză. Datorită conținutului ridicat de cloruri din prafulurile de oțelărie, tehnologiile de procesare bazate pe utilizarea clorurilor oferă numeroase avantaje în raport cu utilizarea H_2SO_4 sau $NaOH$ [46].

Procedeul H-MAR este o variantă a procedeelelor MAR - "Metals and Acids Recovery" ce este destinată separării zincului și cuprului. Fluxul tehnologic al procedeelelor H-MAR a fost testat inițial pentru leșierea directă a prafulurilor de oțelărie cu obținerea zincului metalic prin electroliză. Instalațiile pilot au fost utilizate pentru extragerea elementelor din prafulurile bogate în cupru sau zinc, recuperate la laminarea alamelor. Fluxul tehnologic al procedeelelor poate fi separat în două secvențe, circuitul de recuperare al cuprului și circuitul de recuperare al zincului.

Procedeul REZEDA (Procédé pour Recyclage du Zinc par Électrolyse des Déchets d’Aciéries) realizează reciclarea zincului din prafurile de oțelărie [46]. Procedeul permite: recuperarea unor elemente precum zincul și plumbul, reciclarea feriziilor în cuptor electric pentru recuperarea fierului și oxidului de calciu și eliminarea clorurilor.

Procedeul Cebedeau a fost dezvoltat de către Universitatea Liege-Belgia în cooperare cu firmele Cebedeau Liege și SERH din Saint Florentin-Franța [23,46]. Acest procedeu se aplică în special prafului captat la cuptorul electric. Produsele obținute prin aplicarea procedului sunt pulbere de zinc și burete de plumb.

Procedeul EZINEX (Extraction du Zinc par Engitec) este aplicat pentru recuperarea zincului conținut în prafurile captate la oțelăriile electrice. Metalul este obținut sub formă de plăci solide (catozi) pe cale electrochimică.

3.5. Concluzii

Din analiza procedeeilor și tehnologiilor de valorificare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier rezultate din siderurgie, rezultă următoarele concluzii:

- la alegerea procedeeului și tehnologiei de valorificare, trebuie să se aibă în vedere atât caracteristicile deșeurilor, cantitatea de deșeu disponibilă, respectiv rezultată pe fluxurile tehnologice curente, posibilitatea procesării concomitente a mai multor deșeuri și nu în ultimul rând destinația produsului obținut (industria siderurgică);

- procedeele neconvenționale de reciclare a deșeurilor permit obținerea unui produs cu conținut ridicat de fier metalic;

- valorificarea deșeurilor prin procedeele clasice (aglomerare, brichetare și peletizare), poate asigura subproduse utilizabile în industria siderurgică ca și materie primă la elaborarea oțelurilor;

- în cercetările și experimentările din prezenta lucrare se vor aplica tehnologiile de valorificare a deșeurilor pulverulente prin brichetare/aglomerare/peletizare;

- valorificarea deșeurilor prin brichetare/aglomerare/peletizare, prezintă interes deosebit pentru unitățile siderurgice puternic restructurate și cantități mari de deșeuri depozitate pe halde și iazuri, pe lângă cele care rezultă pe fluxurile curente.

Subprodusele rezultate pot fi utilizate în industria siderurgică ca și materie primă în cantități de 15-25%. De asemenea, trebuie să se țină deama și de problemele cu care se confruntă uzinele în ce privește calitatea fierului vechi, care în foarte multe cazuri introduc în încărcătura metalică a agregatelor elemente nedorite în oțel.

**PARTEA a II-a CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PROPRII
PRIVIND VALORIFICAREA DEȘEURILOR REZULTATE DIN
PROCESUL DE ELABORARE ȘI PROCESARE A OȚELULUI**



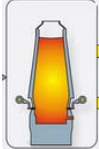



CAPITOLUL 4

CARACTERISTICI CALITATIVE ALE DEȘEURILOR FERROASE MĂRUNTE ȘI PULVERULENTE REZULTATE DIN INDUSTRIA SIDERURGICĂ

Deșeurile cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică sunt: praful și șlamul de aglomerare, praful și șlamul de furnal, praful și șlamul de convertizor, praful de oțelărie, zgură, ținder și șlamul de ținder.

Subprodusele generate în industria siderurgică, pe principalele sectoare ale fluxului tehnologic dintr-un combinat siderurgic integrat, sunt redată în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Subproduse generate pe fluxul de producere a oțelului, în kg/t produs

Sursa de proveniență a subproduselor	Subprodusul	[kg/t]
Transport materii prime 	praful de la sortare mărunț recirculat	30 12,7
Aglomerare 	praful și șlam de aglomerare	0,1
Furnal 	zgura praful de furnal șlam de furnal	262 68 7,4
Oțelărie convertizor cu oxigen 	zgura șlam și praful de convertizor	127 15,5
Oțelărie cuptor cu arc electric 	zgura praful de otelarie	101 11,5
Laminoare 	ținder șlam de ținder	20,9 5,8

Cantitățile importante generate, impactul negativ asupra mediului și potențialul economic datorat componentei utile – fierul, au impus găsirea de soluții pentru reciclarea acestora. Caracteristicile fizico-chimice diferite ale acestora determină condiții diferite de procesare. Acestea au ca scop: valorificarea fierului, reducerea cantităților de deșeuri depozitate, obținerea de subproduse utilizate ca și materie primă la elaborarea fontei și oțelurilor precum și reducerea gradului de poluare la nivel apă-aer-sol.

Pentru realizarea experimentărilor și obținerea subproduselor din cadrul tezei s-au prelevat probe din deșeurile feroase mărunte și pulverulente rezultate pe fluxurile tehnologice curente de producere a fontei și oțelului precum și deșeuri deja depozitate, și anume:

- Șlam de aglomerare-furnale;
- Praful de furnal;

- Şlam de convertizor;
- Praf de convertizor;
- Praf de oţelărie;
- Zgură de oţelărie;
- Țunder;
- Şlam de Țunder;
- Şlam feros.

Caracterizarea calitativă a probelor de deşeuri s-a efectuat în laboratoarele Facultăţii de Inginerie Hunedoara și a Institutului de Cercetări de Energii Regenerabile din cadrul Universităţii Politehnice Timișoara. De asemenea, o parte din determinări s-au efectuat în baza unor colaborări cu Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor de la Universitatea Politehnica București. Probele prelevate s-au obținut de la societățile ArcelorMittal Hunedoara, TMK Reșița și diverse societăți care procesează sau au în administrare depozite de deşeuri feroase mărunte și pulverulente.

Probele prelevate au fost supuse analizei calitative, pentru determinarea caracteristicilor deşeurilor, și anume:

- Analizele chimice – s-au realizat prin diferite metode: chimia umedă, microscopie electronică de baleiaj, distribuție de raze X și absorbție atomică;
- Granulometria materialelor ultrafine s-a utilizat metoda DSL – difracția luminii la sedimentare în mediu apos;
- În cazul materialelor cu granulația cuprinsă în limitele 25µm-1mm clasarea s-a efectuat cu ajutorul instalației de clasare de tip FRITSCH ANALYSETTE 22, iar pentru materialele cu granulație peste 1 mm s-a utilizat ciurul vibrator (set site 1mm-60mm, site cu ochiuri rotunde sau pătrate);
- Determinarea unghiului de taluz natural al deşeurilor feroase a fost determinat prin metoda măsurării în toba rotativă;
- Densitatea în vrac a materialelor;
- Cinetica de umectare a materialelor;
- Analiza mineralogică și morfologică s-a realizat cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj HITACHI model S-2600N echipat cu spectrometru de raze X dispersiv în energie (EDAX) [47-49].

4.1. Caracterizarea şlamului de aglomerare-furnale

Probele de şlam de aglomerare furnale au fost prelevate din depozitul de şlam de la Bataga (Hunedoara). Compoziția chimică a probelor prelevate este prezentată în tabelul 4.2. Densitatea în vrac a acestor deşeuri este de 1,18kg/dm³. Unghiul de taluz natural este pentru fiecare din component de: 16°.

Granulometria şlamului de aglomerare-furnale este prezentată în tabelul 4.3. Distribuția claselor granulometrice este prezentată în figurile 4.1 iar în figura 4.2 este reprezentată curba caracteristică a cineticii de umectare pentru şlamul de aglomerare-furnale [47-49]. Distribuția granulometrică a şlamului de aglomerare-furnale are două zone bine definite care diferă esențial prin forma distribuției claselor.

Parametri:

Intervalul de măsurare	= 0,10 – 601,48 [µm]
Rezoluția	= 62 canale (9 mm/ 228 mm)
Absorbția	= 13,00%
Durata de măsurare	= 50 [scanări]

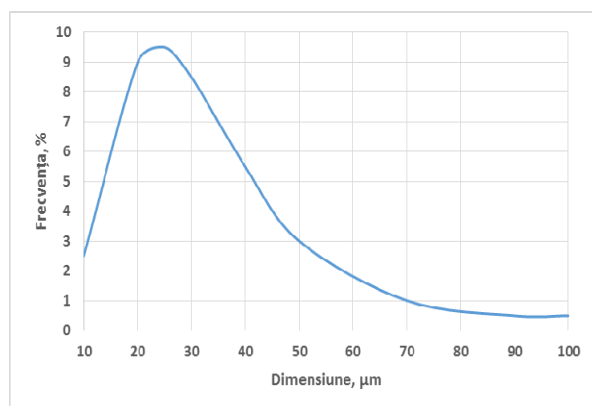
Caracteristica de umectare a acestui deşeu este prezentată în tabelul 4.4. Rezultatele determinărilor granulometrice arată faptul că diametrul mediu al particulelor în şlamul de aglomerare-furnale este de 24,721µm.

Tabelul 4.2. Compoziția chimică a șlamului de aglomerare-furnale Bataga

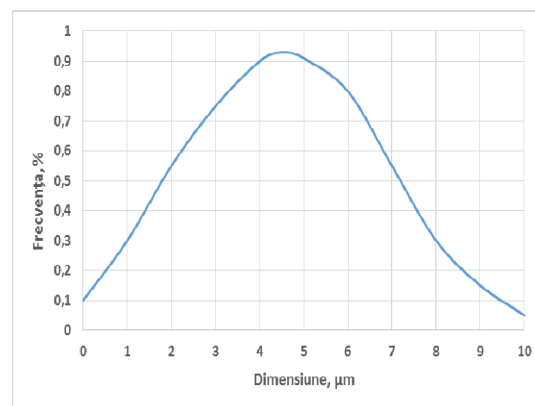
Nr. Crt.	Compoziția chimică, [%]											
	Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	C	PC
1.	29,94	8,73	33,07	10,61	8,98	10,73	2,43	0,87	1,31	0,15	21,84	1,27
2.	29,83	8,95	32,67	10,36	9,36	10,54	2,30	0,84	1,37	0,11	22,49	1,37
3.	31,43	8,51	35,44	9,90	9,88	9,91	2,55	0,85	1,53	0,17	21,15	1,19
4.	30,11	9,32	32,67	10,36	9,25	10,43	2,45	1,05	1,36	0,10	22,20	1,22
5.	30,67	8,66	34,19	10,54	9,17	10,72	2,65	0,86	1,30	0,14	22,51	1,31
Media	30,40	8,84	33,61	10,35	9,33	10,47	2,47	0,89	1,38	0,13	22,04	1,272

Tabelul 4.3. Granulometria șlamului de aglomerare-furnale

Caracteristica	Date statistice		
D – media aritmetică	24,721 μm	Varianța	226,912 μm ²
D – media geometrică	18,871 μm	Abaterea standard	4,971 μm
D – media pătratică	28,910 μm	Abaterea medie pătratică	11,382 μm
D – media armonică	9,109 μm	Coeficientul variației	20,112 %
Uniformitatea	0,50		
Asimetria	0,926		
Deschiderea	1,714		
Suprafața specifică	0,66 m ² /cm ³		
Factorul de formă	1,00		



clasa 10-100 μm



clasa 0-10 μm

Figura 4.1. Distribuția claselor granulometrice pentru șlamul de aglomerare-furnale**Tabelul 4.4. Caracteristica de umectare a șlamului de aglomerare-furnale**

Proba	Volum [cm ³]	Masa probei [g]	Masa în vrac [g/cm ³]	Densitate [g/cm ³]	Porozitate strat [%]	Timp de umectare [min]	Capacitate umectare [g/g]	Presiune capilară [MPa]
1	6,497	6,01	1,561	2,222	58,37	6,83	0,480	2,268·10 ⁻⁴
2	3,486	3,17	1,561	2,222	59,07	4,00	0,495	1,495·10 ⁻⁴
3	5,228	4,69	1,561	2,222	59,63	6,83	0,497	2,111·10 ⁻⁴

În figura 4.3 se prezintă aspectele morfologice corespunzătoare probelor de șlam de aglomerare-furnale. Particulele au dimensiuni și forme diferite, unele ușor rotunjite, altele poliedrice.

Prin analiza în raze-X se prezintă în figura 4.4 distribuția elementelor în particulele componente ale probei. Astfel Fe, Mn, Al, K, Ca și Pb prezintă o distribuție aproape uniformă, cu concentrații zonale în particule, cum ar fi ale Si și Zn.

În figura 4.5 se prezintă spectrul de raze-X dispersiv în energie (EDAX). Astfel s-a stabilit cu aproximație fazele compuse, care predomină în structura mineralogică formată. Oxizii prezenți în particulele analizate sunt: ZnO-Fe₂O₃-CaO-SiO₂-MnO-Al₂O₃-PbO.

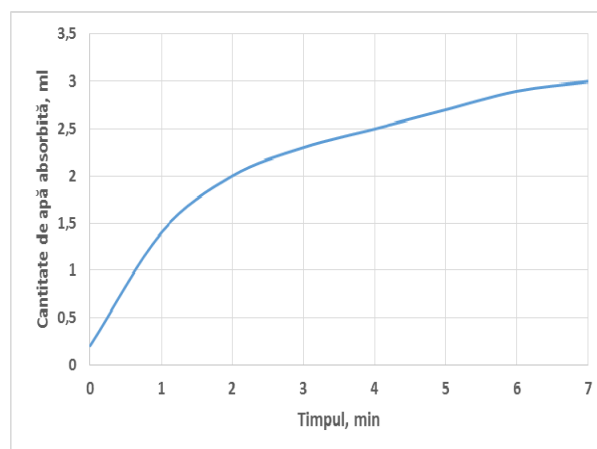


Figura 4.2. Cinetica umectării a șlamului de aglomerare-furnale

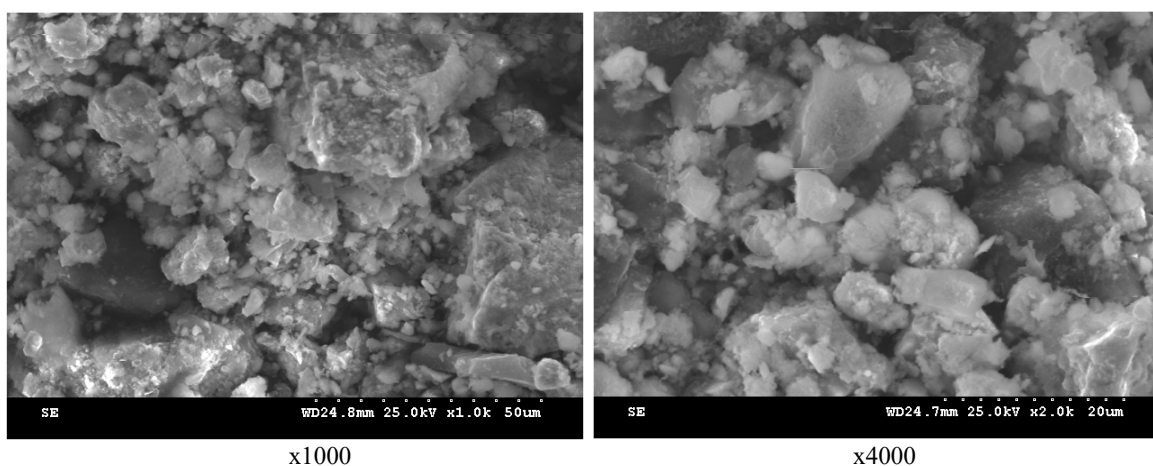


Figura 4.3. Imaginea de microscopie electronică cu baleiaj a șlamului de aglomerare furnale

În cazul șlamului de aglomerare-furnale analizat, judecând după analiza medie ale particulelor, putem prezenta o formă complexă de faze (spinel) care are un raport Zn/Fe similar:
 $4 \cdot [\text{ZnO} \cdot 2(\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)] + \text{FeO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2(\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$ cu $\text{Zn} / \text{Fe} = 0,18879$

Acest praf este foarte fin, majoritatea particulelor având formă sferică. Au fost identificate complexe de faze ZnFe_2O_4 (Franklinit), ZnO (Zincit) și Fe_3O_4 (Magnetit) combinate.

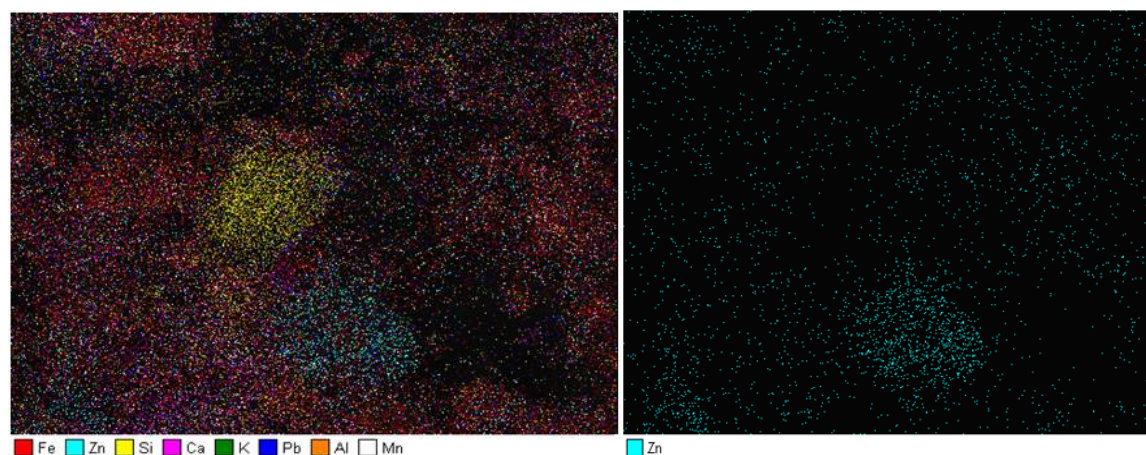


Figura 4.4. Imagini de distribuție de raze X pentru șlamul de aglomerare-furnale

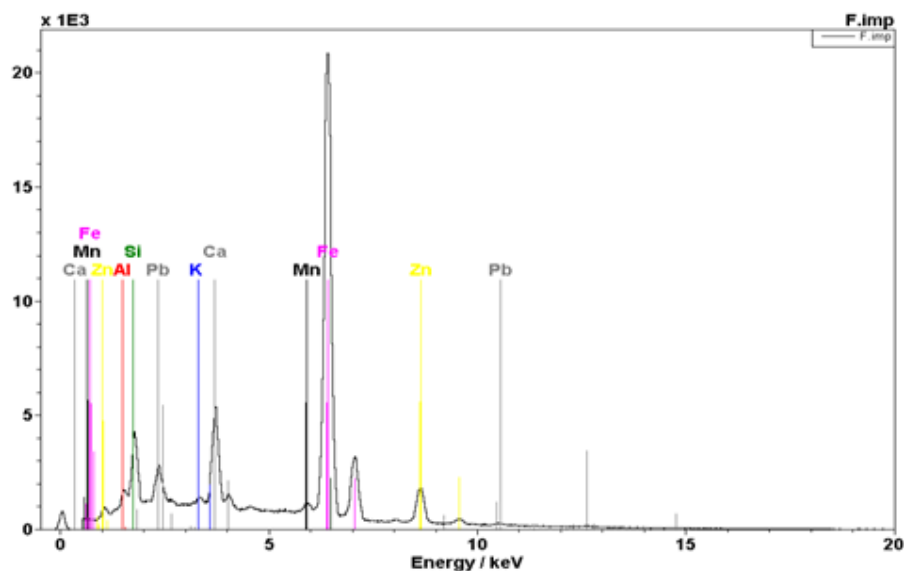


Figura 4.5. Spectrul de raze X dispersiv în energie (EDAX) pentru șlamul de aglomerare-furnale

4.2. Caracterizarea șlamului de convertizor

Este un material cu un conținut ridicat de fier, un raport optim al $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \sim 2-2,5$, conținut ridicat de carbon și conținut scăzut de zinc. Dezavantajul procesării materialului este finețea mare, 70% sub $50 \mu\text{m}$, ceea ce conduce la timpi îndelungați de decantare, uscare și manipulare greoaie. Procedeele dezvoltate pentru procesarea șlamului se bazează pe decantarea în cascadă a suspensiei și filtrarea în vacuum sau deversarea în iazuri de decantare naturale.

Compoziția chimică a probelor de șlam de convertizor este prezentată în tabelul 4.5.

Caracteristica de umectare a acestui deșeu este dată în tabelul 4.6 și se constată comportarea relativ apropiată a celor două componente șlam de aglomerare-furnale respectiv șlam de convertizor.

Tabelul 4.5. Compoziția chimică a șlamului de convertizor

Nr. crt.	Compoziția chimică a șlamului de convertizor grosier, [%]											
	Fe_{tot}	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	S	Zn	Altele
1.	58,56	4,47	83,57	2,23	0,87	2,34	1,32	4,11	0,97	0,16	0,21	0,11
2.	54,16	3,53	77,42	2,91	1,34	4,62	1,94	4,23	0,89	0,22	0,27	1,15
3.	54,13	4,16	77,16	3,55	1,48	5,27	2,32	3,65	0,63	0,27	0,32	0,84
4.	5276	3,11	73,69	4,16	1,28	6,39	2,39	4,34	0,52	0,19	0,268	0,17
Media	54,35	3,34	78,45	3,15	1,18	4,71	2,05	4,30	0,75	0,35	0,46	1,33
Nr. crt.	Compoziția chimică a șlamului de convertizor fin, [%]											
	Fe_{tot}	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	P_2O_5	S	Zn	Altele
1.	63,39	5,89	84,11	0,94	0,10	2,45	1,05	3,21	0,06	0,07	1,37	0,75
2.	62,92	5,75	83,25	1,04	0,10	2,61	1,23	4,12	0,06	0,05	1,45	0,66
3.	63,38	7,84	85,15	1,12	0,12	2,04	0,83	4,87	0,08	0,06	1,31	0,69
4.	61,41	6,45	81,55	1,18	0,11	2,78	1,11	4,65	0,07	0,06	1,28	0,76
Media	58,12	6,48	83,60	1,11	0,11	2,31	0,97	4,32	0,06	0,06	1,46	1,42

În figura 4.6 sunt prezentate curbele caracteristice ale cineticii de umectare a deșeurii (șlam grosier și fin). Densitatea în vrac a acestora este de $1,22 \text{ kg/dm}^3$. Unghiul de taluz natural este pentru fiecare din componente: 36° - șlam convertizor grosier respectiv 32° - șlam convertizor fin.

Tabelul 4.6. Caracteristica de umectare a șlamului de convertizor

Proba	Volum [cm ³]	Masa probei [g]	Masa în vrac [g/cm ³]	Densitate [g/cm ³]	Porozitate strat [%]	Timp de umectare [min]	Capacitate umectare [g/g]	Presiune capilară [MPa]
1 / șlam grosier	5,228	9,15	2,445	3,033	42,31	3,67	0,210	$2,558 \cdot 10^{-4}$
2 / șlam grosier	3,486	6,01	2,445	3,033	43,16	4,17	0,372	$1,916 \cdot 10^{-4}$
3 / șlam fin	3,486	3,82	1,756	4,184	73,81	1,33	0,372	$2,095 \cdot 10^{-4}$
4 / șlam fin	6,497	7,15	1,756	4,184	73,70	2,67	0,072	$1,808 \cdot 10^{-4}$

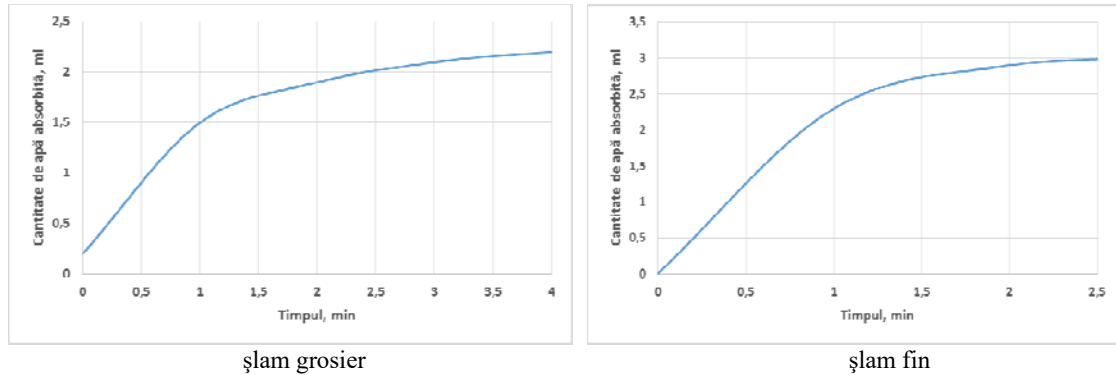
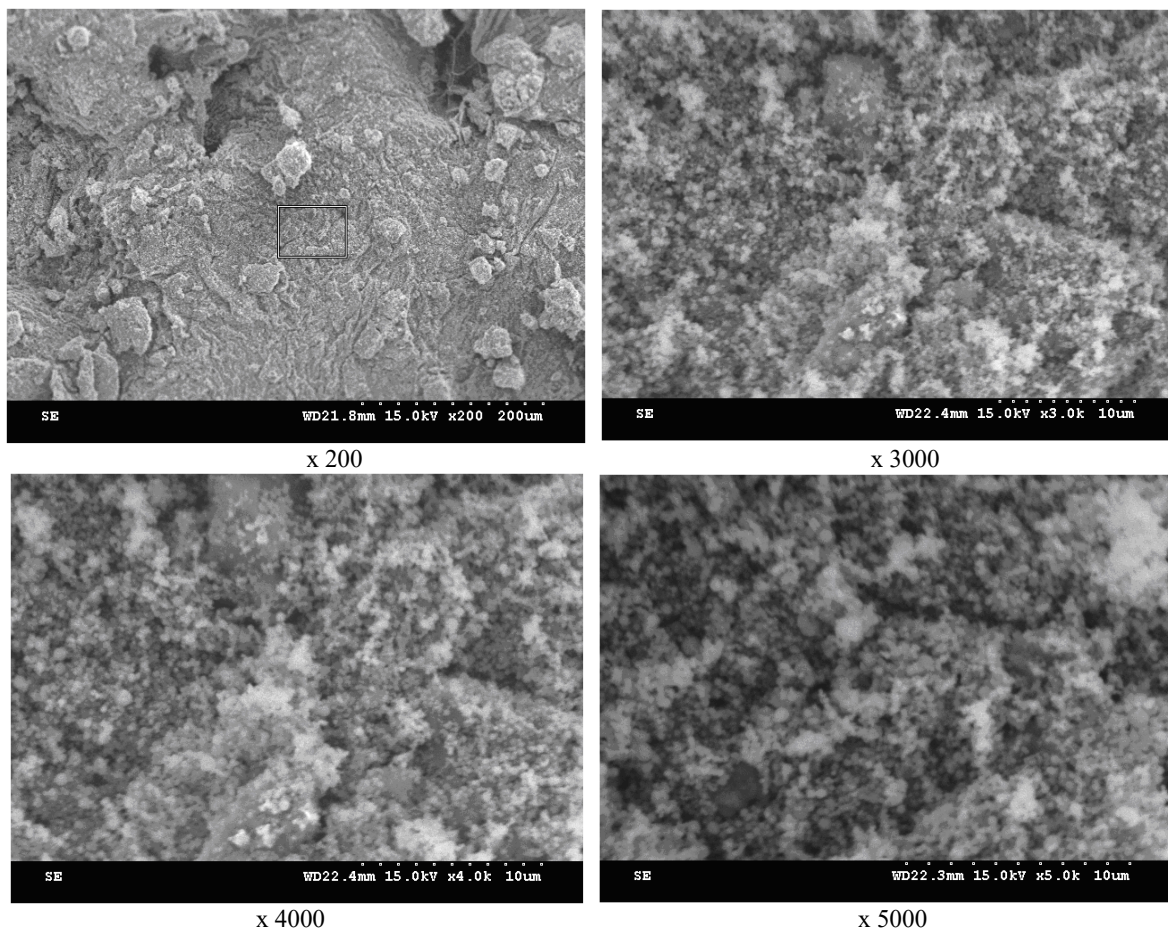
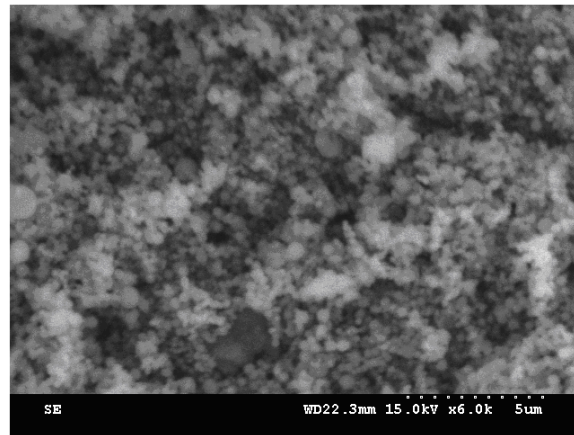


Figura 4.6. Cinetica umectării șlamului de convertizor

În figura 4.7 se prezintă imaginile de microscopie electronică cu baleiaj - imagini de electroni secundari (SEI) pentru șlamul de convertizor iar în figura 4.8 se prezintă distribuția cu raze X obținută în urma analizei probelor.

În figura 4.9 se prezintă spectrul de raze-X dispersiv în energie (EDAX).





x 6000

Figura 4.7. Imagini de microscopie electronică cu baleiaj pentru șlamul de convertizor

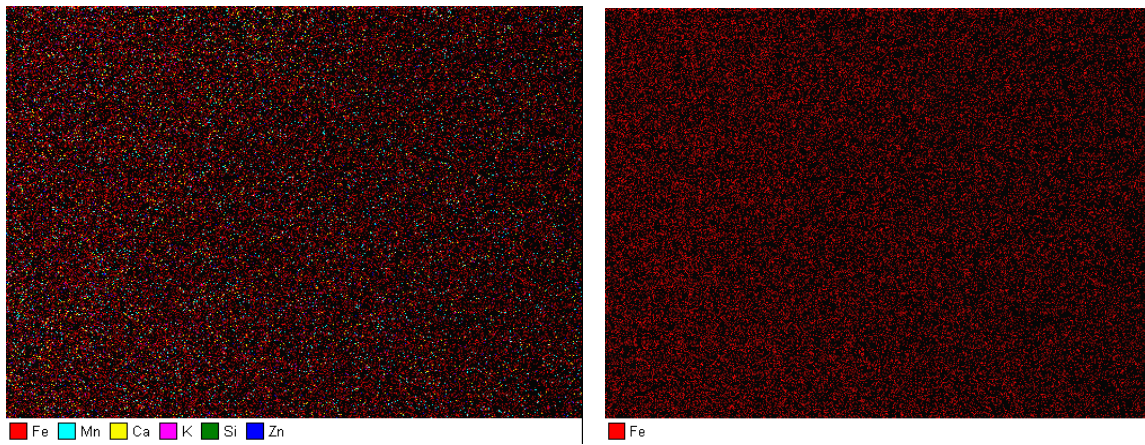


Figura 4.8. Imagini de distribuție de raze X pentru șlamul de convertizor

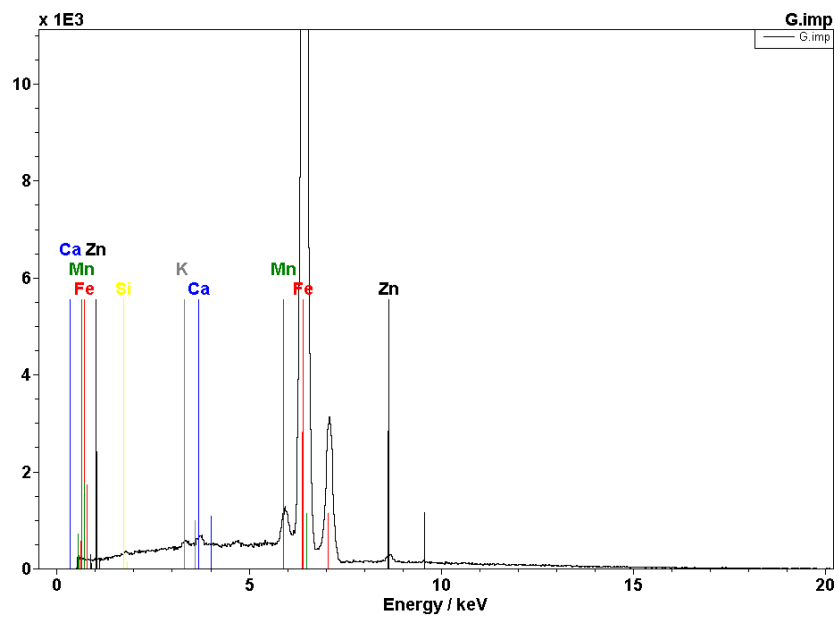


Figura 4.9. Spectrul de raze X dispersiv în energie (EDAX) pentru șlamul de convertizor

Societățile siderurgice care au instalații de aglomerare recirculă aproape în totalitate și șlamul de convertizor la producerea aglomeratului. Pentru o astfel de valorificare, conținutul de

zinc este limitativ și depinde de compoziția chimică a fierului vechi utilizat la elaborarea oțelului în convertizor. Când șlamul provine de la elaborarea oțelului din deșeuri de tablă galvanizată, nu poate fi introdus direct la aglomerare ci se supune operațiilor de tratare pentru purificare cu recuperarea zincului. Șlamul poate fi peletizat sau brichetat la rece și brichetele reintroduse la elaborarea oțelului în convertizor înlocuind parțial fierul vechi în încărcătură.

4.3. Caracterizarea prafului de oțelărie electrică

Praful de oțelărie provine din mai multe surse care diferă după zona sau agregatul care este dotat cu electrofiltre. Sursa principală de praf de electrofiltru pe fluxul de elaborare a oțelului într-un combinat siderurgic este desprăfuirea gazelor ale cuptoarelor electrice de elaborare a oțelului. Din punct de vedere al compoziției chimice deșeurile sunt compatibile fluxului de producere a fontei, excepție făcând praful de la cuptoarele electrice datorită concentrației mari de Zn 3-27%. În mare parte acestea sunt reciclate dar finețea granulelor împiedică o reciclare completă. Praful de electrofiltru este, prin excelență foarte fin 90% sub 60μm. Finețea materialelor impune limitarea reciclării prin metoda clasică de aglomerare. În schimb granulația se pretează pentru peletizarea acestuia. Această caracteristică a determinat realizarea de fluxuri de prelucrare a prafului și peletizarea in situ a acestuia dar pentru pelete nu s-au găsit încă soluții tehnice acceptabile pentru procesare în România. Uzinele siderurgice care nu dispun de posibilitatea procesării prin aglomerare îl depozitează (de exemplu ArcelorMittal Hunedoara, Mechel Câmpia Turzii și Mechel Târgoviște). În majoritatea combinatelor integrate acesta este prelucrat prin fluxul de aglomerare.

Analiza chimică a probelor de praf de oțelărie care rezultă de la elaborarea oțelului în cuptoare cu arc electric sunt prezentate în tabelele 4.7-4.9.

Tabelul 4.7. Compoziția chimică a prafului de oțelărie de la ArcelorMittal Hunedoara

Nr. crt.	Compoziția chimică, [%]											
	Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	ZnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	Altele
1.	27,68	39,53	21,93	5,79	0,83	4,38	3,92	2,95	3,28	3,11	4,00	10,28
2.	30,66	43,80	18,05	5,68	0,80	4,97	2,61	3,26	2,51	3,00	2,15	13,17
3.	29,40	41,89	20,75	5,00	0,52	4,48	3,46	2,30	4,00	3,60	4,00	10,00
4.	28,42	40,60	23,34	4,63	0,55	4,70	3,30	3,53	2,40	3,36	2,40	11,19
5.	29,10	41,57	21,96	5,26	0,66	4,52	3,60	3,50	2,78	3,71	3,60	8,84
Media	29,08	41,48	21,21	5,28	0,68	4,61	3,38	3,11	3,00	3,36	3,23	10,70

Tabelul 4.8. Compoziția chimică a prafului de oțelărie de la TMK Reșița

Nr. crt.	Compoziția chimică, [%]											
	Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	ZnO	Altele
1.	39,32	3,26	53,64	4,34	0,35	8,42	2,95	3,43	0,32	0,28	16,81	6,2
2.	44,56	4,11	59,09	3,62	1,12	8,64	2,82	4,12	0,64	0,32	13,92	1,6
3.	47,32	4,89	62,26	4,45	1,22	6,54	2,87	4,67	0,65	0,39	11,75	0,31
4.	42,83	4,37	56,33	4,67	0,54	7,11	3,43	4,28	0,54	0,42	12,83	5,48
5.	41,77	3,61	51,47	3,64	1	7,89	4,15	5,56	0,82	0,35	11,28	10,23
Media	43,16	4,048	56,558	4,144	0,846	7,72	3,244	4,412	0,594	0,352	13,318	4,764

Tabelul 4.9. Compoziția chimică a prafului de oțelărie de la MECHEL Oțelul Roșu

Nr. crt.	Compoziția chimică, [%]											
	Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	ZnO	Altele
1.	45,86	4,37	60,68	3,24	0,65	5,36	2,98	4,2	0,82	0,56	16,28	0,86
2.	43,57	3,99	57,98	3,79	1,01	6,37	3,88	4,12	0,74	0,48	16,92	0,72
3.	46,11	4,52	60,87	3,16	0,83	5,88	3,79	4,67	0,85	0,59	14,75	0,09
4.	42,87	3,74	60,13	3,21	0,57	5,03	3,82	4,28	0,78	0,61	16,95	0,88
5.	40,79	2,82	56,21	4,04	0,99	6,85	4,16	4,56	0,86	0,66	15,79	3,06
Media	43,84	3,888	59,174	3,488	0,81	5,898	3,726	4,366	0,81	0,58	16,138	1,122

La praful de oțelărie unghiul de taluz natural este 35° . Granulometria prafului de oțelărie de la Combinatul TMK Reșița se prezintă în tabelul 4.10. Distribuție granulometrică este prezentată în figura 4.10. Densitatea în vrac a materialului este de $0,96\text{kg}/\text{dm}^3$. Caracteristica de umectare a materialului este prezentată în tabelul 4.11 și curba caracteristică în figura 4.11. Cinetica umectării probelor din deșeuri feroase a fost determinată prin metoda clasică a absorbției apei în coloana de material.

Morfologia probei este prezentată în figura 4.12 iar distribuția de raze X în figura 4.13. Proba constă din particule de formă aproape sferică, cu distribuție dimensională diversă, predominând particulele submicronice. Spectrul de raze-X dispersiv în energie (EDAX) are forma din figura 4.14.

Tabelul 4.10. Granulometria prafului de oțelărie de la TMK Reșița

Caracteristica	Date statistice		
D – media aritmetică	0,583 μm	Varianța	0,595 μm^2
D – media geometrică	0,477 μm	Abaterea standard	0,763 μm
D – media pătratică	0,964 μm	Abaterea medie pătratică	0,273 μm
D – media armonică	0,410 μm	Coefficientul variației	131,006 %
Uniformitatea	0,53		
Asimetria	15,048		
Deschiderea	1,418		
Suprafața specifică	14,62 m^2/cm^3		
Factorul de formă	1,00		

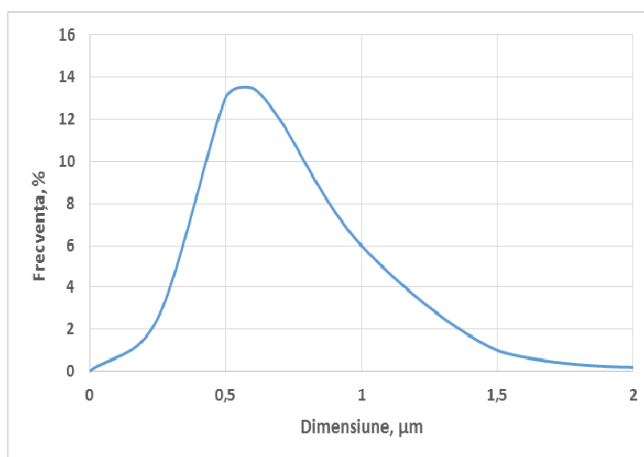


Figura 4.10. Distribuția granulometrică a prafului de oțelărie

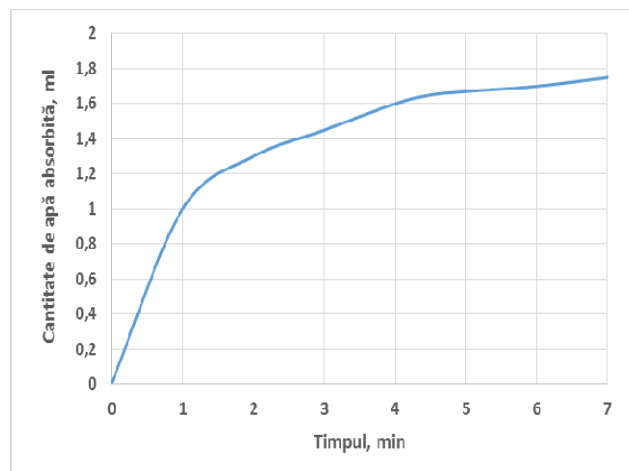


Figura 4.11. Cinetica umectării prafului de oțelărie de la TMK Reșița

Tabelul 4.11. Caracteristicile cineticii capacității de umectare ale prafului de oțelărie de la TMK Reșița

Proba	Volum [cm ³]	Masa probei [g]	Masa în vrac [g/cm ³]	Densitate [g/cm ³]	Porozitate strat [%]	Timp de umectare [min]	Capacitate umectare [g/g]	Presiune capilară [MPa]
1	3,486	1,8	1,114	3,562	85,50	2,17	0,120	$1,421 \cdot 10^{-5}$
2	6,497	3,7	1,114	3,562	84,01	6,50	0,461	$9,325 \cdot 10^{-5}$

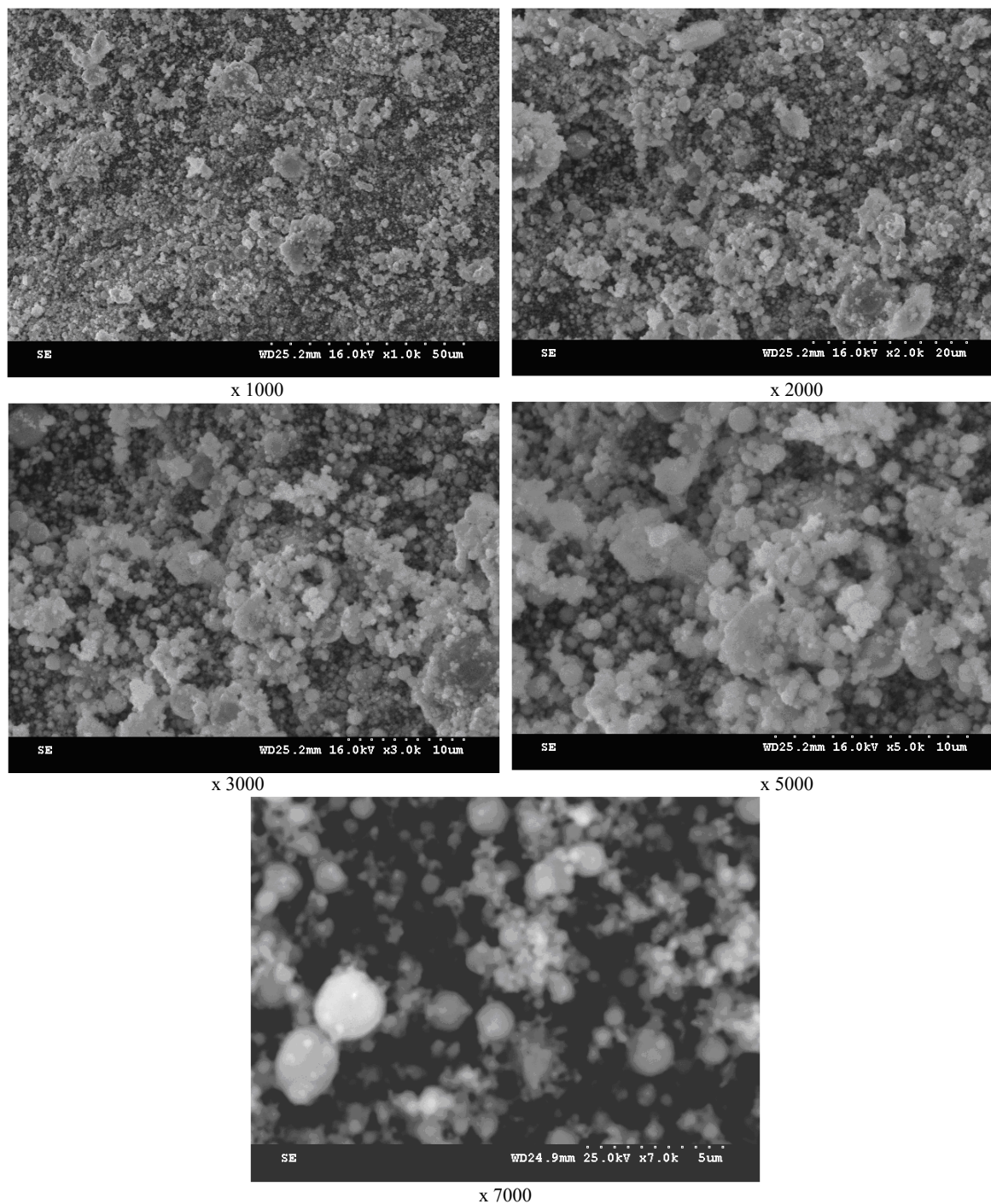


Figura 4.12. Imagini de microscopie electronică cu baleiaj pentru praful de oțelărie TMK Reșița

Spectrul de raze X arată faptul că proba analizată de praf de oțelărie conține următoarele elemente: Fe, Zn, Pb, K, Si, Mn, Ca, Cu, Cl și Cr. Fazele posibile de amestec ale oxizilor de Zn și Fe au compozițiile prezentate în tabelul 4.12.

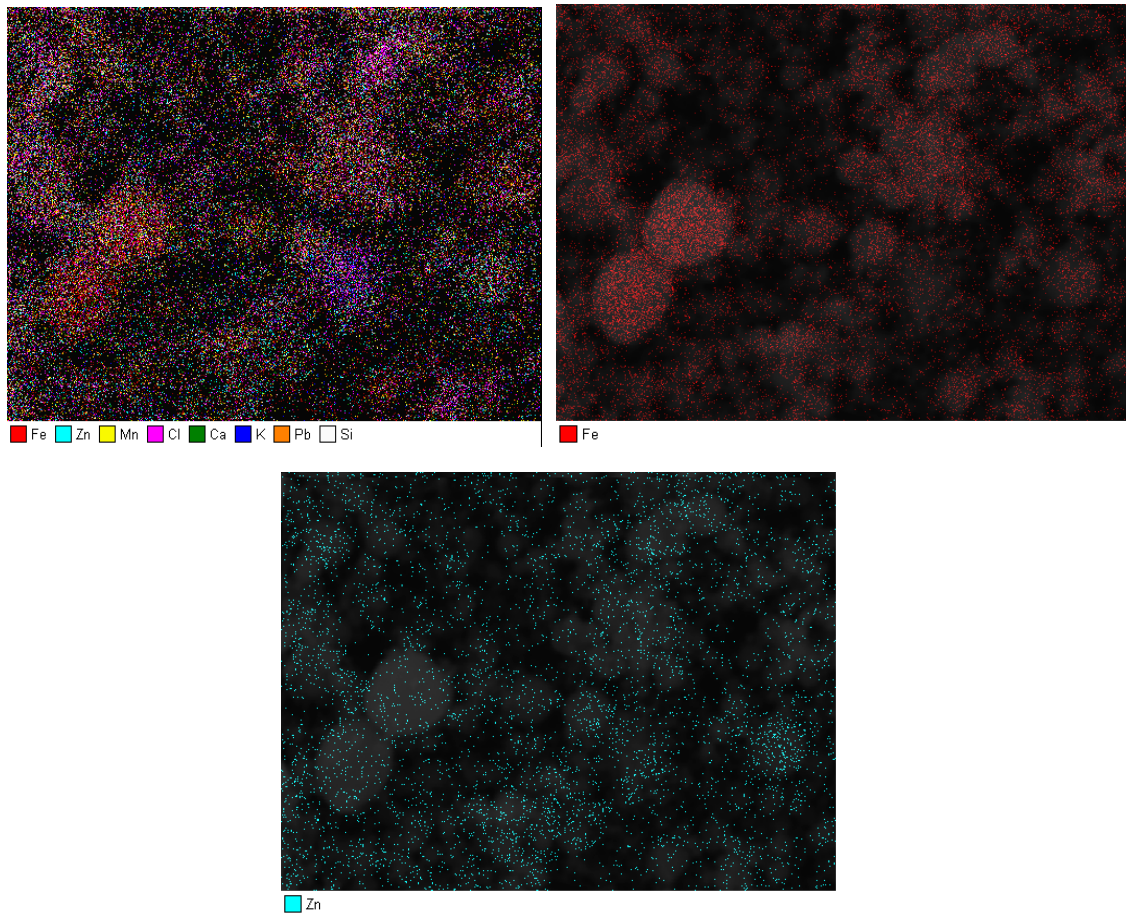


Figura 4.13. Imagini de distribuție de raze X pentru praful de oțelărie de la TMK Reșița

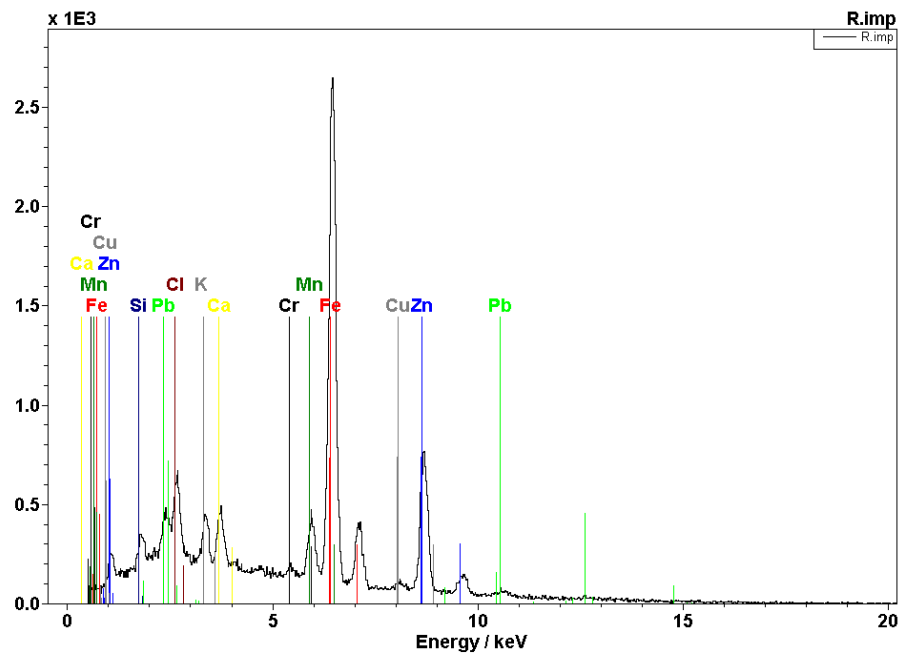


Figura 4.14. Spectrul de raze X dispersiv în energie (EDAX) pentru praful de oțelărie de la TMK Reșița

Tabelul 4.12. Fazele posibile de amestec ale oxizilor de Zn și Fe

Faza	Masa moleculară	Ponderea fazelor	Raportul metalelor
FeO	71,847	100% FeO	-
FeO•ZnO	153,217	53,107%ZnO; 46,893%FeO	Zn/Fe= 1,17 Zincit
ZnO•Fe ₂ O ₃	241,06	33,755%ZnO;66,245%Fe ₂ O ₃	Zn/Fe= 0,585 Franklinit
ZnO•2Fe ₂ O ₃	400,075	20,304% ZnO; 79,696% Fe ₂ O ₃	Zn/Fe= 0,292Spinel
ZnO•Fe ₃ O ₄	312,911	26,004% ZnO; 73,996% Fe ₃ O ₄	Zn/Fe= 0,390
ZnO•2Fe ₃ O ₄	544,492	14,945% ZnO; 85,056% Fe ₃ O ₄	Zn/Fe= 0,195
FeO•ZnO•2(FeO•Fe ₂ O ₃)	616,299	13,203%ZnO; 11,658%FeO; 75,139%Fe ₃ O ₄ ; sau 13,203%ZnO; 34,974%FeO; 52,823%Fe ₂ O ₃ ;	Zn/Fe= 0,167

Comparând rapoartele Zn/Fe putem spune că în cazul prafului de electrofiltru de la SC TMK Reșița SA forma principală mineralogică este Franklinitul.

4.4. Caracterizarea ținderului și a șlamului de ținder

Ținderul are conținutul mare de fier, peste 60-72%, o cantitate scăzută de steril respectiv conținut redus de elemente volatile sau dăunătoare oțelului (Pb, Cu, Sn).

Cantitatea de ținder (dimensiuni de 0,1-50mm și forme variate) rezultată în sectorul laminoare, depinde de tipul laminorului, variind de la 0,8% la laminoarele de profile mici și sârmă până la 2,5% la laminoarele de profile grele.

În tabelul 4.13 se prezintă compoziția chimică a mai multe surse de ținder din siderurgia națională.

Probele de ținder și șlam de ținder au prelevate de la ArcelorMittal Hunedoara. Aceste probe au fost analizate în cadrul laboratorului propriu. Pentru determinarea compoziției chimice s-a utilizat spectrometrul XRF ARL 9400 (THERMO ARL). Datele privind analiza chimică a ținderului supus analizei este prezentat în tabelul 4.14 iar figura 4.15 prezintă distribuția granulometrică.

Tabelul 4.13. Analiza chimică a deșeurilor tip ținder din industria siderurgică [23]

Deșeu feros	Compoziția chimică, [%]							
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe	W	Ulei
Ținder ArcelorMittal Galați – medie	1,76	0,63	0,3	0,99	0,48	72,32	-	-
Ținder ArcelorMittal Galați – LTG 1	0,54	1,11	-	0,80	0,60	72,94	-	-
Ținder ArcelorMittal Galați – LSF	0,38	1,38	-	0,50	0,63	73,87	-	-
Ținder ArcelorMittal Galați – TC 3	0,42	1,11	-	0,50	0,55	74,18	-	-
Ținder ArcelorMittal Galați – LBR	0,61	0,23	0,02	0,12	0,58	68,33	-	-
Ținder ArcelorMittal Galați – Haldă	0,21	0,22	0,01	1,64	0,61	67,45	-	-
Ținder ArcelorMittal Hunedoara - TC	0,46	0,15	-	-	0,86	68,19	-	-
Ținder Oțelinox Târgoviște – determinări proprii	-	-	-	-	-	72,58	1,5	-
Ținder Oțelinox Târgoviște	0,87	0,36	0,11	-	0,80	67,77	-	-
Ținder ArcelorMittal Tubular Products Roman - ținder uleios	0,46	0,15	0,01	-	0,85	68,38	12-15	7-8
Ținder Arcelormittal Tubular Products Roman - ținder uscat	0,41	0,12	-	-	0,87	68,26	-	-
Ținder TENARIS Silcotub Zalău	0,39	1,11	0,79	-	0,51	72,16	-	-

Tabelul 4.14. Analiza chimică a probei de ținder de la ArcelorMittal Hunedoara

Parametru	Metodă utilizată	Unitate măsură	Probă ținder
Fe	XRF (2)	%	71,3
Si	XRF (2)	%	0,58
Ca	XRF (2)	%	0,54
Mn	XRF (2)	%	0,63
Al	XRF (2)	%	0,24
Na	ICP-OES (2)	%	0,06
C	LECO (2)	%	0,42
Lipophilic Compounds	Extraction&gravimetry	%	0,42

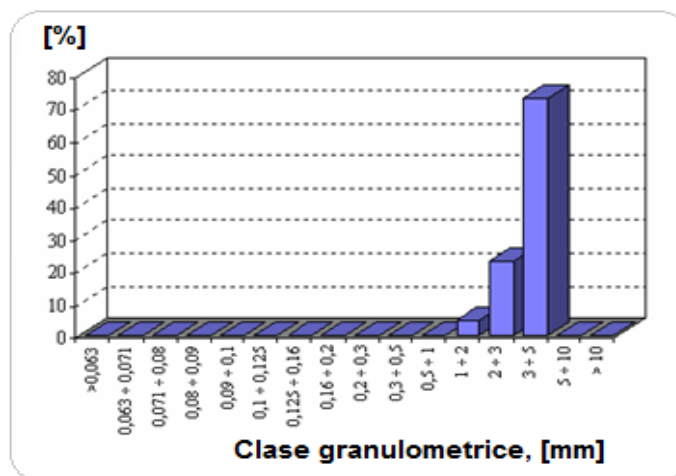


Figura 4.15. Distribuția granulometrică a Țunderului

Probele de Țunder au fost pregătite pentru analizele SEM. Acestea au fost introduse în microscopul electronic cuplat cu un spectrometru cu dispersie după energii de tip EDAX. Rezultatele sunt concretizate prin obținerea unor imagini morfo-compoziționale (electroni secundari) și spectre EDS cu rezultate cantitative adiacente prezentate în figura 4.16. Rezultatele analizei XRD sunt prezentate în figura 4.17.

Compoziția chimică a șlamului de Țunder este prezentată în tabelul 4.15 iar componența granulometrică este prezentată în figura 4.18.

Tabelul 4.15. Compoziția chimică a șlamului de Țunder de la ArcelorMittal Hunedoara

Compoziția chimică, [%]													
Fe	Ca	Si	Mn	Al	Mg	Cl	Na	Cr	Cu	Zn	Ni	Alte el	
91,17	2,04	1,91	1,87	0,77	0,50	0,43	0,37	0,26	0,23	0,11	0,08	0,26	

4.5. Caracterizarea calitativă a șlamului feros

Probele de șlam feros au provenit de la SC Hoeganaes Corporation Europe SA Buzău, societatea are ca obiect de activitate, producerea de pulbere brută de fier și de pulbere redusă. Pentru experimentările în fază de laborator s-au analizat probe din șlamul feros prezentate în figura 4.19.

S-a determinat compoziția chimică și componența granulometrică. Pentru stabilirea claselor granulometrice instalația de laborator utilizată este mașina de sitare vibratoare „Analysette 3” Fritsch cu set complet de site (dimensiuni ale ochiurilor sitelor 450-25 μm). Clasarea probei de șlam s-a efectuat prin refuz. Principiul clasării și instalația de laborator utilizată este prezentată în figura 4.20 iar componența granulometrică rezultată este prezentată în figura 4.21.

Analiza chimică a probelor prelevate este prezentată în tabelul 4.16. Probele de șlam feros au fost analizate în cadrul ICER Univeritatea Politehnica Timișoara cu ajutorul microscopului: LEXT OLS4000 3D Confocal Laser Measuring Microscop. Analiza morfologică și microanaliza chimică calitativă a zonelor probelor sunt prezentate în figurile 4.22-4.26.

Tabelul 4.16. Compoziția chimică a șlamului feros

Compoziția chimică, [%] ASTM E 1479/2016												
Al	Cd	Cu	Cr	Mo	Mn	Ni	Pb	Fe	Sn	Sb	Zn	Alte el
0,003	0,003	0,70	0,54	0,003	0,079	0,046	0,008	84,40	0,016	0,003	0,003	14,196
0,003	0,003	0,05	0,04	0,070	0,180	0,030	0,003	77,09	0,001	0,001	0,030	22,500

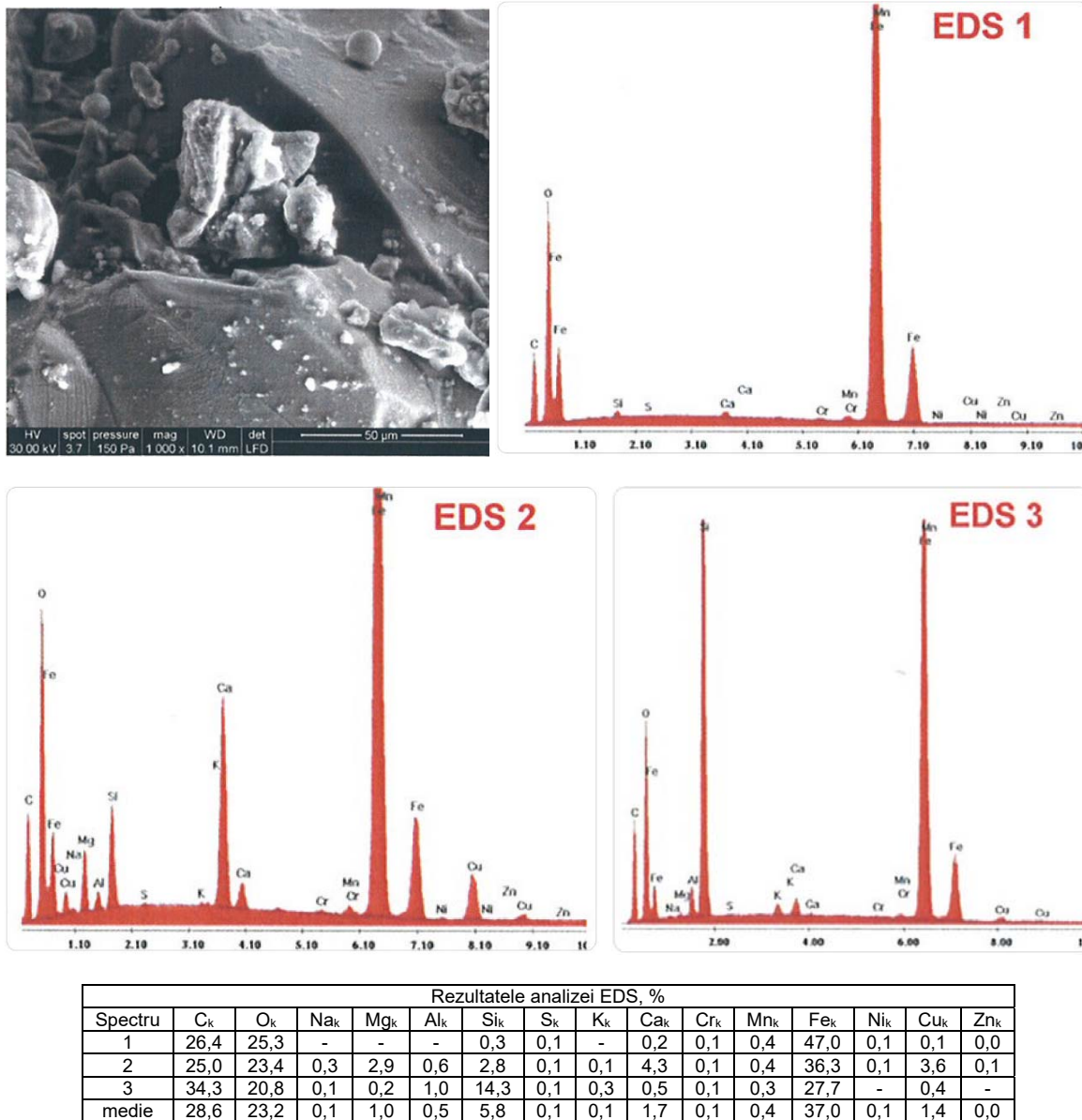


Figura 4.16. Imagini SEM și spectrele EDS pentru proba de țunder ArcelorMittal Hunedoara

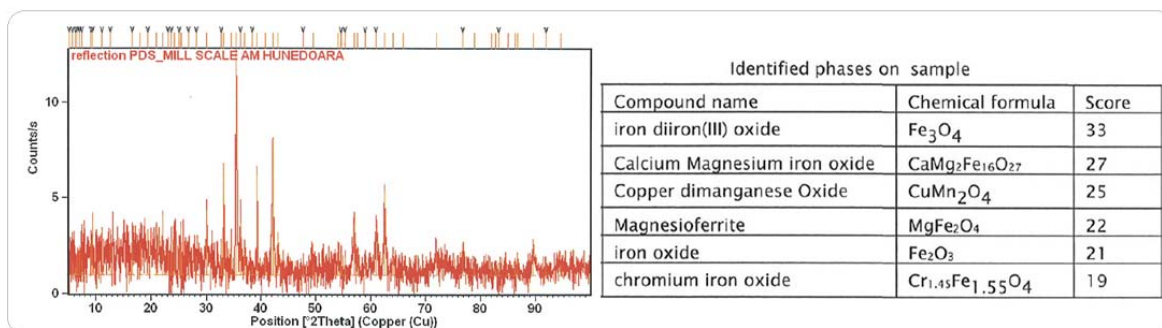


Figura 4.17. Rezultatele analizei XRD pentru proba de țunder ArcelorMittal Hunedoara

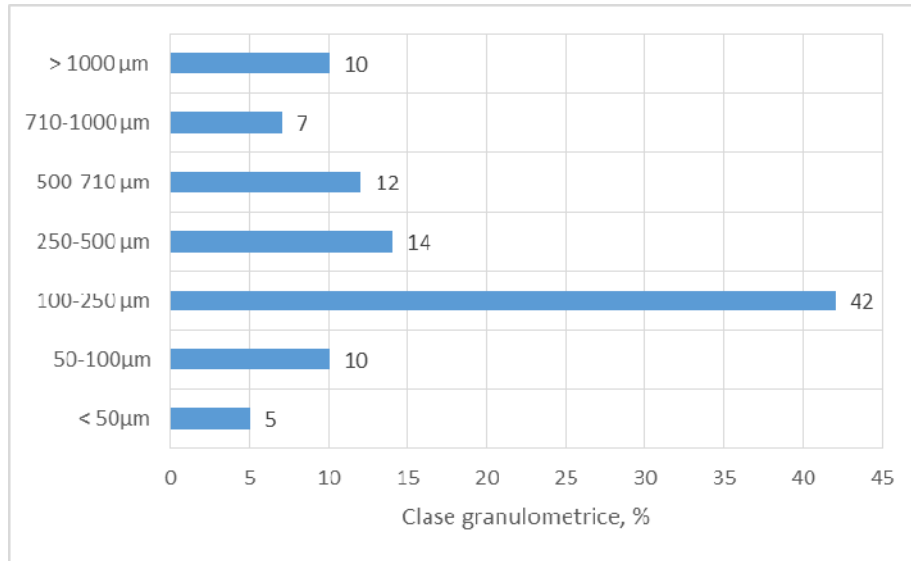


Figura 4.18. Componența granulometrică a șlamului de tunder



Figura 4.19. Probă șlam feros

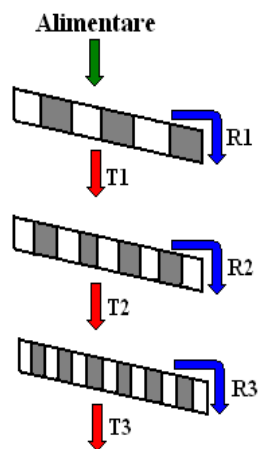


Figura 4.20. Instalația pentru clasarea șlamului feros

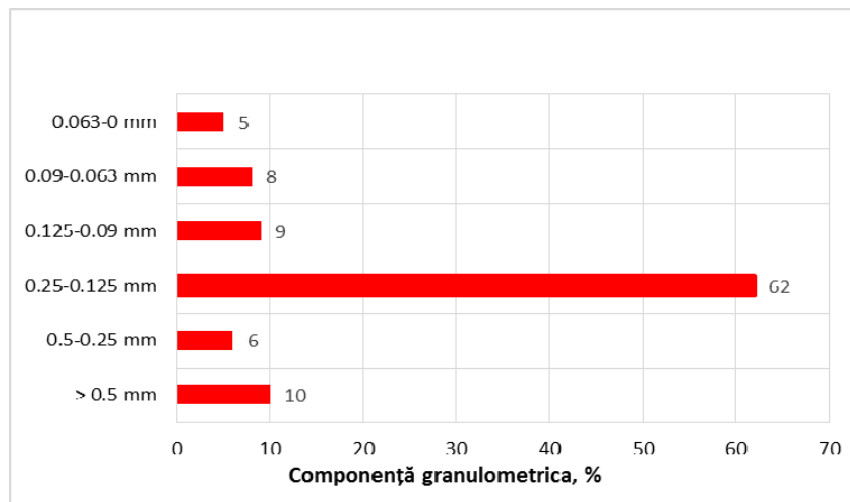


Figura 4.21. Componența granulometrică a șlamului feros [21]

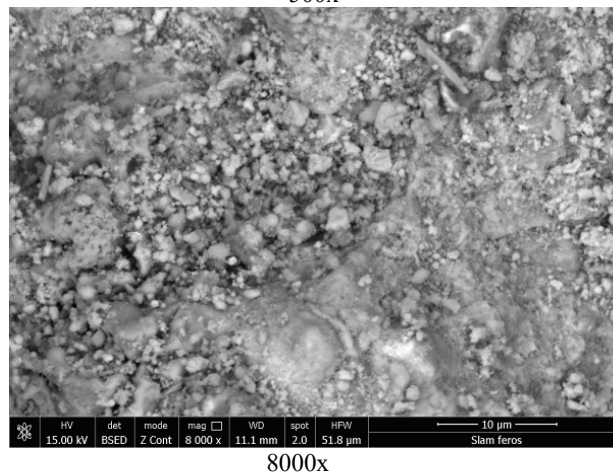
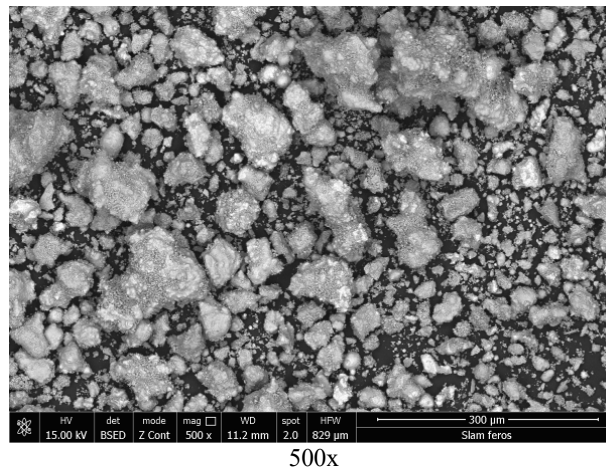
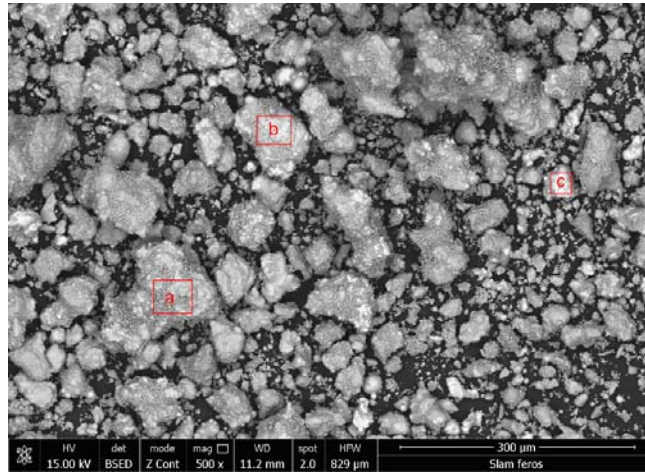


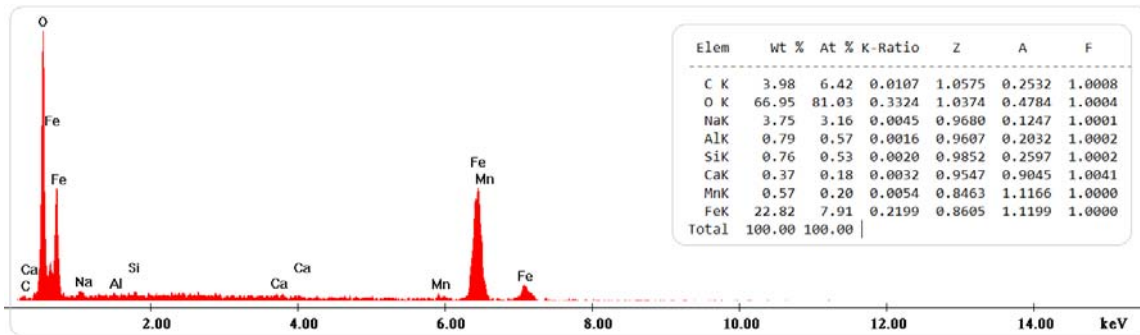
Figura 4.22. Imagini SEM pentru șlamul feros

Analizele prezintă morfologia șlamului feros, aceasta a fost determinată cu microscopia pe bază de electroni. S-au efectuat determinări pentru măririle 250x, 500x și 1000x, iar pentru o analiză mai amănunțită de 4000x și 8000x.

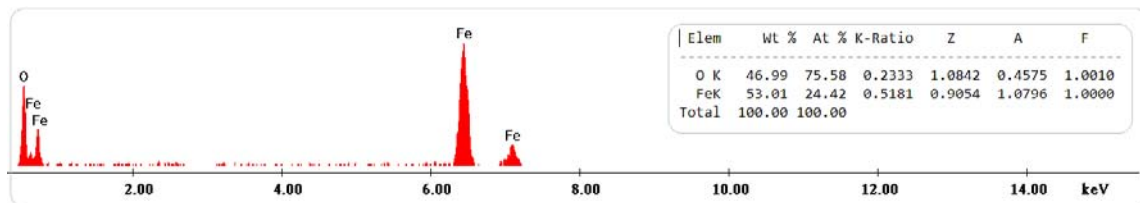
Difracția cu raze X se realizează pe probe aduse în stare granulară cu dimensiunea particulelor cât mai mică.



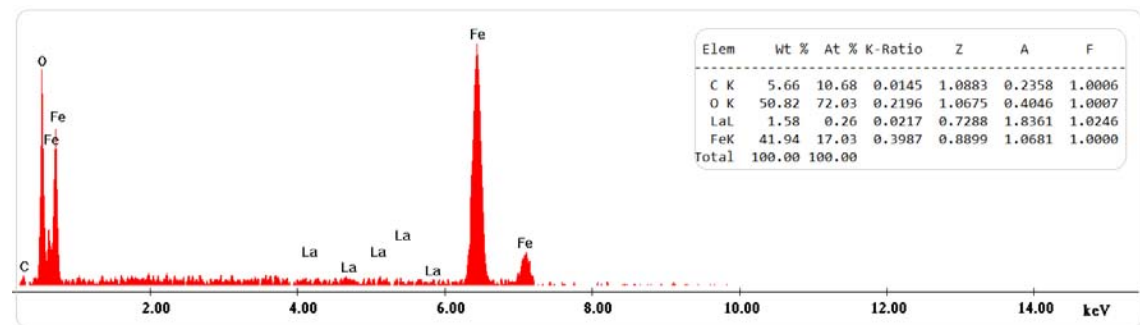
P1, 500x



P1 - a

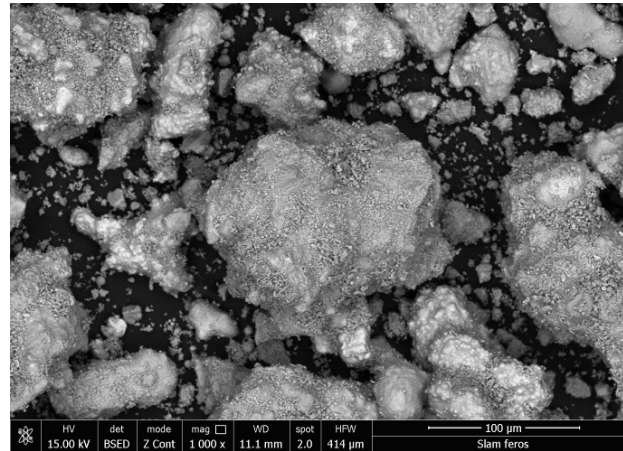


P1 - b



P1 - c

Figura 4.23. Imagini la microscopul electronic și elementele existente - P1 șlam feros



P2, 1000x

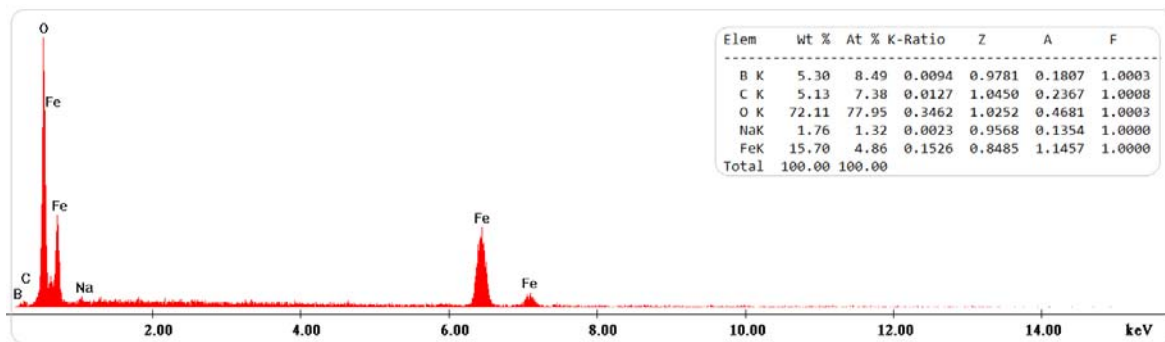
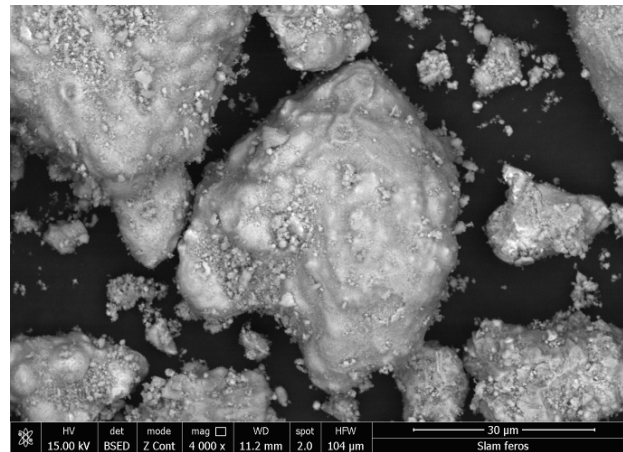


Figura 4.24. Imagini la microscopul electronic și elemente existente – P2 șlam feros



P3, 4000x

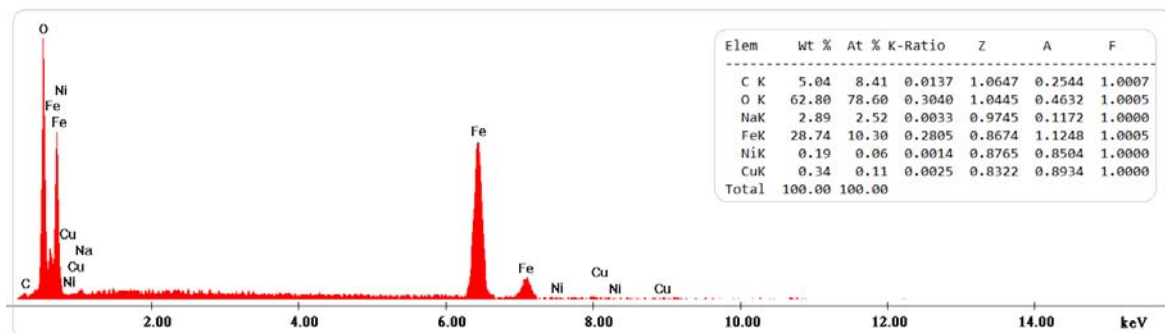
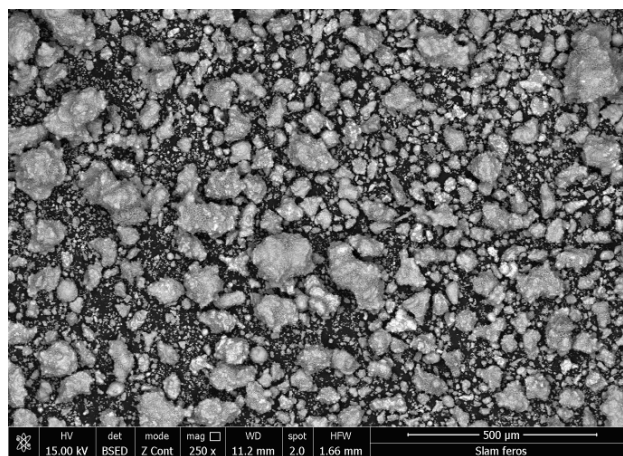


Figura 4.25. Imagini la microscopul electronic și elementele existente – P3 șlam feros



P4, 250x

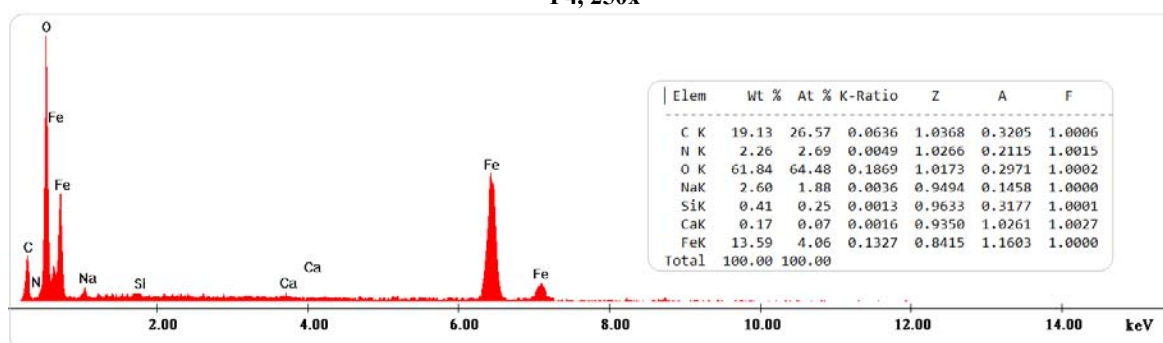


Figura 4.26. Imagini la microscopul electronic și elementele existente – P4 șlam feros

4.6. Caracterizarea zgurii de oțelărie

Zgurile reprezintă aproximativ 70% din deșeurile rezultate în cadrul sectorului siderurgic, de aceea, prelucrarea acestora în scopul obținerii de produse noi, utilizabile în alte ramuri ale economiei naționale, sau reciclarea zgurilor în diverse etape tehnologice din cadrul unui combinat integrat reprezintă o problemă de strategie în politica de protecție a mediului în sectorul siderurgic. Astfel se poate realiza atât o protecție a resurselor naturale, cât și prevenirea poluării solului prin diminuarea accentuată a haldelor de zgură.

Zgurile, specifice proceselor de elaborare a oțelului, indiferent de tipul agregatului de elaborare (convertizor, cuptor electric, cuptor Siemens-Martin) sunt constituite în principal din faze solide și compuși chimici și conțin de asemenea picături reci de metal (stropi solidificați). Aceste zguri sunt caracterizate de temperaturi de topire ridicate, de valori mari ale vâscozității ce variază într-un interval îngust de temperatură determinând astfel solidificarea lor rapidă.

Compoziția mineralogică a zgurii metalurgice este definită de echilibrele termice în sistemul cuaternar CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃, fazele cristaline fiind, în principal, silicații și aluminosilicații de calciu și magneziu. Fazele cristaline principale sunt melilitele, soluții solide, cu izomorfie continuă de gehlenit – akermanit – merwinit, iar fazele minore sunt wolastonitul, silicatul bicalcic, forsteritul, anortitul și sulfurile. Sulfurile și fierul coloidal conferă zgurilor proprietăți reducătoare. Compoziția fazală influențează direct proprietățile tehnice de utilizare ca agregat.

Analiza difracției cu raze X a zgurilor de oțelărie rezultate în procesul tehnologic de elaborare a oțelului permite identificarea componentelor minerale cele mai frecvent întâlnite în probele de zgură, prezentate în tabelul 4.17. Compoziția mineralogică a zgurilor metalurgice (zgură de furnal, zgură de oțelărie și zgura de la tratamentul secundar al oțelului) este definită de echilibrele termice în sistemele prezentate în figura 4.27.

Tabelul 4.17. Componentele minerale a zgurilor de oțelărie

Componente minerale	Formula moleculară
<i>zgură de furnal</i>	
melilit (soluție solidă între akermanit și gehlenit), silicat de calciu-aluminiu-magneziu	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
merwinit, silicat de calciu-magneziu	$\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$
pseudolastonit, silicat de calciu	CaSiO_3
monticelite	CaMgSiO_4
<i>zgura de oțelărie-convertizor</i>	
larnit, beta-dicalcic-silicat	beta- Ca_2SiO_4
srebrodolskit, oxid de calciu-fier	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$
hatrurit, silicat tricalcic	Ca_3SiO_5
spinel	$\text{Me}^{2+} \text{Me}^{3+}_2\text{O}_4$
wustita, soluție solidă de oxid de fier (II) cu MgO și MnO	$(\text{Fe}_{1-x-y}, \text{Mg}_x, \text{Mn}_y) \text{O}_z$
var liber, oxid de calciu	CaO
<i>zgura de oțelărie-cuptor electric</i>	
larnit, beta-dicalcic-silicat	beta- Ca_2SiO_4
srebrodolskit, oxid de calciu-fier	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$
brunilină, oxid de fier-calciu-aluminiu	$\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$
spinel	$\text{Me}^{2+} \text{Me}^{3+}_2\text{O}_4$
wustita, soluție solidă de oxid de fier (II) cu MgO și MnO	$(\text{Fe}_{1-x-y}, \text{Mg}_x, \text{Mn}_y) \text{O}_z$
gehlenit, silicat de calciu-aluminiu	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
bredigit, silicat de calciu-magneziu	$\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2\text{Si}_8\text{O}_{32}$
<i>zgura de oțelărie-cuptor electric-oțel înalt aliat</i>	
silicați de calciu-magneziu (bredigit, merwinit, diopsid)	$\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2\text{Si}_8\text{O}_{32}$, $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
larnit, beta-dicalcic-silicat	beta- Ca_2SiO_4
gamma-silicat dicalcic	gamma- Ca_2SiO_4
cuspidină, fluor-calciu-silicat	$\text{Ca}_4\text{F}_2\text{Si}_2\text{O}_7$
wustita, soluție solidă de oxid de fier (II) cu MgO și MnO	$(\text{Fe}_{1-x-y}, \text{Mg}_x, \text{Mn}_y) \text{O}_z$
periclaz, oxid de magneziu	MgO
spinel	$\text{Me}^{2+} \text{Me}^{3+}_2\text{O}_4$
oxid de calciu-aluminiu	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
melilit (soluție solidă între akermanit și gehlenit), silicat de calciu-aluminiu-magneziu	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
portlandit, hidroxid de calciu	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
calcit, carbonat de calciu	CaCO_3
<i>zgura de oțelărie-tratament secundar oțel</i>	
gamma-silicat dicalcic	gamma- Ca_2SiO_4
larnit, beta-dicalcic-silicat	beta- Ca_2SiO_4
silicați de calciu-magneziu (bredigit, merwinit, diopsid)	$\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2\text{Si}_8\text{O}_{32}$, $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
mayenită, oxid de calciu-aluminiu	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$
cuspidină, fluor-calciu-silicat	$\text{Ca}_4\text{F}_2\text{Si}_2\text{O}_7$
spinel	$\text{Me}^{2+} \text{Me}^{3+}_2\text{O}_4$
var liber, oxid de calciu	CaO
periclaz, oxid de magneziu	MgO
gehlenit, silicat de calciu-aluminiu	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
melilite (soluție solidă între akermanit și gehlenit), silicat de calciu-aluminiu-magneziu	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
srebrodolskit, oxid de calciu-fier	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$
brunilină, oxid de fier-calciu-aluminiu	$\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$
wustita, soluție solidă de oxid de fier (II) cu MgO și MnO	$(\text{Fe}_{1-x-y}, \text{Mg}_x, \text{Mn}_y) \text{O}_z$
hatrurit, silicat tricalcic	Ca_3SiO_5
portlandit, hidroxid de calciu	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
calcit, carbonat de calciu	CaCO_3
brucit, hidroxid de magneziu	$\text{Mg}(\text{OH})_2$

Pentru experimentările în fază de laborator s-au prelevat probe de zgură de pe halda Buituri - Hunedoara. Instalația de procesare a zgurii de oțelărie, prezentată în figura 4.28 are o capacitate de prelucrare a acesteia de 500t/h.



Figura 4.28. Instalația de procesare a zgurii – Halda Buituri

Zgura cu granulația sub 250mm se introduce într-un buncăr de unde este preluat de un alimentator cu bandă prevăzută la capăt cu un tambur magnetic cu diametrul de 1000mm și o lungime activă de 1200mm. Scoarțele de zgura cu dimensiuni mai mari de 250mm vor rămâne pe grătarul instalației și rezultă fracția peste 250mm care se direcționează pentru expediere la uzinele siderurgice. Frația cu granulația sub 250mm se separă magnetic și se clasează rezultând în urma procesării 5 sorturi (figura 4.29): 0-10mm material feros, 10-25mm material feros, 25-50mm material feros 50-250mm material feros și material deferizat. Frația neferoasă este de asemenea procesată, clasată pe sorturi și utilizată în diferite domenii (construcții, industria cimentului, agricultură, etc).

Pentru cercetările efectuate în cadrul laboratorului s-au prelevat probe de material feros: 0-10mm, 10-25mm, 25-50mm și 50-250mm. Frația feroasă cu granulația sub 50mm a fost supusă clasării cu ajutorul ciurului vibrator din cadrul Laboratorului de Baza energetică și de materii prime, clasarea efectuându-se pe site cu ochiuri pătrate (set site 1, 3, 5, 8, 10, 25, 50mm), clasele rezultate fiind prezentate în figura 4.30. Analiza chimică a probelor de zgură cu granulația sub 25mm este prezentată în tabelul 4.18.



Figura 4.29. Sorturi de zgură – Halda Buituri

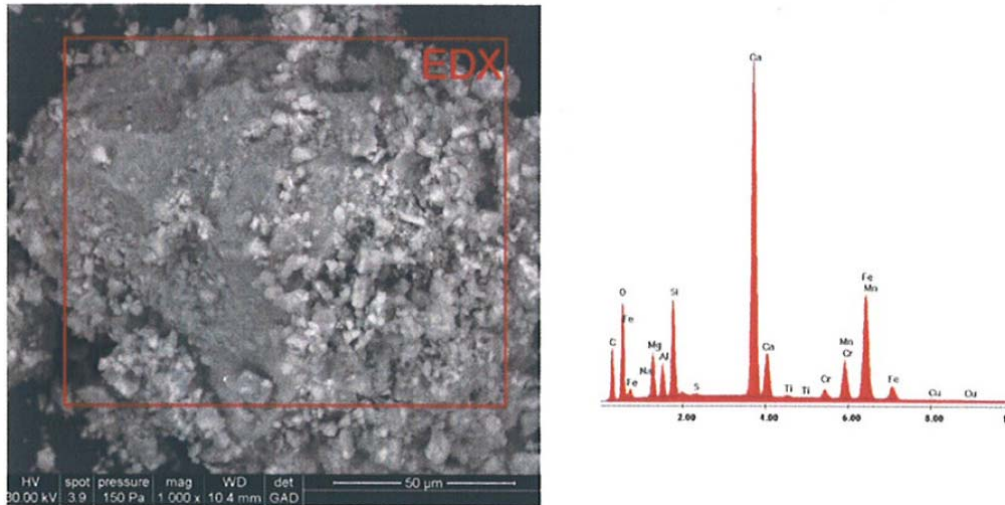
Tabelul 4.18. Compoziția chimică a probelor de zgură de oțelărie - haldă

Nr. probă	Frația granulometrică	Compoziția chimică, [%]										
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe _{metalic}	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	Fe _{total}
1	< 5	18,8	4,4	17,0	13,6	10,6	21,1	5,0	6,7	0,026	0,046	29,8
	5-10	14,8	3,8	14,9	25,0	6,7	18,5	9,8	4,7	0,015	0,040	37,6
	10-25	10,6	3,8	11,5	43,9	5,2	14,9	5,2	3,9	0,009	0,030	52,4
2	< 5	250,1	7,5	19,0	11,5	7,1	22,0	6,7	4,5	0,030	0,050	31,5
	5-10	13,7	4,1	14,8	31,2	6,2	17,3	6,8	4,6	0,008	0,040	45,6
	10-25	12,3	5,8	11,6	37,0	5,7	16,3	6,7	3,5	0,012	0,030	48,4
3	< 5	18,3	7,7	16,5	17,8	5,1	21,0	8,1	5,3	0,015	0,045	36,0
	5-10	14,7	6,1	14,3	21,7	4,4	24,3	5,7	5,5	0,016	0,040	37,0
	10-25	12,7	2,3	12,1	36,2	3,6	17,8	5,9	5,0	0,010	0,070	47,2
4	< 5	16,1	4,7	17,8	17,3	4,8	18,9	10	6,5	0,023	0,042	34,4
	5-10	13,6	1,9	16,4	20,3	4,9	19,5	8,6	5,7	0,013	0,034	42,5
	10-25	12,9	3,2	18,4	31,9	4,1	15,7	6,1	5,3	0,012	0,033	48,0
5	< 5	19,4	6,8	17,7	14,6	6,8	19,8	7,3	5,4	0,027	0,047	28,2
	5-10	15,0	4,8	16,1	26,1	7,3	19,2	5,2	5,9	0,014	0,030	38,8
	10-25	11,3	1,8	18,0	34,0	5,6	17,1	6,0	4,7	0,015	0,030	49,1
6	< 5	18,2	7,1	18,1	15,3	5,5	21,6	6,2	5,9	0,022	0,041	39,8
	5-10	14,6	5,0	15,9	27,4	4,9	18,2	6,5	5,3	0,017	0,035	43,1
	10-25	13,1	4,8	12,2	37,0	5,0	16,0	5,4	4,2	0,014	0,030	49,7
Media	< 5	18,51	6,36	17,66	15,01	6,65	20,73	7,21	5,72	0,024	0,045	33,12
	5-10	14,4	4,28	15,4	25,28	5,73	19,5	7,1	5,2	0,014	0,036	40,76
	10-25	12,15	3,62	13,97	36,67	4,87	16,3	5,88	4,43	0,012	0,032	49,14



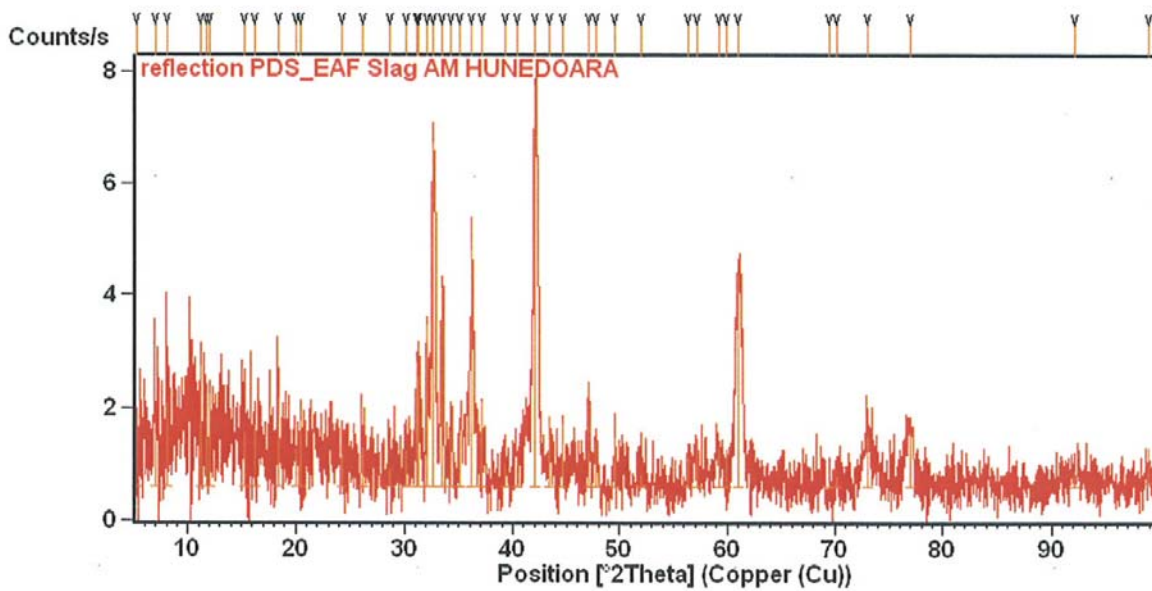
Figure 4.30. Probe de zgură prelevate de pe haldă

În figura 4.31 se prezintă analiza SEM a zgurii de oțelărie de cuptor electric iar în figura 4.32 analiza SEM pentru zgura de tratament secundar (LF).



Results of the EDS analyses wt%

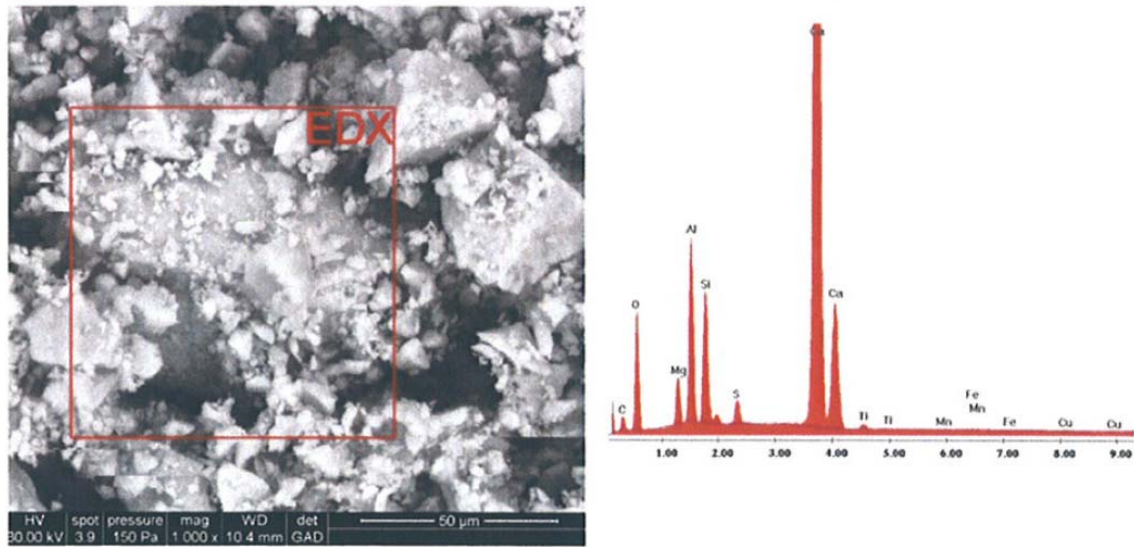
C _k	O _k	Na _k	Mg _k	Al _k	Si _k	S _k	K _k	Ca _k	Ti _k	Cr _k	Mn _k	Fe _k	Cu _k
26.3	26.9	0.1	4.1	2.3	5.7	0.1	/	17.5	0.2	0.8	3.7	12.3	0.2



Identified phases on Sample

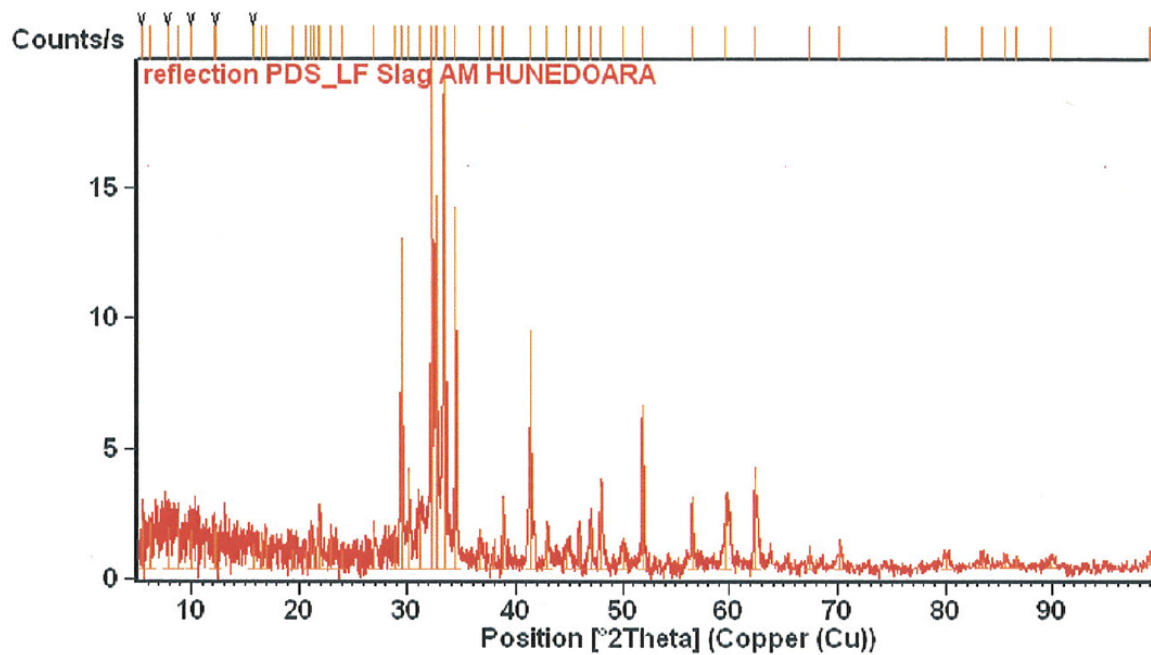
Compound name	Chemical formula	Score
Titanium Carbide	Ti ₈ C ₅	36
Bredigite	Ca _{1.7} Mg _{0.3} SiO ₄	30
Sodium Titanium Oxide	Na _{0.5} Ti ₂ O ₄	16
dicalcium silicate	Ca ₂ (SiO ₄)	16
β-CaCu	CaCu	15

Figura 4.31. Analiza zgurii de oțelărie-cuptor electric
(imagine SEM, analiza și spectrul EDS și identificarea fazelor componente)



Results of the EDS analyses wt%

C _K	O _K	Mg _K	Al _K	Si _K	S _K	Ca _K	Ti _K	Mn _K	Fe _K	Cu _K
6.0	30.9	3.0	8.7	6.2	0.9	43.5	0.4	0.0	0.2	0.2



Identified phases on sample

Compound name	Chemical formula	Score
Calcium Silicate	Ca ₃ SiO ₅	72
Calcium Titanate	CaTiO ₃	39
Aluminium Calcium Oxide	Ca ₃ Al ₂ O ₆	30
merwinite	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	29
Calcium Titanium Manganese Oxide	Ca ₄ TiMn ₂ O _{9.93}	24
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	20

Figura 4.32. Analiza zgurii de oțelărie-tratament secundar

(imagine SEM, analiza și spectrul EDS și identificarea fazelor componente)

4.7. Caracterizarea deșeurilor/sterilului sideritic

Minerul de fier de tip siderită se supune, în practică, operației de prăjire pentru îndepărtarea dioxidului de carbon iar după aceea operației de concentrare magnetică. În timpul operației de prăjire carbonatul de fier se transformă în oxizi de fier astfel încât crește concentrația de fier în minerul prăjit, creștere care se accentuează prin concentrarea magnetică. Concentratul rezultat are un conținut de fier între 49-51% și este utilizat în șarjele de aglomerare. Sterilul rezultat se depozitează în iazuri.

În tabelul 4.19 se prezintă compoziția chimică a deșeurilor sideritice din iazul de decantare Teliuc iar în tabelul 4.20 componența granulometrică.

Tabelul 4.19. Compoziția chimică a deșeurilor sideritice iaz decantare

Proba	Compoziția chimică, [%]								
	Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Alți oxizi
1	10,90	7	7,8	35,02	2,84	16,54	6,68	1,3	22,82
2	11,20	7,25	7,94	34,8	3,04	17,03	6,55	1,42	21,97
3	11,11	7,05	8,04	34,91	3	16,85	7,03	1,38	21,74
4	10,40	6,85	7,24	33,89	2,68	16,57	6,75	1,41	24,61
5	10,16	6,4	7,4	35,22	3,07	17,04	6,9	1,33	22,64
<i>Media</i>	<i>10,75</i>	<i>6,91</i>	<i>7,68</i>	<i>34,77</i>	<i>2,93</i>	<i>16,81</i>	<i>6,78</i>	<i>1,37</i>	<i>22,76</i>

Tabelul 4.20. Compoziția granulometrică a deșeurilor sideritice

Clase granulometrice, [%]						
< 63 μm	63-100 μm	100-250 μm	250-500 μm	500-710 μm	710-1000 μm	> 1000 μm
42,16	21,18	12,48	10,13	6,42	4,29	3,34

4.8. Concluzii

Deșeurile analizate și caracterizate din punct de vedere calitativ, selectate pentru experimentări, provin în majoritate din zonaindustrială Hunedoara, cu excepția șlamului feros și a prafului de oțelărie care provine de la producerea pulberilor metalice - SC Hoeganaes Corporation Europe SA Buzău și a unor probe de praf de oțelărie/praf de convertizor de la TMK Reșița și Oțelul Roșu/Galați.

Pentru experimentărilor în fază de laborator din cadrul tezei s-au analizat următoarele deșeuri feroase mărunte și pulverulente:

- șlam feros;
- șlam de aglomerare-furnale/praf de furnal;
- praf de convertizor/șlam de convertizor;
- praf de oțelărie;
- zgură de oțelărie – fracția feroasă;
- țunder/șlam de țunder;
- deșeu sideritic.

Conținutul de fier (Fe_{tot}), o medie a probelor analizate, este:

- 81,15% la șlamul feros;
- 30,40% la șlamul de aglomerare furnale;
- 54,35%/58,12% la șlamul de convertizor grosier/fin;
- 71,30% la țunder provenit de la ArcelorMittal Hunedoara
- 91,17% la șlamul de țunder provenit de la ArcelorMittal Hunedoara
- 33,12%/ la zgura de oțelărie – fracția feroasă cu granulația sub 5mm
- 40,70% la zgura de oțelărie – fracția feroasă cu granulația 5-10mm
- 49,14% la zgura de oțelărie – fracția feroasă cu granulația 10-25mm
- 29,08% la praful de oțelărie provenit de la ArcelorMittal Hunedoara;
- 43,16% la praful de oțelărie provenit de la TMK Reșița;
- 43,84% la praful de oțelărie provenit de la Oțelul Roșu.

Caracterizarea morfologică și compozițională a deșeurilor pulverulente și mărunte cu conținut de fier s-a efectuat și s-a realizat cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj HITACHI model S-2600N echipat cu spectrometru de raze X dispersiv în energie (EDAX). S-a analizat morfologia tuturor probelor acestea fiind prezentate în imaginile de microscopie electronică cu baleiaj - imagini de electroni secundari respectiv distribuția de raze X.

Compoziția chimică și granulometrică, precum și conținutul de elemente dăunătoare, a deșeurilor analizate permite procesarea acestora prin brichetare/aglomerare/peletizare.

Din analiza efectuată se observă că deșeurile au un conținut ridicat de fier, mai conțin și alte elemente utile în procesul de elaborare a aliajelor feroase, astfel în funcție de caracteristicile calitative ale acestora rezultă posibilitățile de valorificare și se pot alege tehnologiile de procesare optime din punct de vedere tehnologic și economic, cu implicații ecologice.

CAPITOLUL 5

EXPERIMENTĂRI ÎN FAZĂ DE LABORATOR PRIVIND VALORIFICAREA DEȘEURILOR MĂRUNTE ȘI PULVERULENTE CU CONȚINUT DE FIER

În prezent, pe plan mondial se pune în mod deosebit problema valorificării prin reciclare a deșeurilor pulverulente generate în siderurgie, propunându-se conceptul de reciclare integrală a acestora [25]. Permanent se încearcă identificarea și implementarea metodelor celor mai eficiente pentru reținerea tuturor surselor posibile cu conținut de fier în interiorul ciclului producție-utilizare-reciclare în scopul protejării resurselor naturale, a reducerii costurilor și impactului deșeurilor eliminate asupra mediului [20].



Pentru aplicarea conceptelor de dezvoltare durabilă trebuie să se stabilească un echilibru între volumul de materii prime folosite și volumul de deșeuri ce pot fi valorificate, cu efecte pozitive asupra reducerii gradului de poluare. Este necesară acordarea unei atenții deosebite tehnologiilor de procesare a deșeurilor valorificabile, rezultate pe fluxurile curente de fabricație respectiv a celor depozitate. În prezent, problema gestionării deșeurilor prin valorificare reprezintă o prioritate ecologică și economică. Economia circulară stimulează creșterea valorii economice concomitent cu scăderea consumului de resurse naturale. Industria siderurgică este o parte integrantă a economiei globale circulare care promovează deșeurile zero, reducerea cantității de materiale utilizate și încurajează reutilizarea și reciclarea materialelor. Acestea sunt toate avantajele fundamentale ale oțelului. Aspectele legate de economia circulară sunt integrate în cadrul Documentelor de referință privind cele mai bune tehnici disponibile (BREF) de care industria siderurgică trebuie să țină seama [16].

5.1. Instalații și echipamente folosite în cadrul experimentărilor de laborator

Deșeurile, pentru a putea fi procesate, trebuie să urmeze o serie de prelucrări. Subprodusele obținute din procesarea acestora, având în compoziție fier și carbon, și anume aglomerat, pelete și brichete, sunt supuse operațiilor de manipulare și transport. Este necesar ca subprodusele rezultate (peletele, brichetele și aglomeratul) să aibă o anumită rezistență în timpul operațiilor de manipulare și transport, o mărunțire a acestora ar conduce la neîndeplinirea condițiilor de procesare în vederea extragerii fierului.

Pentru experimentările în fază de laborator s-au utilizat instalațiile și echipamentele prezentate în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1. Instalații și echipamente utilizate în cadrul experimentărilor în fază de laborator

Nr. crt.	Denumire/caracteristici	Instalații/echipamente
1.	Balanțe analitice - KERN, max 6000g, d-0,1g - KERN, max 3000g, d-0,01g	
2.	Tobă de omogenizare	

3. **Moara cu bile**

- mărime inițială particulă : < 4mm;
- mărime finală particulă: < 1 μ m
- cantitatea ce poate fi măcinată: max. 220ml;
- număr posturi de măcinare: 1;
- mărime incintă de măcinare: 500ml;
- timp de măcinare reglabil digital in intervalul: 1sec - 99min;

4. **Moara cu rotor ZM200**

- principiul de funcționare : impact si forfecare;
- mărime inițială particula: < 10mm;
- mărime finală particula: < 40 μ m;
- volum probă: 300ml cu caseta standard;
- turație rotor: 6.000 – 18.000rot/min, reglaj continuu;
- viteza periferica rotor: 31 – 93m/s;
- diametrul rotorului: 99mm;
- capacitate: 900ml cu caseta.

5. **Moară Kollergang**

- capacitate de măcinare 50kg/h

6. **Ciur vibrator cu clasare prin refuz**

- număr maxim de site/fracții granulometrice 7/8;
- capacitate de clasare 125kg/h;
- dimensiunile ochiurilor cuprinse în intervalul 1-100mm (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 20, 25, 40, 50, 60, 80, 100mm).

7. **Aparat de sitare Fritsch tip Analysette 3 Spartan**

- nr. maxim de site în funcțiune 6;
- site cu ochiuri cuprinse între 25 -500 μ m (25, 40, 45, 63, 90, 112, 125, 150, 180, 250, 315, 450, 500 μ m);
- instalație curățire site cu ultrasunete.

8. **Prese hidraulice**

- forța de presare maxim 400kN.

9. **Instalație pentru producerea aglomeratului**

- diametru exterior 2700mm;
- diametru interior 2400mm;
- înălțime strat de aglomerare 400mm;
- capacitate 18dm³.



10. **Peletizor tip taler**
- diametru taler 97cm;
 - înălțime taler 9cm;
 - unghi de înclinare 45°;
 - capacitate 66474cm³;
 - rotații/min 8.



11. **Cuptor cu inducție**
- capacitate 10kg;
 - diametru creuzet 97mm;
 - înălțime creuzet 220mm;
 - frecvența curentului 100kHz;
 - puterea transformatorului 150kVA;
 - tensiunea primar 500V;
 - tensiunea în secundar 167V;
 - tensiunea variabilă 100/83/50V;
 - puterea la înaltă frecvență 50kW;
 - durata topirii 50 - 60min.



12. **Etuvă**
- temperatura maximă: 220°C;
 - capacitatea: 20 kg/h.



13. **Cuptor de calcinare Nabertherm model LHT 02/17**
- putere: 3,6kW;
 - temperatură maximă 1200°C.



14. **Cuptor de topire Nabertherm model L15/12/B180**
- putere: 3kW;
 - temperatură maximă 1700°C.



15. **Cuptor cu rezistori**
- putere 220V;
 - intensitate 30A;
 - temperatura maximă: 1100°C;
 - capacitate: 17x12x45cm³.



16. **Cuptor Tamann**
- capacitate 3kg fontă/oțel;
 - tensiune 40V;
 - intensitate 300A;
 - trepte reglare brută 6;
 - trepte reglare fină 8.



17. Mașina universală de încercări mecanice LabTest 6,50

- celulă de forță AST GmbH, KAP-S 50kN;
- testing software;
- set platane compresiune plan paralel;
- set platane compresiune flexibil cu articulație sferică;
- gripuri – bacuri cu striații piramidale



18. Video Microscop metalografic Kruss Optronic

19. Stereo microscop digital zoom 1.3 Mpixel, model 520SZM-D

20. Cameră termoviziune

21. Pirometru optic și termocuple pentru măsurarea temperaturii

22. Spectrometru cu fluorescența de raze X, ADVANT'X, ArcelorMittal Hunedoara

23. Microscop electronic cu baleaj SEM Quanta 250 FEG, ICER Timișoara

24. Microscop electronic cu baleaj Quanta 3D 200i, ICER Timișoara



25. Microscop electronic de transmisie Tecnai G2 F20 X-Twin, ICER Timișoara



Pentru procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente cu conținut de fier se utilizează o serie de operații tehnologice pentru transformarea acestora în bucați (brichete, pelete, aglomerat, lupe, burete de fier).

Schema tehnologică de procesare a deșeurilor feroase pulverulente în vederea valorificării acestora în siderurgie este prezentată în figura 5.1.

Experimentările în fază de laborator efectuate cu privire la procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente s-au efectuat în laboratoarele Facultății de Inginerie Hunedoara – Universitatea Politehnică Timișoara.

Pentru cercetările experimentale s-au utilizat următoarele deșeuri rezultate din industria siderurgică:

- șlam feros;
- șlam de țunder;
- șlam aglomerare-furnale;
- țunder;
- zgură feroasă;
- concentrat de deșeu sideritic;
- praf de oțelărie.

În cazul tehnologiilor de procesare a deșeurilor prin brichetare/aglomerare/peletizare pe lângă deșeurile feroase mărunte și pulverulente utilizate ca și materie primă s-au utilizat o serie de deșeuri prăfoase cu conținut de elemente utile în procesul de elaborare a oțelurilor (praf de var, zgură LF, zgura VD) și diverși lianți (bentonită, ciment).

Alegerea procedurii și tehnologiei de valorificare are în vedere atât caracteristicile deșeurilor, destinația produsului obținut și instalațiile de procesare existente în laborator.

5.2. Procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente prin brichetare

Matrița utilizată pentru obținerea brichetelor experimentale a fost proiectată de domnul dr.ing. Darius Popescu fiind prezentată în figura 5.2 [24]. Brichetele au fost procesate cu ajutorul preseii hidraulice (prezentată în tabelul 5.1). Realizarea matriței, piesele componente și obținerea brichetei este prezentată în figura 5.3. Pentru realizarea brichetelor fluxul tehnologic este următorul: se îmbină placa de bază cu corpul matriței, se umple cu material corpul matriței, se compactează materialul și rezultă produsul finit – bricheta.

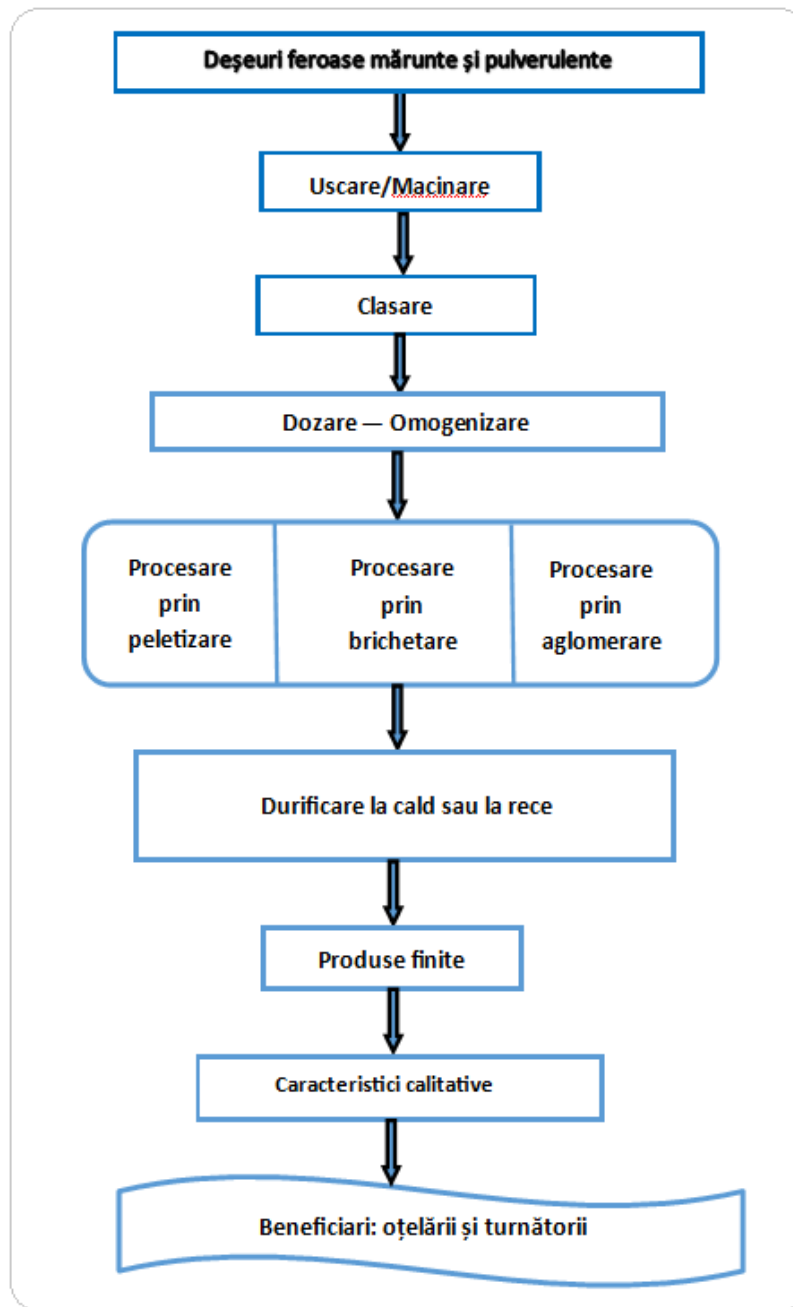


Figura 5.1. Schema tehnologică de procesare a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente rezultate din industria siderurgică

Pentru evaluarea caracteristicilor calitative de rezistență la manipulare și transport ale brichetelor, s-au determinat prin experimentări trei caracteristici tehnologice [23]:

- Rezistența la fisurare:

$$R_f = \frac{F_f}{A}, [N/mm^2] \quad (5.1)$$

unde: F_f – forța de fisurare, [N];

A – aria secțiunii eșantionului (brichetei), [mm²]

În cazul brichetelor studiate, brichete de formă cilindrică, relația este:

$$R_f = \frac{4 \cdot F_f}{\pi \cdot d^2}, [N/mm^2] \quad (5.2)$$



Figura 5.2. Matriță brichete experimentale [24]

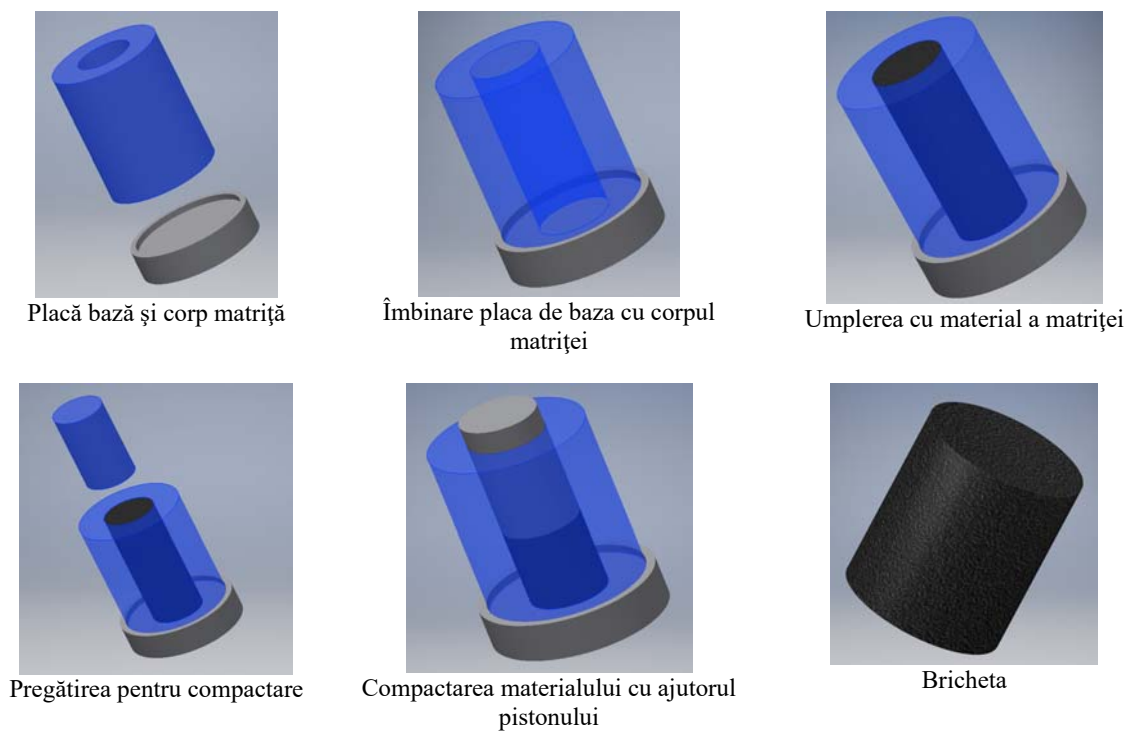


Figura 5.3. Procesare brichetă experimentală [24]

- Rezistența la compresiune:

$$R_s = \frac{F_s}{A}, [N/mm^2] \quad (5.3)$$

unde: F_s – forța de sfărâmare, [N];

A – aria secțiunii eşantionului (brichetei), [mm²]

În cazul brichetelor studiate, brichete de formă cilindrică, relația de mai sus ia forma:

$$R_s = \frac{4 \cdot F_s}{\pi \cdot d^2}, [N/mm^2] \quad (5.4)$$

Pe baza datelor din literatura de specialitate și a observațiilor preliminare am considerat că forța de sfărâmare să fie cea înregistrată la $\tau = 12$ secunde.

- Intervalul de sfărâmare:

$$I_s = R_s - R_f, [N/mm^2] \quad (5.5)$$

În ceea ce privește posibilitatea de utilizare prin reciclare, orice cercetare trebuie să relaționeze la valorile admisibile pentru rezistențele menționate mai sus.

Tehnologia experimentală de valorificare a deșeurilor sub formă de brichete:

- Aprovizionarea cu materii prime și auxiliare (deșeuri feroase mărunte și pulverulente);
- Determinarea compoziției chimice și granulometrice pe lotul de materiale supus procesării;
- Se dozează materialele conform rețetei stabilite, pentru o greutate a șarjei de brichetare de 2kg;
- Proporțiile de deșeuri sunt stabilite în rețetele considerate optime, respectarea acestor proporții fiind obligatorie pentru a se obține brichete cu caracteristici calitative corespunzătoare;
- Ca liant se utilizează cimentul, bentonită și/sau zgură LF;
- După dozare, materialele sunt introduse în toba de omogenizare, timpul pentru această operație fiind de 10minute;
- După omogenizare, materialul se introduce în instalația de brichetare (presa hidraulică);
- Durata operației de brichetare este de 10minute;
- După terminarea operației de brichetare, brichetele necorespunzătoare sunt reintroduse în circuit, iar cele corespunzătoare calitativ (fără fisuri, crăpături, etc) vor fi supuse durificării;
- Pentru brichetele cu ciment - Durificarea la rece se face prin menținere în aer timp de 8-14 zile în funcție de temperatura aerului;
- Durificarea la cald se face în cuptoarele de calcinare după un grafic stabilit pentru fiecare lot de brichete;
- După durificare, brichetele sunt supuse operației de control de calitate, cele corespunzătoare fiind supuse determinării caracteristicilor calitative, iar celelalte reintroduse în procesul de brichetare;
- La fiecare lot de brichete se va determina: compoziția chimică, rezistența la fisurare, rezistența la compresiune și intervalul de sfărâmare

5.2.1. Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea șlamului feros sub formă de brichete

În vederea valorificării șlamului feros s-a ales varianta de procesare prin brichetare, cu și fără adaos de lianți, brichetele obținute având ca destinație - materie primă în cuptoarele de elaborare a oțelului [47-49].

S-au experimentat și obținut brichete după 10 rețete, componența rețetelor experimentale fiind prezentată în tabelul 5.2. Fluxul tehnologic de procesare a brichetelor este prezentat în figura 5.4. Ca și liant s-a utilizat: bentonită (5-10%), ciment (5-10%) și zgură de LF (5-10%).

Umezirea șarjei s-a efectuat cu apă (10-14%). Componența rețetelor experimentale se prezintă în figura 5.5.

Brichetele experimentale la care s-a utilizat ca și liant bentonită sau zgura LF au fost supuse durificării în cuptor, conform diagramei din figura 5.6. Brichetele experimentale la care s-a utilizat ca și liant ciment au fost supuse durificării la rece timp de 8-14 zile.

Aspectele din timpul procesării șlamului feros sub formă de brichete sunt prezentate în figura 5.7 și în Anexa 2. Compoziția chimică medie a brichetelor obținute este prezentată în tabelul 5.3.

Tabelul 5.2. Componența rețetelor

Componenți [%]	Rețete									
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
Șlam feros	100	95	95	95	90	90	90	90	90	90
Bentonita	0	5	0	0	10	0	0	5	5	0
Ciment	0	0	5	0	0	10	0	0	5	5
Zgură LF	0	0	0	5	0	0	10	5	0	5

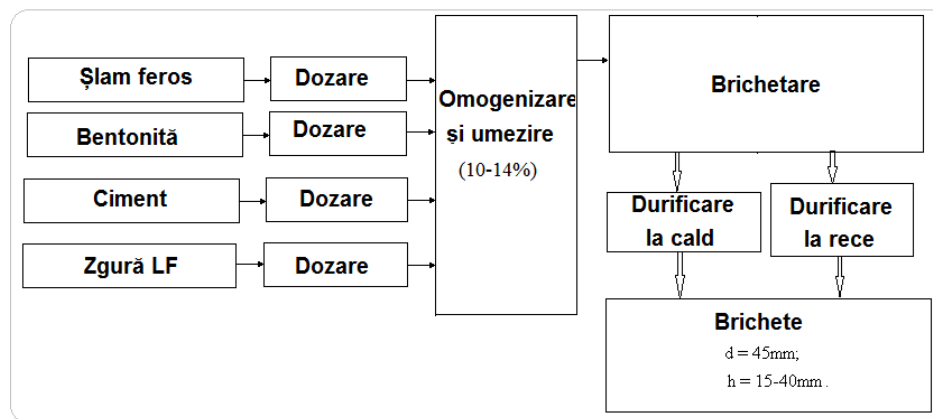


Figura 5.4. Fluxul tehnologic de producere a brichetelor

Tabelul 5.3. Compoziția chimică medie a brichetelor experimentale

Compoziția chimică, [%]													
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	ZnO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	MoO ₃	Cr ₂ O ₃	Alți ox.
59,51	85,09	9,60	0,80	1,85	0,78	0,25	0,33	0,44	0,15	0,18	0,06	0,05	0,42

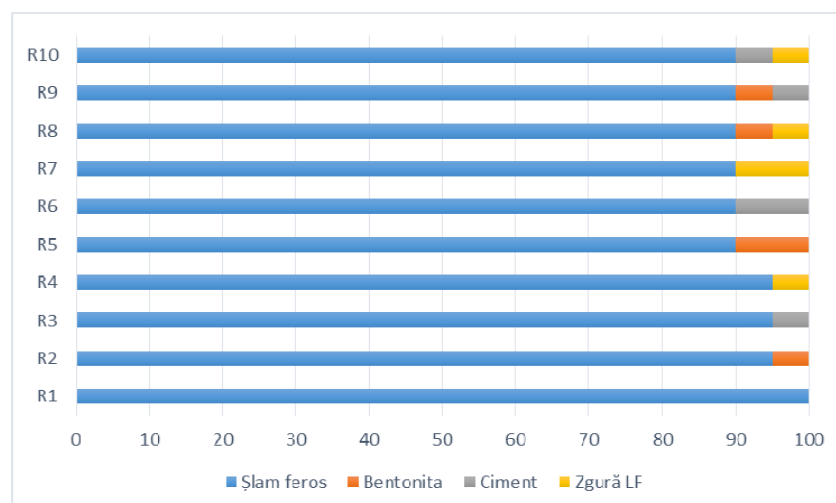


Figura 5.5. Componența rețetelor experimentale

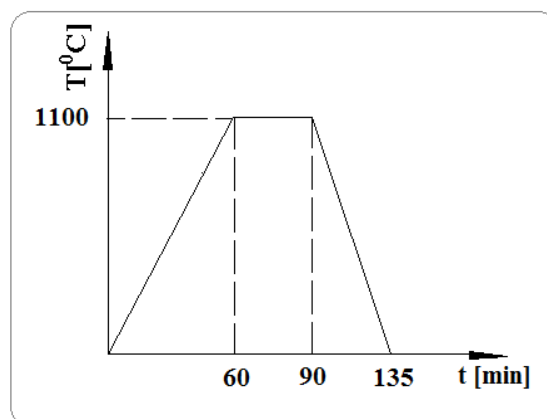


Figura 5.6. Diagrama de durificare a brichetelor în funcție de timp

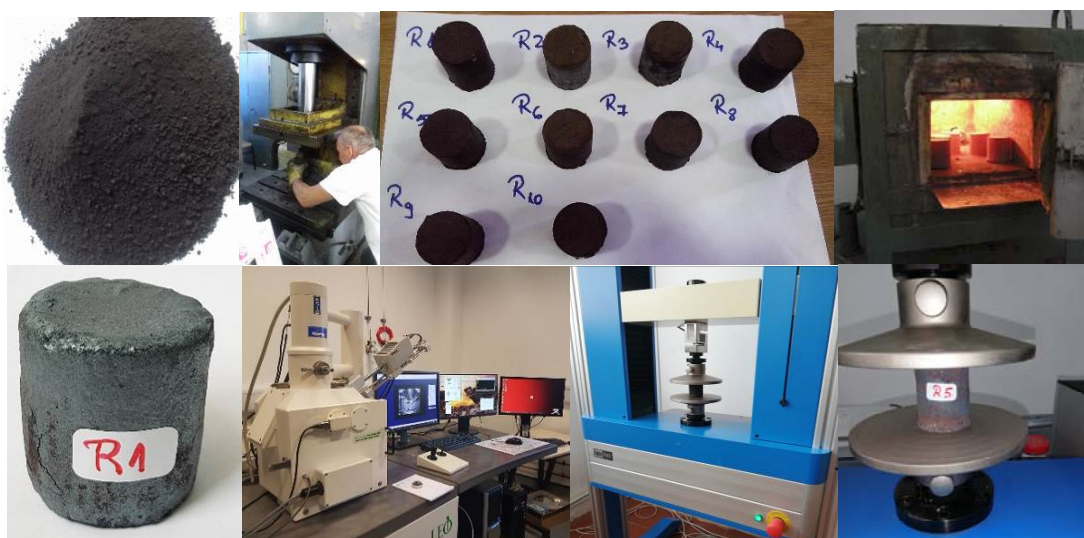


Figura 5.7. Aspecte din timpul experimentărilor și testelor [47,48]

Brichetele experimentale au fost supuse determinărilor calitative. În tabelul 5.4 se prezintă brichetele experimentale după durificare (la cald/la rece) și imaginile acestora determinate la stereomicroscop.


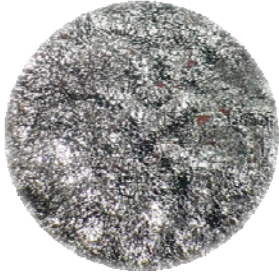



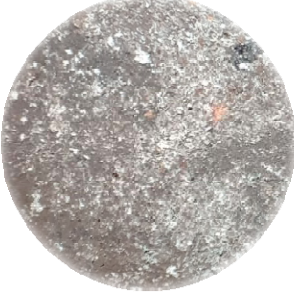




Încercarea la compresiune s-a efectuat pe mașina universală de încercări mecanice LabTest 6,50 prevăzută cu o celulă de forță ASTGmbH, KAP-S 50kN, testing software și un set de platane compresiune plan paralel. Rezultatele testelor sunt prezentate în Anexa 3.

S-au obținut valori medii de $2,7\text{N/mm}^2$ pentru rezistența la fisurare, $6,5\text{N/mm}^2$ pentru rezistența la sfărâmare respectiv $3,8\text{N/mm}^2$ pentru intervalul de sfărâmare în cazul brichetelor durificate la rece și valori medii de $4,5\text{N/mm}^2$ pentru rezistența la fisurare, $11,5\text{N/mm}^2$ pentru rezistența la sfărâmare respectiv $7,0\text{N/mm}^2$ pentru intervalul de sfărâmare la brichetele durificate la cald.

Brichetele experimentale obținute au un conținut de fier de 59-72%Fe.

Analiza morfologică și microscopică s-a efectuat în laboratorul Universității Brunel din Londra în cadrul unei colaborări cu doamna dr.ing. Adela Todoruț (cas.Măeraș) [47]. Rezultatele obținute pe probele prelevate din brichetele experimentale (R1), analizate prin EDS, sunt prezentate în figura 5.8. Acestea sunt destinate utilizării ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptoarele electrice cu arc.

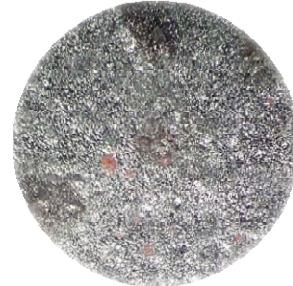
Tabelul.5.4. Brichete experimentale/imagini stereomicroscop [49]

Rețeta	Bricheta experimentală	Imagine stereomicroscop brichetă experimentală
R1		
R2		
R3		
R4		
R5		

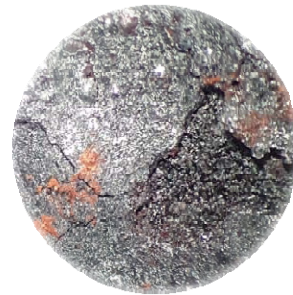
R6



R7



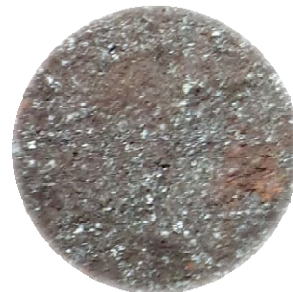
R8



R9



R10



Pentru a determina posibilitățile de recuperare a fierului și a altor elemente însoțitoare în procesul de elaborare a oțelului, în continuare s-au efectuat experimentări cu brichetele rezultate la elaborarea două șarje de oțel. Experimentările s-au efectuat la cuptorul cu inducție,

efectuându-se două topiri (câte una pentru fiecare lot de brichete durificate la cald respectiv la rece). Cuptorul cu inducție are o capacitate 10kg (fontă/oțel), are volumul creuzetului de 1,5dm³ și căptușeală bazică (magnezită). În cadrul experimentărilor pentru formarea băii metalice s-au utilizat deșeuri de oțel în cantitate de 4,5kg șarjă și 3,5kg brichete experimentale/șarjă, iar pentru corecția compoziției chimice a zgurii un adaos format din: 0,30kg var/șarjă, 0,15kg bentonită/șarjă și 0,15kg fluorură (amestec care asigură o temperatură de topire a zgurii relativ scăzută, ceea ce este de importanță deosebită pentru cuptorul cu inducție). S-au încărcat în prima fază în cuptor deșeurile din oțel și când acestea au fost topite s-a încălzit baia timp de 5min, după care s-a prelevat probă de oțel pentru determinarea compoziției chimice (tabelul 5.5). În continuare s-au adăugat brichetele experimentale și adaosurile pentru formarea și corecția compoziției chimice a zgurii. Adaosurile de brichete și materiale pentru formarea și corecția compoziției chimice a zgurii. Adaosurile de brichete și materiale pentru formarea și corecția compoziției chimice a zgurii s-au efectuat pe măsura topirii lor. Încărcătura din oțel fiind curată, practic cantitatea de zgură rezultată este redusă (după terminarea topirii oțelului în medie s-a extras în medie 170g de zgură). Când s-a apreciat că topirea este terminată, s-a măsurat temperatura și s-a prelevat probă din topitura metalică pentru determinarea compoziției chimice (tabelul 5.6).

Tabelul 5.5. Compoziția chimică a oțelului la topire

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,46	0,63	0,32	0,042	0,034	98,52
2	0,45	0,65	0,29	0,033	0,031	98,55

De menționat că toate materialele înainte de încărcarea în cuptor au fost cântărite. După terminarea topirii întregii încărcături s-a menținut topitura în cuptor 5 minute pentru omogenizare termică și pentru fluidificarea zgurii, după care atât topitura metalică cât și zgura s-au toarnat în "cochile" de grafit. După răcire acestea au fost cântărite, împreună cu zgura extrasă, în vederea efectuării bilanțului de materiale (tabelul 5. 6) și de asemenea s-a determinat compoziția chimică a oțelului (tabelul 5.7) și a zgurii (tabelul 5.8). Pe baza compozițiilor chimice a oțelului și a zgurii s-a determinat gradul de recuperare a fierului (tabelul 5.9).

În continuare, se prezintă bilanțul încărcăturii și rezultatele analizelor de laborator, referitoare la probele finale de oțel și zgură, precum și a calculelor tehnologice.

Tabelul 5.6. Bilanțul încărcăturii

Nr crt	Încărcătura, [kg]					Topituri, [kg]				Gaze, praf, [kg]	
	Deșeu oțel	Brichete exp.	Adaos 1	Adaos 2	Total	Oțel 1	Zgură 1	Oțel 2	Zgură 2		Total topitura
1	4,55	3,53	0,62	0,11	8,81	4,35	0,20	6,86	1,48	8,62	0,27
2	4,55	3,55	0,65	0,12	8,84	4,32	0,20	6,88	1,51	8,59	0,25

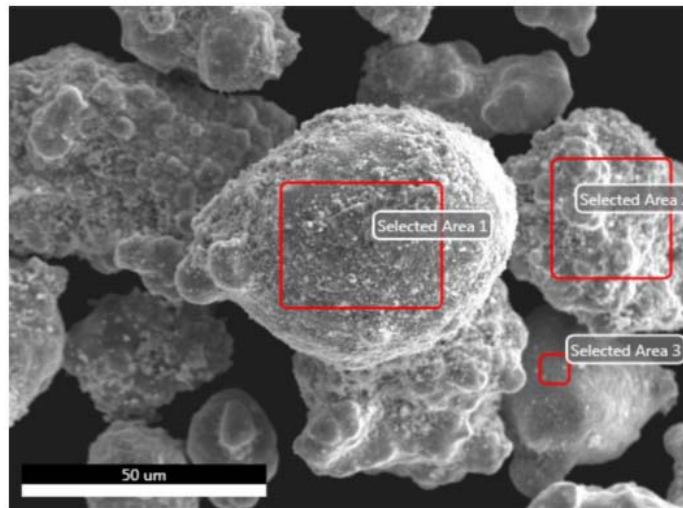
Adaos 1: var + fluorină+bauxită; Adaos 2: siliciomangan+aluminii; Total topitura: oțel 2+zgura 1 + zgura 2.

Tabelul 5.7. Compoziția chimică a oțelului

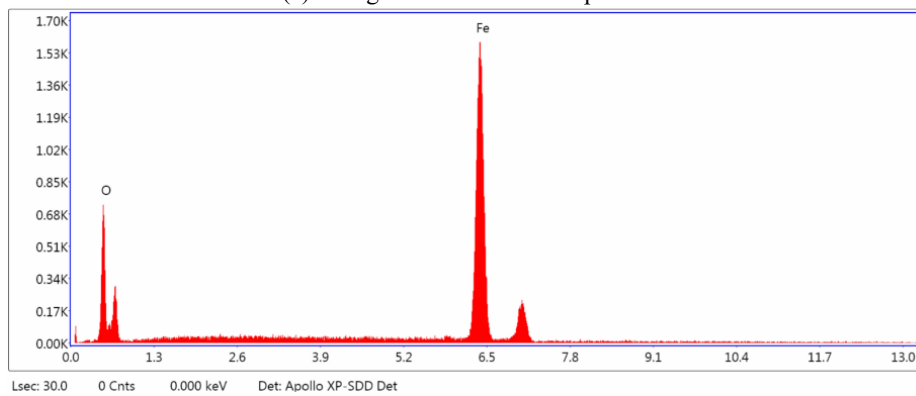
Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,48	0,62	0,31	0,044	0,035	98,52
2	0,47	0,72	0,29	0,040	0,033	98,44

Tabelul 5.8. Compoziția chimică a zgurii

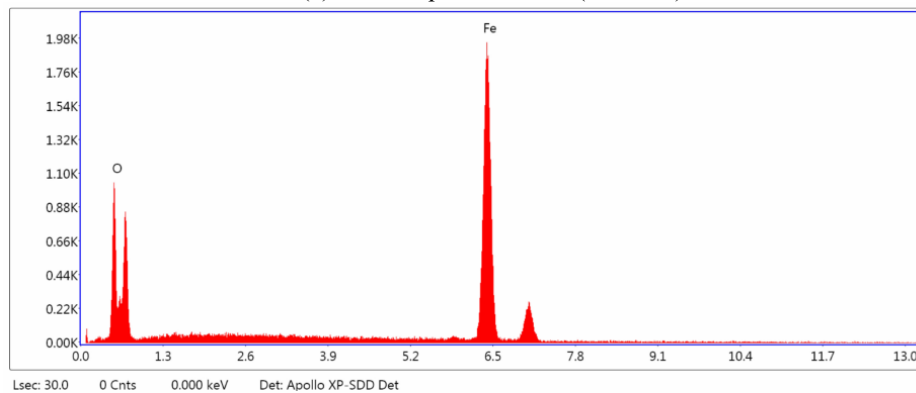
Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]										CaO/SiO ₂
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S		
1	51,40	22,46	8,43	7,01	4,20	2,53	0,84	2,22	1,01		2,29
2	51,75	21,58	8,40	7,09	4,89	2,20	0,83	2,16	1,09		2,21



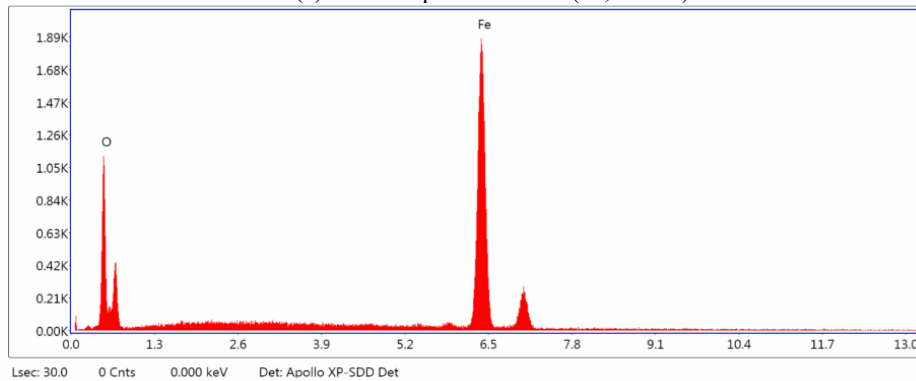
(a) Imagine SEM bricheta experimentală



(b) EDS – spectrul zona 1 (65,6%Fe)



(c) EDS – spectrul zona 2 (62,24%Fe)



(d) EDS – spectrul zona 3 (59,92%Fe)

Figura 5.8. Analiza EDS pentru bricheta experimentală R1 [47]

Tabelul 5.9. Bilanțul fierului

Nr. șarjă	Fier, [kg]					$\eta_{rec.Fe}$, [%]
	Fe ₁	Fe ₂	Fe ₂ – Fe ₁	Fe brichete	Fe zgură	
1	4,49	6,76	2,27	2,32	0,028	97,85
2	4,48	6,77	2,29	2,35	0,027	98,00

Fe₁: Cantitatea de fier din oțel înaintea adaosului de brichete experimentale;

Fe₂: Cantitatea de fier din oțel după adaosul de brichete.

Gradul de recuperare a fierului din brichete se determină cu relația:

$$\eta_{recFe} = \frac{Fe_2 - Fe_1}{Fe_{brichete}} \cdot 100, [\%] \quad (5.6)$$

unde:

$\eta_{rec.Fe}$ - gradul de recuperare a fierului din brichete;

Fe₁- cantitatea de fier din oțel înaintea adaosului de brichete;

Fe₂- cantitatea de fier din oțel după adaosul de brichete experimentale.

Din datele prezentate mai sus, rezultă că brichetele experimentale produse din deșeuri pulverulente cu conținut de fier, prin ardere pot fi metalizate, ceea ce permite utilizarea acestora ca și component în încărcătura cuptoarelor pentru elaborarea oțelurilor.

În urma experimentărilor preliminare de procesare a șlamului feros și a analizei tehnologice a rezultatelor obținute s-au constatat următoarele:

- brichetele experimentale produse din deșeuri pulverulente cu conținut de fier și durificate prin ardere, pot fi metalizate, ceea ce permite utilizarea acestora ca și component metalic în încărcătura cuptoarelor cu arc aelectric pentru elaborarea oțelurilor;
- compoziția chimică și granulometrică a șlamului feros asigură condiții favorabile valorificării acestuia prin brichetare;
- șlamul feros poate fi brichetat fără liant sau doar cu adaosuri minime de liant, fără a mai fi utilizate alte materii prime, ceea ce face ca procedeul experimental să poate fi implementat de firmele care procesează și reciclează deșeuri de acest tip, cu costuri minime;
- liantul utilizat în procesul de brichetare a fost zgura LF, un deșeu pulverulent rezultat la tratamentul secundar al oțelului în industria siderurgică;
- valorile obținute pentru rezistența la fisurare, sfărâmare și intervalul de sfărâmare conduc la concluzia ca acestea rezistă bine în condiții de manipulare și transport.

Brichetele experimentale obținute sunt destinate utilizării ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptoarele cu arc electric (în mod deosebit cele de tip EBT) și au un conținut de fier de 59-72%. Este necesar să se intensifice procesul de valorificare a acestor deșeuri din considerente economice, tehnologice și ecologice.

5.2.2. Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea țunderului sub formă de brichete

Pentru testările în fază de laborator s-au utilizat două sorturi de țunder (uleios și normal), cu compoziția chimică prezentată în tabelul 5.10. Țunderul uleios înainte de utilizare a fost supus operației de ardere timp de o oră în cuptor de calcinare la temperatura de 250°C, timp în care au fost degajate o serie de noxe, din uleiurile conținute de deșeu.

Tabelul 5.10. Compoziția chimică a deșeurilor supuse experimentărilor

Deșeu	Compoziția chimică, [%]		
	țunder	Fe	umiditate
Țunder uleios (țunder A)	67,18	44,67	19,43
Țunder normal (țunder B)	96,37	83,76	2,46

Fluxul tehnologic de procesare a Țunderului sub formă de brichete este prezentat în figura 5.9. Experimentările s-au efectuat în prezența diferitelor adaosuri: șlam de aglomerare furnale, deșeu sideritic iar ca și lianți s-a utilizat ciment și var. Brichetele obținute au avut formă cilindrică, cu diametrul de 40 mm și înălțimea de 40-60 mm. Experimentările s-au efectuat pe un număr de 4 loturi, în cadrul fiecărui lot fiind produse brichete după un număr de 12 rețete. Materia primă (materia feroasă) de bază o constituie Țunderul, ponderea acestuia din materialul feros variind între 55-100% [57]. De menționat că pe lângă Țunder au fost utilizate și deșeuri feroase pulverulente, pentru a asigura o mai bună legătură între particulele de Țunder. În calitate de liant s-a utilizat ciment pentru două loturi și var pentru celelalte două loturi.

În tabelul 5.11 este prezentată compunerea rețetelor.

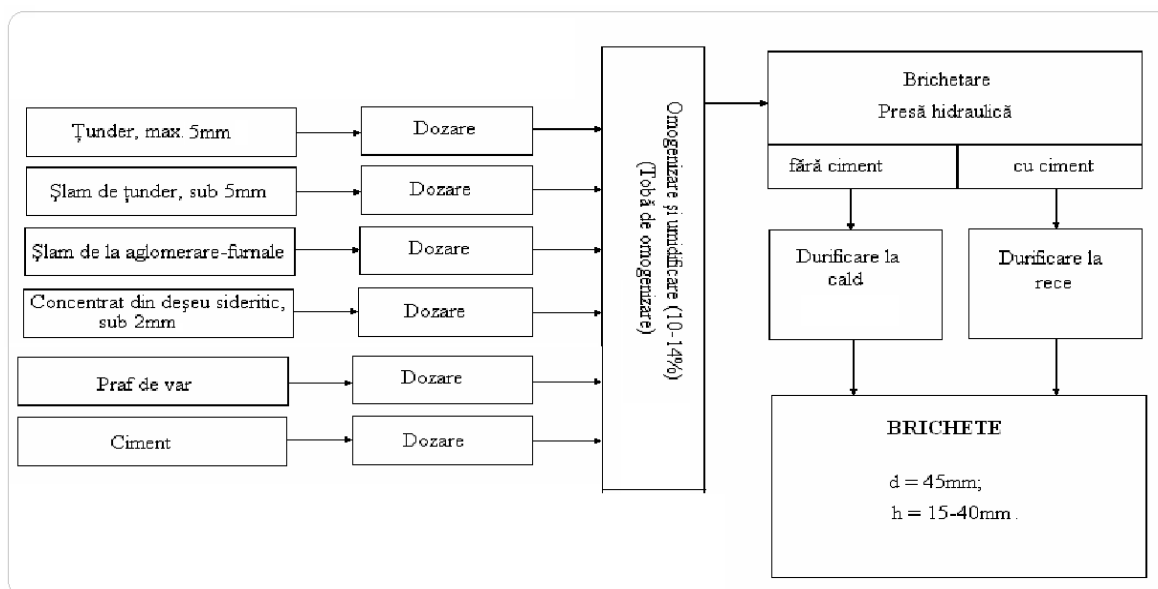


Figura 5.9. Fluxul tehnologic de prelucrare a materialelor componente din șarja de brichetare

În figura 5.10 sunt prezentate exemple de brichete rezultate.



Figura 5.10. Loturile experimentale de brichete

Brichetele în componența cărora pentru liere s-a utilizat praf de var au fost supuse unui proces de durificare prin uscare într-o etuvă la 220°C și menținute timp de 1 oră.

De asemenea, brichetele în componența cărora s-a utilizat ciment au fost durificate în aer timp de 7 zile.

Ulterior, pentru toate loturile experimentale a fost determinată rezistența la fisurare și respectiv rezistența la sfărâmare prin compresiune.

Aspecte din timpul determinărilor sunt prezentate în figura 5.11 iar rezultatele încercărilor sunt prezentate în tabelul 5.12.

Tabelul 5.11. Componența rețetelor experimentale

Component	Componența rețetelor, [%]											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
<i>Lotul 1</i>												
Tunder A	85	0	42	60	0	30	90	0	45	65	0	30
Tunder B	0	85	42	0	60	30	0	90	45	0	65	30
Șlam aglomerare furnale	0	0	0	25	25	25	0	0	0	25	25	30
Ciment	15	15	16	15	15	15	10	10	10	10	10	10
<i>Lotul 2</i>												
Tunder A	80	0	40	65	0	35	90	0	45	80	0	40
Tunder B	0	80	40	0	65	35	0	90	45	0	80	40
Deșeu sideritic	10	10	10	0	0	0	5	5	5	0	0	0
Șlam aglomerare furnale	0	0	0	25	25	20	0	0	0	15	15	15
Var	10	10	10	10	10	10	5	5	5	5	5	5
<i>Lotul 3</i>												
Tunder A	80	0	40	70	0	35	70	0	35	60	0	30
Tunder B	0	80	40	0	70	35	0	70	35	0	60	30
Deșeu sideritic	15	15	15	10	10	10	15	15	15	0	0	0
Șlam aglomerare furnale	0	0	0	15	15	15	0	0	0	30	30	30
Șlam tunder	0	0	0	0	0	0	10	10	10	5	5	5
Var	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Lotul 4</i>												
Tunder A	80	0	40	70	0	35	70	0	35	60	0	30
Tunder B	0	80	40	0	70	35	0	70	35	0	60	30
Deșeu sideritic	15	15	15	10	10	10	15	15	15	0	0	0
Șlam aglomerare furnale	0	0	0	15	15	15	0	0	0	30	30	30
Șlam tunder	0	0	0	0	0	0	10	10	10	5	5	5
Ciment	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabelul 5.12. Rezistența la fisurare [N/mm²] și rezistența la compresiune [N/mm²] a brichetelor

Nr. crt.	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12
<i>Lotul 1</i>												
R _f	1	5	1,6	2,70	3,50	1,37	0,10	4,20	2,00	1,08	2,75	2,00
R _s	1,2	6	1,95	2,97	3,70	1,45	0,12	4,25	2,95	1,20	2,85	2,50
<i>Lotul 2</i>												
R _f	0,25	0,75	1,50	0,30	0,65	1,95	0,35	0,20	0,20	2,50	4,25	5,07
R _s	0,30	0,85	1,85	0,65	1,40	3,00	0,50	0,50	1,45	3,05	6,10	5,57
<i>Lotul 3</i>												
R _f	0,18	2,46	3,26	0,46	3,30	1,84	0,28	0,12	0,74	1,06	0,90	1,08
R _s	0,82	2,86	3,26	1,08	3,42	1,92	0,64	0,14	1,06	1,20	2,84	1,56
<i>Lotul 4</i>												
R _f	0,62	0,80	0,30	1,19	4,10	3,14	1,12	2,90	1,14	5,00	0,32	2,38
R _s	1,50	1,22	0,30	1,20	4,46	3,29	1,38	4,38	2,10	6,00	0,96	3,74



Figura 5.11. Aspecte din timpul determinării rezistenței la compresiune

Conținutul de fier la brichetele experimentale a variat în intervalul 60-65%. După analiza datelor obținute, rezistența la fisurare a ajuns până la valori maxime de $5,0\text{N/mm}^2$ iar rezistența la compresiune până la maxim $6,0\text{N/mm}^2$, încadrându-se în domeniul de valori indicat de literatura de specialitate [23,25,41,50-56] pentru reciclarea acestor deșeuri sub formă de brichete în siderurgie.

În continuare s-a trecut la experimentarea brichetelor în condiții de laborator. Experimentările s-au efectuat la cuptorul Tamann (figura 5.12), efectuându-se patru topiri, câte una pentru fiecare lot. Încărcătura din creuzet a avut componența din tabelul 5.13.

Tabelul 5.13. Componența încărcăturii pentru cuptorul Tamann

Nr.crt.	Component	Greutate, [g]
1	Deșeu feros	300
2	Brichete	100
3	Fluorină	20
4	Var	30
5	Cocs mărunț	10
Total		460



Figura 5.12. Cuptorul Tamann

Pe durata topirii s-a constatat o spumare corespunzătoare a zgurii. În toate cazurile reducerea oxizilor de fier a fost foarte bună, zgura rezultată având o culoare deschisă, tipică pentru zgurile cu conținut scăzut de oxizi de fier.

Deșeurile procesate sub formă de brichete pot fi utilizate, în funcție de caracteristicile de calitate, astfel: componenta a încărcăturii metalice la cuptoarele cu arc electric. Având în vedere că în rețete s-au utilizat și deșeuri cu conținut ridicat de carbon, subprodusele rezultate pe lângă recuperarea elementului util (Fe) pot fi utilizate și ca agent de spumare a zgurii la cuptoarele cu arc electric (respectiv pentru formarea de timpuriu a unei zguri active).

5.2.3. Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea zgurii de oțelărie sub formă de brichete

Experimentările în fază de laborator s-au axat pe identificarea soluțiilor de valorificare a fracției feroase a zgurii de oțelărie cu granulația 0-10mm. Aceasta, în cele mai multe cazuri se depozitează și nu este introdusă în circuitul economic.

Probele de zgură pentru experimentări s-au prelevat de pe Halda de zgură Buituri, unde este depozitată zgura de oțelărie rezultată curent pe fluxurile de fabricație a oțelului. Pentru cercetările efectuate în cadrul laboratorului s-au prelevat probe de material feros din cele trei sorturi de pe halda de zgură (rezultate în urma separării magnetice): 0-10mm, 10-50mm și 50-250mm. Clasa granulometrică cu cele mai puține utilizări este fracția 0-10mm.

Cercetările s-au axat pe identificarea soluțiilor de procesare și valorificare a fracției feroase a zgurii de oțelărie cu granulația 0-10mm. În uzina de la Hunedoara datorită restructurării combinatului siderurgic utilizarea acesteia la sectorul aglomerare nu mai este posibilă.

În continuare se prezintă rezultatele obținute în urma testărilor și cercetărilor privind valorificarea materialului feros - zgura de oțelărie – fracția feroasă cu granulația sub 10 mm sub formă de brichete.

Materialul feros (fracția 0-10mm) prelevat de pe haldă a fost supus separării granulometrice în laborator cu ajutorul unui ciur vibrator (prezentat în tabelul 5.1). Pentru clasarea fracției sub 10 mm s-au utilizat site cu ochiuri pătrate de 1, 3, 5, 8, și 10mm. Clasele granulometrice (0-3mm, 3-5mm, 5-8mm, 8-10mm) sunt prezentate în figura 5.13.



Figura 5.13. Clase granulometrice – material feros - granulația sub 10mm

În primă fază s-a testat comportarea zgurii de oțelărie (fracția 0-3mm) în procesul de brichetare în amestec cu alte deșeuri feroase prăfoase. Astfel, pentru experimentările în fază de laborator s-au avut în vedere următoarele deșeuri feroase pulverulente: fracția feroasă a zgurii de oțelărie (fracția sub 3mm), țunder, șlam de la aglomerare și deșeu sideritic. Pentru liere s-a folosit praf de var, bentonită și ciment. S-au experimentat 5 rețete obținute după tehnologic prezentat în figura 5.14. Atât compoziția chimică cât și cea granulometrică s-a determinat pe probe prelevate pentru fiecare categorie de deșeu (prezentate în capitolul 4). Componenta

rețetelor este prezentată în tabelul 5.14 iar compoziția chimică a rețetelor experimentale este prezentată în tabelul 5.15. Brichetele experimentale care au avut în componență vas și/sau bentonită s-au supuse durificării la cald în cuptor după diagrama prezentată în figura 5.15. Celelalte brichete care au avut în componență ciment s-au durificat la rece. În tabelul 5.16 se prezintă brichetele experimentale în stare crudă și imaginile brichetelor după reducerea acestora determinate la stereomicroscop [58-61].

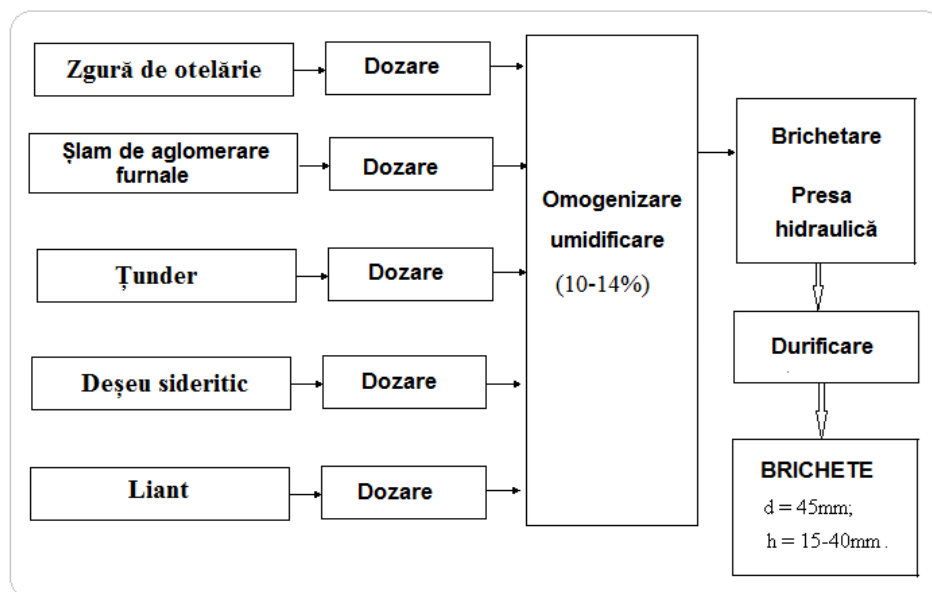


Figura 5.14. Flux tehnologic de brichetare

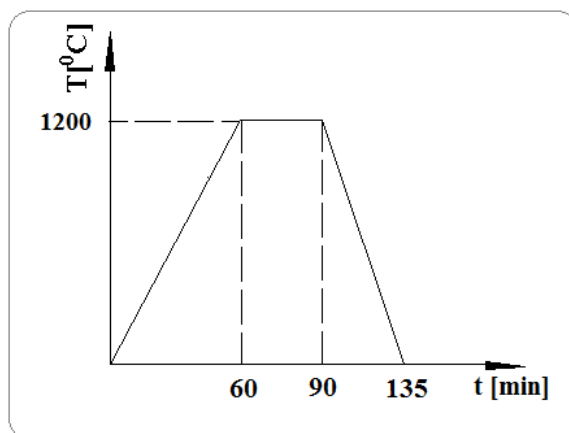


Figura 5.15. Diagrama de durificare a brichetelor






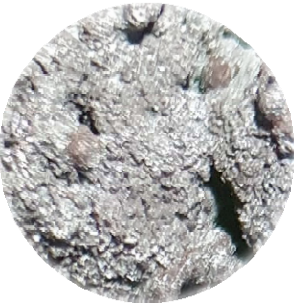


Tabelul 5.14. Componența rețetelor experimentale

Rețete	Componența rețetelor, [%]						
	Țunder	Zgura feroasa	Slam aglomerare-furnale	Deșeu sideritic	Var	Bentonită	Ciment
R1	20	18	40	10	5	7	0
R2	15	18	45	10	5	7	0
R3	22	15	40	10	6	7	0
R4	20	20	33	15	4	0	7
R5	20	18	40	10	5	0	7

Tabelul 5.15. Compoziția chimică a rețetelor

Rețete	Compoziția chimică, [%]											
	Fe _{tot}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	S	P	C	Altele
R1	29,81	8,54	33,19	14,12	5,70	15,72	3,64	1,61	0,62	0,13	8,82	7,56
R2	28,11	8,76	30,53	14,62	6,17	16,24	3,76	1,61	0,69	0,14	9,92	7,40
R3	30,92	8,39	34,86	13,67	5,58	15,96	3,36	0,79	0,61	0,12	8,82	7,02
R4	29,01	8,86	31,70	11,45	6,51	18,41	3,90	1,75	0,53	0,13	7,27	8,18
R5	29,84	8,69	33,07	10,87	6,92	18,58	3,52	1,61	0,62	0,13	8,82	6,97

Tabelul 5.16. Analiza brichetelor experimentale

Rețeta	Bricheta experimentală Stare crudă	Imagine stereomicroscop brichetă experimentală după reducere
R1		
R2		
R3		
R4		

R5



Având în vedere că brichetele urmează a fi procesate în cuptoare cu arc electric, ele pot fi considerate corespunzătoare din punct de vedere al rezistenței la compresiune, aceasta având valori cuprinse în intervalul 3-9N/mm², rezultatele testelor de compresiune fiind prezentate în Anexa 4. Pe baza rezultatelor obținute și a observațiilor tehnologice de pe perioada experimentărilor, se poate considera că aceste materiale se pot procesa în bune condiții prin brichetare.

Deșeurile feroase utilizate în cadrul acestor testări inițiale au avut un conținut de fier 25-45%. Aceste deșeuri se valorifică în prezent la scară redusă, iar acolo unde se valorifică, prețul de vânzare este de 6-8\$/t. Dacă avem în vedere că prețul minereului mărunț a ajuns la 30-40\$/t, sau chiar mai mult, devine rentabilă procesarea acestor deșeuri.

Subprodusele obținute au un conținut scăzut de fier (sub 50%) cu posibilități mai mici de utilizare în industrie. Trebuie identificate rețete care au în componență, alături de zgură, deseuri cu conținut ridicat de fier, lucru care să conducă la creșterea conținutului de fier în subprodusul rezultat. Astfel, acestuia îi va crește valoarea economică.

În continuare, s-a optat pentru obținerea brichetelor experimentale utilizând în rețete materialul feros (granulația 0-10mm) în amestec cu șlamuri feroase rezultate din siderurgie. De asemenea, s-au supus testelor toate cele 4 fracții rezultate (0-3mm, 3-5mm, 5-8mm, 8-10mm).

Compoziția chimică a deșeurilor feroase utilizate pentru obținerea brichetelor experimentale este prezentată în figura 5.16.

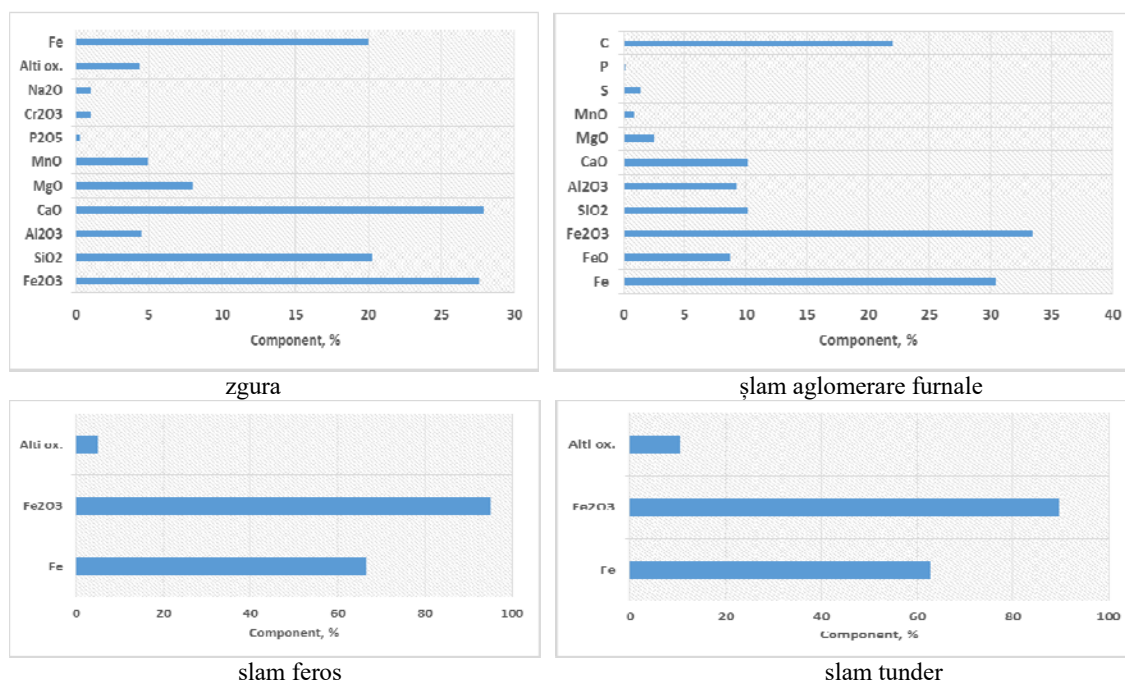


Figura 5.16. Compoziția chimică a componentilor rețetelor experimentale

S-au realizat brichete după 4 rețete. Componenta rețetelor: 30% fracția feroasă a zgurii de oțelărie (R1 – granulație 1mm, R2 – granulație 3mm, R3 – granulație 5mm, R4 – granulație 8mm), 30% șlam de țunder, 30% șlam feros, 5% șlam de aglomerare furnale și 5% bentonită pentru liere. Aspectele din timpul testelor efectuate se prezintă în figura 5.17 și Anexa 2. Fluxul tehnologic de brichetare este prezentat în figura 5.18.

Tehnologia experimentală de procesare a brichetelor:

- Pregătirea deșeurilor feroase (fracțiile feroase a zgurii de oțelărie cu granulația sub 10mm, șlam de țunder, șlam feros și șlam de aglomerare-furnale) pentru formarea șarjei crude;
- Determinarea compoziției chimice și granulometrice pe lotul de materiale supus procesării;
- Dozarea materialele conform rețetei stabilite, greutatea șarjei de brichetare de 2kg;
- Omogenizarea materialelor în toba de omogenizare, timpul pentru această operație fiind de circa 10minute;
- Brichetarea materialului cu ajutorul prese hidraulice;
- Durificarea brichetelor în cuptor;
- Determinarea caracteristicilor calitative (compoziția chimică, rezistența la fisurare, rezistența la compresiune și intervalul de sfărâmare) pentru fiecare lot de brichete.

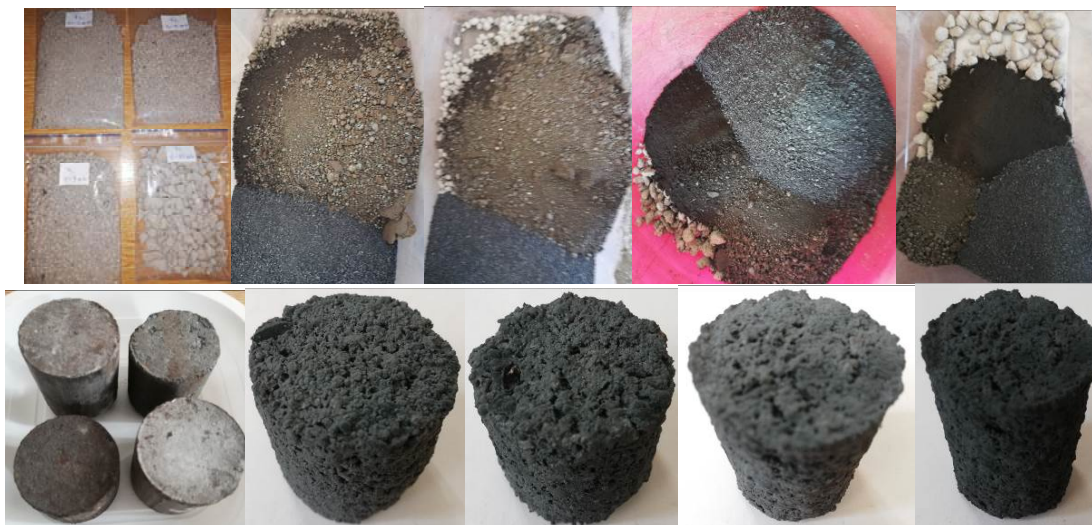


Figura 5.17. Aspecte din timpul obținerii brichetelor experimentale

Brichetele au fost durificate în cuptor după diagrama prezentată în figura 5.19. Compoziția chimică medie a brichetelor experimentate este prezentată în figura 5.20. Acestea au fost supuse determinărilor calitative.

În tabelul 5.17 se prezintă brichetele experimentale rezultate și vizualizarea acestora la stereomicroscop. Aspecte din timpul încercărilor de compresiune fiind prezentate în figura 5.21 iar rezultatele testelor sunt prezentate în Anexa 4. S-au obținut valori medii de $3,1\text{N/mm}^2$ pentru rezistența la fisurare, $6,9\text{N/mm}^2$ pentru rezistența la sfărâmare respectiv $4,9\text{N/mm}^2$ pentru intervalul de sfărâmare.

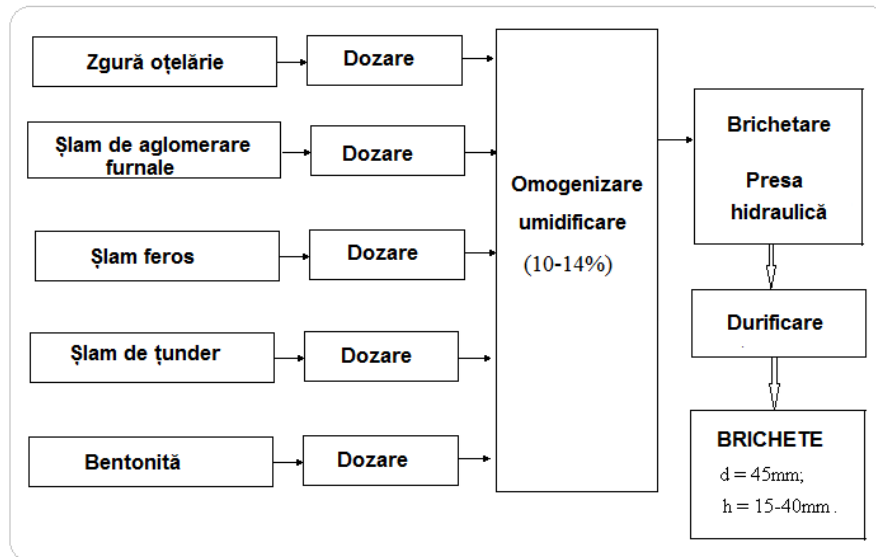


Figura 5.18. Flux tehnologic de brichetare

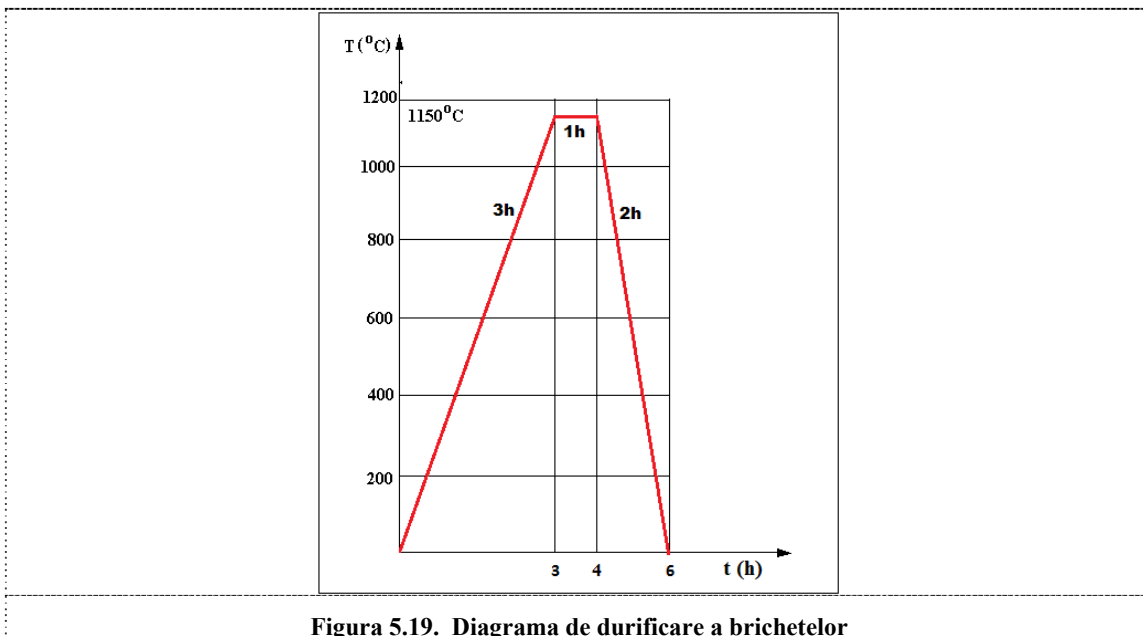


Figura 5.19. Diagrama de durificare a brichetelor

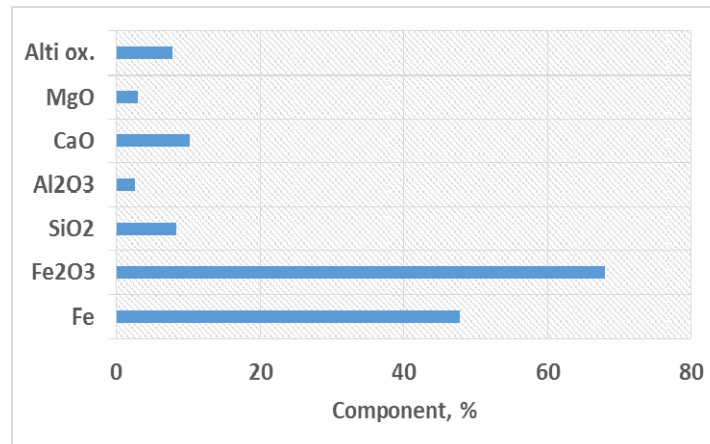


Figura 5.20. Compoziția chimică medie a brichetelor

Tabelul 5.17. Analiza brichetelor experimentale după durificare









Rețeta	Bricheta experimentală	Imagine stereomicroscop brichetă experimentală
R1		
R2		
R3		
R4		



Figura 5.21. Încercările de rezistență la compresiune pentru brichetele experimentale

Brichetele experimentale obținute au un conținut de fier de 48-55%Fe.

Analiza morfologică și microscopică s-a efectuat în laboratorul Universității Politehnica București unde s-au efectuat determinări SEM la Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor. Rezultatele obținute sunt prezentate figura 5.22. În urma analizei PIC-urilor precum și compozițiilor chimice efectuate rezultă componenta Fe, care apare sub formă de oxizi în toate cele 4 cazuri analizate. Analizând rezultatele și ținând seama de temperatura de ardere a brichetelor precum și de timpul de menținere a acestora în cuptor există mici diferențe în ceea ce privește diferențele între oxizii de fier pentru cele 4 rețete. Acestea sunt destinate utilizării ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptoarele electrice cu arc.

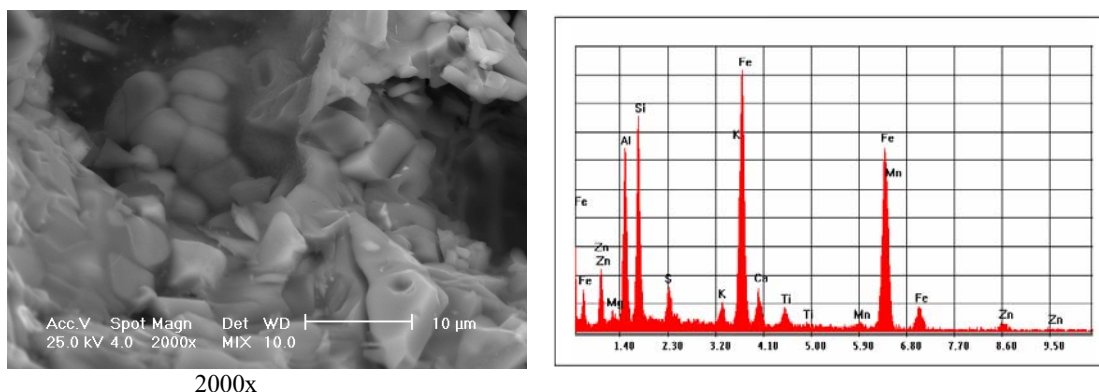


Figura 5.22. Analiza SEM pentru bricheta experimentală R1

Pentru a determina posibilitățile de recuperare a fierului în procesul de elaborare a oțelului s-au efectuat experimentări cu brichetele rezultate de elaborare a unei șarje de oțel în cuptorul cu inducție, urmând același proces tehnologic de elaborare și turnare a oțelului prezentat în subcapitolul 5.2.1. S-a utilizat deșeu de oțel în cantitate de 4,5kg șarjă și 3,5kg brichete experimentale/șarjă, iar pentru corecția compoziției chimice a zgurii un adaos format din: 0,30kg var/șarjă, 0,15kg bentonită/șarjă și 0,15kg fluorură respectiv 0,2kg grafit pentru reducerea oxizilor de fier. Datele obținute la elaborarea și turnarea șarjei de oțel, bilanțul de materiale respectiv gradul de recuperare a fierului din brichetele experimentale sunt prezentate în tabelele 5.18–5.22.

Tabelul 5.18 Compoziția chimică a oțelului la topire

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,45	0,65	0,31	0,037	0,032	98,521

Tabelul 5.19. Compoziția chimică a oțelului elaborat

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,48	0,68	0,33	0,042	0,035	98,44

Tabelul 5.20. Compoziția chimică a zgurii

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]									CaO/SiO ₂
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S	
1	52,14	22,05	8,56	7,05	4,05	2,09	0,85	2,15	1,06	2,36

Tabelul 5.21. Bilanțul încărcăturii

Nr crt	Încărcătura, [kg]				Topituri, [kg]					Gaze, praf topit. [kg]	
	Deșeu oțel	Brichete exp.	Adaos 1	Adaos 2	Total	Oțel 1	Zgură 1	Oțel 2	Zgură 2		Total topit.
1	4,50	3,50	0,57	0,11	8,68	4,33	0,17	5,62	2,70	8,49	0,19

Adaos 1: var + fluorină+bauxită; Adaos 2: siliciomangan+aluminiiu; Total topitură: oțel 2+zgura 1 + zgura 2.

Tabelul 5.22. Bilanțul fierului

Nr. șarjă	Fier, [kg]					$\eta_{\text{rec.Fe}}$, [%]
	Fe ₁	Fe ₂	Fe ₂ – Fe ₁	Fe _{brichete}	Fe _{zgară}	
1	4,43	5,57	1,14	1,75	0,031	66,00

Fe₁: Cantitatea de fier din oțel înaintea adaosului de brichete experimentale;
 Fe₂: Cantitatea de fier din oțel după adaosul de brichete.

Gradul de recuperare a fierului din brichete s-a determinat cu relația (5.6).

În **concluzie**, din datele prezentate mai sus, rezultă că brichetele experimentale produse din deșeuri cu conținut de fier prin ardere sunt metalizate, ceea ce permite utilizarea acestora ca și component în încărcătura cuptoarelor pentru elaborarea oțelurilor.

Deșeurile mărunte și pulverulente, provenite din siderurgie, datorită conținutului ridicat în fier, mangan, carbon și diverși oxizi (elemente utile procesului de producție al fontei sau oțelului) sunt considerate componente de capital natural deoarece sunt valorificate în industria siderurgică. Subprodusele obținute se pot utiliza ca și materie primă în încărcătura agregatelor de elaborare a oțelului în proporție de 5-10%.

5.2.4. Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea șlamurilor (feros, aglomerare furnale și de țunder) sub formă de brichete

În continuare sunt prezentate rezultatele obținute în urma prelucrării prin brichetare a șlamurilor (șlam feros, șlam de țunder și șlam aglomerare furnale) rezultate din industria siderurgică. Deșeurile feroase pulverulente au fost supuse analizei calitative, pentru determinarea caracteristicilor: analizele chimice, granulometrie respectiv analiza mineralogică și morfologică, acestea fiind prezentate în capitolul 4. La alegerea procedurii și tehnologiei de valorificare trebuie să se aibă în vedere: caracteristicile deșeurilor, destinația produsului finit și instalațiile de procesare existente. S-a ales varianta de procesare prin brichetare fără adaos de lianți, brichetele obținute, fiind destinate industriei siderurgice, utilizându-se ca și materie primă pentru elaborarea oțelurilor.

Fluxul tehnologic de procesare a brichetelor este prezentat în figura 5.23. S-au procesat brichete după 10 rețete, componența acestora fiind prezentată în tabelul 5.23 și în figura 5.24.

Tehnologia experimentală de procesare a brichetelor:

- Pregătirea deșeurilor feroase pulverulente (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare-furnale) pentru formarea șarjei crude;
- Determinarea compoziției chimice și granulometrice pe lotul de materiale supus procesării;
- Dozarea materialelor conform rețetei stabilite, pentru o greutate a șarjei de brichetare de 2kg;
- Omogenizarea materialelor în toba de omogenizare, timpul pentru această operație fiind de circa 10 minute;
- Brichetarea materialului cu ajutorul prese hidraulice;
- Durificarea la cald a brichetelor în cuptor;
- Determinarea caracteristicilor calitative (compoziția chimică, morfologică, rezistența la fisurare, rezistența la compresiune respectiv intervalul de sfărâmare) pentru fiecare lot de brichete.

În tabelul 5.24 se prezintă brichetele obținute după durificare și imaginea (macrostructura) acestora realizată cu ajutorul stereomicroscopului digital model 520SZM-D [49].

Conținutul de fier în brichetele experimentale este 60-78,76%.

Pentru evaluarea caracteristicilor calitative de rezistență la manipulare și transport ale brichetelor, s-au determinat prin experimentări, trei caracteristici tehnologice: rezistența la fisurare, rezistența la sfărâmare și intervalul de sfărâmare.

Pentru o bună comportare în procesul de manipulare și transport, literatura de specialitate [23,41,50,62-70] indică pentru rezistența la fisurare $R_f > 2\text{N/mm}^2$, pentru rezistența la sfărâmare $R_s > 3\text{N/mm}^2$ iar intervalul de sfărâmare este $I_s = (0,2-0,35)R_f$.

Determinarea caracteristicilor tehnologice de rezistență pentru brichetele experimentale s-au efectuat utilizând mașina universală de încercări la compresiune/tracțiune LabTest 6.50 prezentată în figura 5.26.

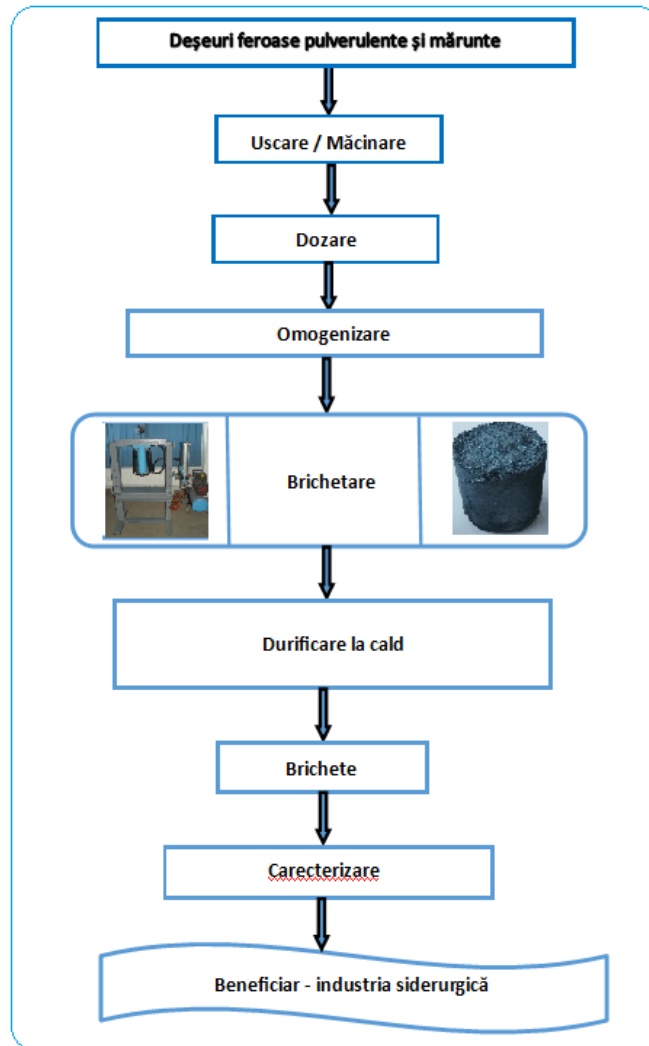












Figura 5.23. Fluxul tehnologic de procesare a deșeurilor prin brichetare

Tabelul 5.23. Rețete experimentale

Rețete	Componența rețetelor, [%]		
	Șlam feros	Șlam aglomerare-furnale	Slam de țunder
R1	100	0	0
R2	95	5	0
R3	90	10	0
R4	80	10	10
R5	70	10	20
R6	60	10	30
R7	50	10	40
R8	40	10	50
R9	30	10	60
R10	20	10	70

Tabelul 5.24. Analiza brichetelor experimentale după durificare

Rețeta	Bricheta experimentală	Imagine stereomicroscop brichetă experimentală
R1		
R2		
R3		
R4		
R5		

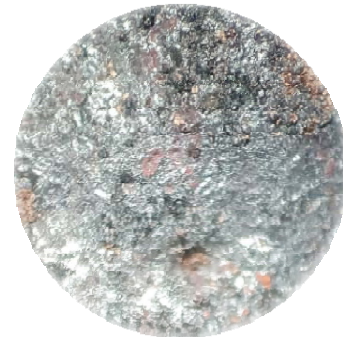
R6



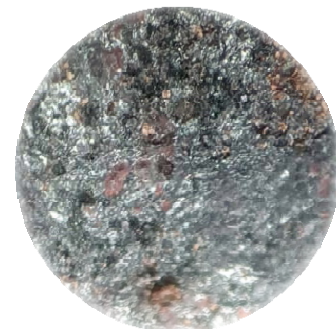
R7



R8



R9



R10



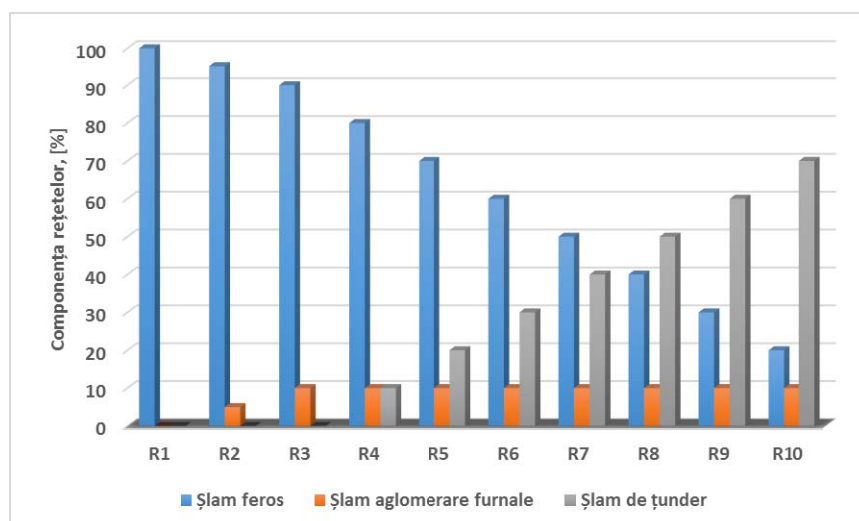


Figura 5.24. Componența rețetelor experimentale

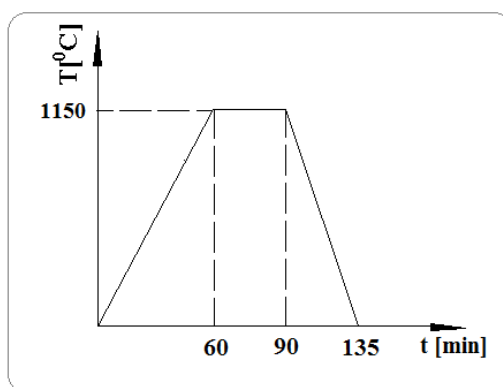


Figura 5.25. Diagrama de durificare a brichetelor
(T-temperatura de durificare, [°C]; t- timpul de durificare, [min])

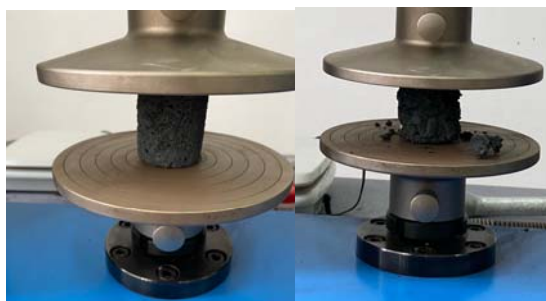


Figura 5.26. Determinări ale caracteristicilor de rezistență pentru brichetele experimentale

Pentru caracteristicile de rezistență valorile obținute sunt: $R_f=4-9\text{N/mm}^2$, $R_s=9-18\text{N/mm}^2$ și $I_s \geq 5\text{N/mm}^2$ iar rezultatele testelor efectuate fiind prezentate în Anexa 5.

Analiza topografică și morfologică a probelor [49] (brichete experimentale) s-a efectuat în cadrul Institutului de Cercetări pentru Energii Regenerabile Timișoara cu ajutorul microscopului LEXT OLS4000 3D Confocal Laser Measuring Microscope iar rezultate sunt prezentate în Anexa 6. Conținutul de fier în brichetele experimentale este peste 60% în funcție de componența rețetelor. Aceasta se stabilește în funcție de disponibilul de deșeuri mărunte și pulverulente (șlamuri) și de destinația materialului procesat, și anume: ca și materie primă pentru producerea oțelului.

5.2.5. Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea șlamului feros și a prafului de oțelărie sub formă de brichete

În continuare sunt prezentate rezultatele obținute în urma prelucrării prin brichetare a deșeurilor feroase pulverulente (șlam feros și praf de oțelărie) rezultate din industria siderurgică. Deșeurile feroase pulverulente au fost supuse analizei calitative, pentru determinarea caracteristicilor: analizele chimice, granulometrie respectiv analiza mineralogică și morfologică, acestea fiind prezentate în capitolul 4.

În ultimii ani datorită componenței încărcăturii metalice a agregatelor de elaborare a oțelului, praful de oțelărie, rezultat în urma proceselor de obținere a oțelului, are un conținut de zinc foarte mare (15-35%) [71-75].

La alegerea procedurii și tehnologiei de valorificare trebuie să se aibă în vedere: caracteristicile deșeurilor, destinația produsului finit și instalațiile de procesare existente.

S-a ales varianta de procesare prin brichetare cu adaos de lianți, brichetele obținute fiind durificate la cald.

Pentru experimentările de la laborator s-a utilizat praf de oțelărie prelevat de la ArcelorMittal Hunedoara, acesta pentru a putea fi utilizat în industria siderurgică trebuie îndepărtat zincul.

Tehnologia de procesare a urmat fluxul de procesare a brichetelor prezentat în figura 5.23. S-au procesat brichete după 10 rețete, componența acestora fiind prezentată în tabelul 5.25. Liantul utilizat a fost zgura de LF în proporție de 5-10%.

Tabelul 5.25. Rețete

Rețete	Componența rețetelor, [%]		
	Șlam feros	Praf de oțelărie	Zgură de LF
R1	60	35	5
R2	55	40	5
R3	50	45	5
R4	45	50	5
R5	40	55	5
R6	70	20	10
R7	60	30	10
R8	50	40	10
R9	40	50	10
R10	30	60	10

După producerea brichetelor, acestea au fost durificate la cald prin introducerea în cuptor și încălzite până la o temperatură de 1150°C, cu o viteză de 6 °C /min, menținute timp de 1 oră și răcite pentru 2 ore.











În tabelul 5.26 se prezintă brichetele obținute în stare crudă și imaginea (macrostructura) acestora realizată cu ajutorul stereomicroscopului digital model 520SZM-D respectiv brichetele obținute după durificare, cu evidențierea zincului care se poate recupera.



În figura 5.27 se prezintă compoziția chimică a brichetelor experimentale după reducere iar în figura 5.28 gradul de recuperare al zincului la brichetele obținute, calculat cu relația

$$\eta_{zN} = \frac{Zn_f}{Zn_t} \cdot 100, [\%]$$











Din analiza datelor se poate observa că s-a obținut un grad de reducere pentru toate probele cu valori cuprinse între 75-87%. Simultan cu reducerea oxidului de zinc a avut loc și reducerea oxidului superior de fier la forma inferioară și respectiv metalică, gradul de metalizare fiind cuprins în limitele 68-82%. Conținutul total de fier din brichetele produse a fost cuprins în limitele 42-61%.

Tabelul 5.26. Analiza brichetelor experimentale

Rețeta	Bricheta experimentală stare crudă	Imagine stereomicroscop brichetă experimentală
R1		
R2		
R3		
R4		
R5		

R6		
R7		
R8		
R9		
R10		

Tabelul 5.26. Analiza brichetelor experimentale (continuare)

Rețeta	Bricheta redusă	Rețeta	Bricheta redusă
R1		R6	
R2		R7	
R3		R8	
R4		R9	
R5		R10	

Procesarea deșeurilor feroase pulverulente cu conținut de zinc prin brichetare conduce la recuperarea zincului prin metode specifice metalurgiei zincului iar subprodusele rezultate pot fi utilizate în încărcătura cuptoarelor electrice cu arc, dar necesită investiții suplimentare pentru recupearea zincului.

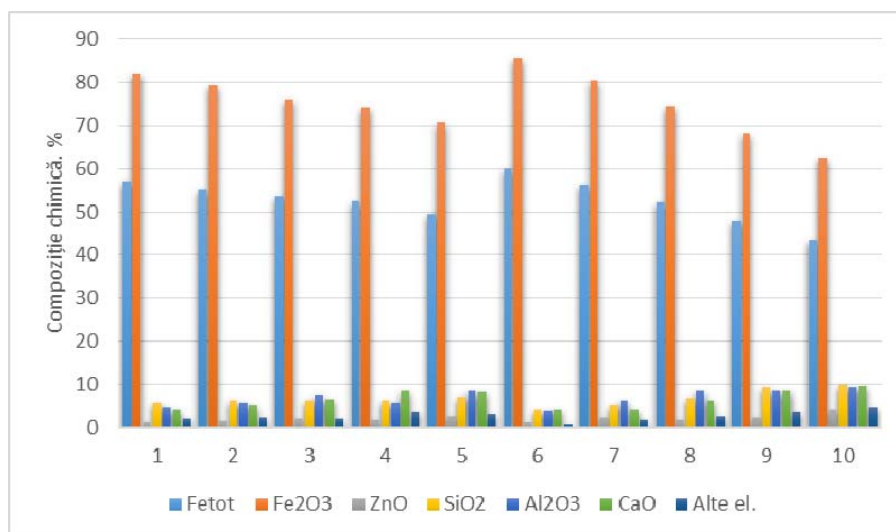


Figura 5.27. Compoziție chimică brichete experimentale după reducere

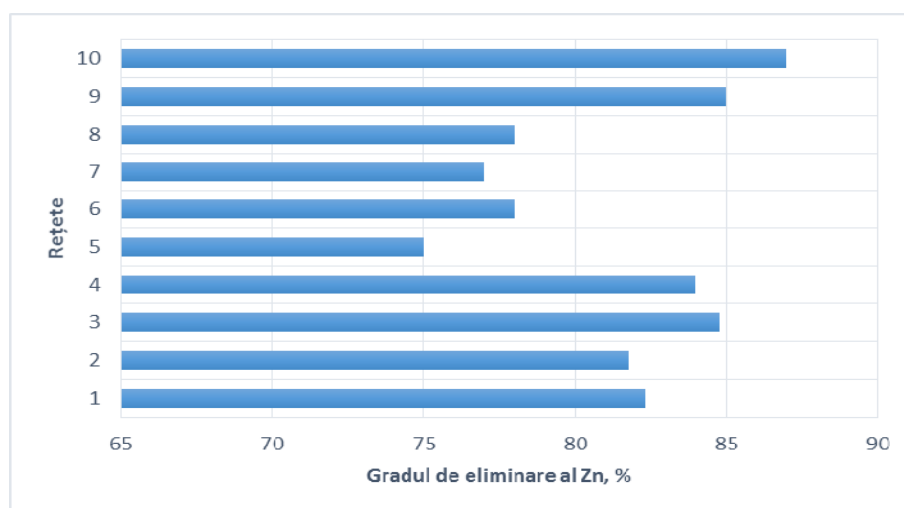


Figura 5.28. Gradul de eliminare a Zn

5.2.6. Concluzii

Procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente realizată prin brichetare este dependentă de alegerea deșeurilor din componența rețetelor (trebuie făcută de procesator și să aibă în vedere disponibilul de deșuri), de cererea de produse rezultate precum și de aspectele de ordin economic și ecologic.

Procesul de brichetare permite procesarea unei game variate de deșuri cu conținut de fier de 30-87% iar din punct de vedere granulometric de la microni până la maxim 10mm. Brichetele experimentale se valorifică prin topire în agregatele de obținere a oțelului.

Din analiza datelor experimentale în fază de laborator, în ce privește procesarea deșeurilor prin brichetare, rezultă următoarele:

- deșeurile feroase pulverulente și mărunte, rezultate din industria siderurgică, procesate prin brichetare sunt: șlamul feros, ținder, șlamul de ținder, șlamul de aglomerare-furnale, zgura de oțelărie – fracția feroasă și praful de oțelărie;
- subprodusele rezultate (brichete) au un conținut de fier de peste 45% și pot fi utilizate în încărcătura agregatelor de elaborare a oțelului ca și materie primă în proporție de 5-25%.

În fază de laborator s-au experimentat o serie de rețete de brichetare a deșeurilor cu conținut de fier, astfel:

- 10 rețete având în componență – șlam feros;
- 4 loturi a câte 12 rețete având în componență – șlamuri feroase și țunder;
- 9 rețete având în componență – șlamuri feroase, țunder și zgură de oțelărie;
- 10 rețete având în componență – șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale;

- 10 rețete având în componență – șlamuri feroase și praf de oțelărie.

La fiecare variantă de procesare s-a stabilit fluxul tehnologic de brichetare.

Subprodusele rezultate au fost supuse caracterizării morfologice, structurale și topografice respectiv s-au determinat caracteristicile calitative și tehnologice a brichetelor experimentale.

La procesarea prin brichetare s-au obținut următoarele subproduse:

- brichete din șlam feros, fără adaos de liant și cu adaos de liant (la rece și la cald), cu un conținut de fier de 59-72%;
- brichete din țunder cu un conținut de fier de 60-65%, acestea având în componență și deșeuri cu conținut ridicat de carbon, pe lângă recuperarea fierului contribuie și la formarea unei zguri active respectiv la procesul de spumare a zgurii;
- brichete din șlam feros și zgură de oțelărie cu un conținut de fier de 48-55%;
- brichete din șlamuri feroase (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale) cu un conținut de fier de 60-78,76%;
- brichete din șlam feros și praf de oțelărie cu un conținut de fier 42-61%.

Pentru brichetele experimentale rezultate în urma testărilor în fază de laborator s-a determinat gradul de recuperare a fierului și a altor elemente însoțitoare în procesul de elaborare a oțelului. S-au elaborat șarje de oțel în cuptorul cu inducție utilizându-se ca și materie primă 3,5kg brichete experimentale/șarjă. S-au prelevat probe de oțel pentru determinarea compoziției chimice a oțelului și a zgurii. Adaosurile de brichete și materiale pentru formarea zgurii s-au efectuat pe măsura topirii lor. Datele rezultate au fost analizate și s-a calculat pentru fiecare șarjă un bilanț al fierului și s-a determinat gradul de recuperare al acestuia din brichetele experimentale.

S-au obținut următoarele valori pentru gradul de recuperare al fierului:

- 97,85-98% la utilizarea brichetelor din șlam feros;
- 66% la utilizarea brichetelor din șlam feros și zgură de oțelărie;
- 98% la utilizarea brichetelor din șlamuri (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale);
- 68-82% la brichetele din șlam feros și praf de oțelărie.

Rezultatele obținute în cadrul experimentărilor, conduc la concluzia că deșeurile analizate pot fi procesate prin brichetare (cu obținerea pentru caracteristicile de rezistență mecanică a unor valori superioare celor minime pentru acest procedeu), acest procedeu permițând valorificarea deșeurilor cu limite de variație mari din punct de vedere granulometric (de dorit sub 2mm). Componența rețetelor se stabilește în funcție de disponibilul de deșeuri mărunte și pulverulente și de destinația materialului procesat - oțelării.

Pentru obținerea unor indicatori calitativi superiori pentru produsele obținute (brichete), pot fi utilizate optimizări sau pot fi făcute o serie de alte modificări ale rețetelor șarjei crude, inclusiv prin utilizarea unui liant care să elimine durificarea la cald – în acest caz fiind nevoie de controlul mult mai riguros a compoziției chimice, în special din punct de vedere a elementului util: fierul.

5.3. Procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente prin aglomerare

Pentru procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente s-a optat pentru tehnologia de aglomerare a acestora în scopul obținerii unui subprodus sinterizat utilizabil în încărcătura agregatelor de elaborare a aliajelor feroase [76,77].

Pentru experimentările în fază de laborator s-a utilizat ceașca de aglomerare existentă în laboratoarele Facultății de Inginerie Hunedoara. S-a experimentat valorificarea prin aglomerare a deșeurilor pulverulente și mărunte cu conținut de fier, rezultate în industria siderurgică (șlam feros, șlam aglomerare furnale, șlam de țunder, țunder și fracția feroasă a zgurii de oțelărie).

Schematic instalația pilot pentru aglomerare utilizată pentru experimentari este prezentată în figura 5.29. În practică, înălțimea stratului de aglomerat se stabilește în funcție de permeabilitatea sa, de capacitatea de aspirație, natura mineralogică a amestecului utilizat în șarjă și de viteza verticală de aglomerare.

Fluxul tehnologic experimental de transformare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier în aglomerat este prezentat în figura 5.30.

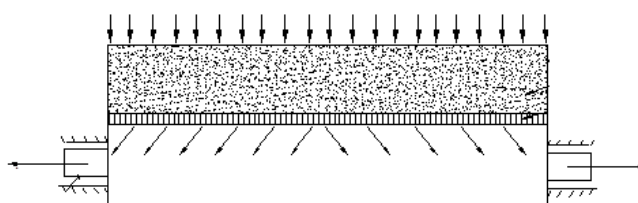


Figura 5.29. Schema instalației pilot pentru aglomerare

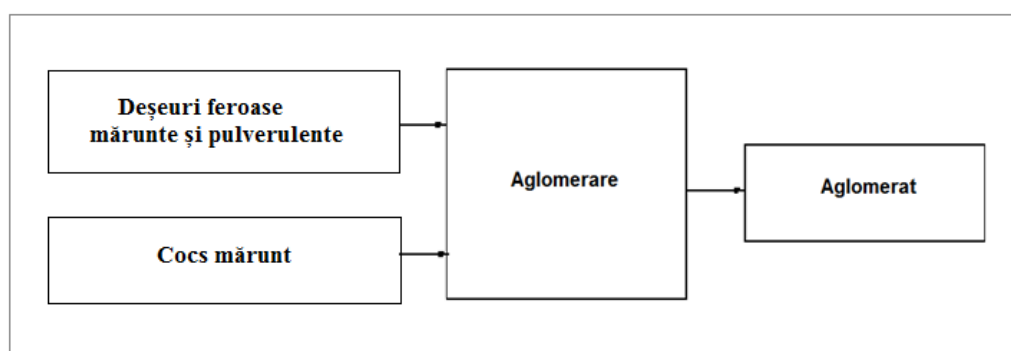


Figura 5.30. Flux tehnologic experimental de procesare a aglomeratului

În figura 5.31 fig se prezintă zonele procesului de aglomerare. Calitatea aglomeratului și consumul de combustibil, sunt direct influențate de gradul de măcinare a acestuia. Granulația optimă a combustibilului utilizat la aglomerare, care conduce la consumuri minime și la o calitate bună a aglomeratului experimental este cea cuprinsă între 0,5-2mm [78]. Frațiile mai mari de 2mm și în special cele de 3mm dezvoltă prin ardere cantități mari de căldură, și conduc la o supraîncălzire a amestecului supus aglomerării, iar fracția fină sub 0,5mm este ușor reactivă și căldura rezultată nu este utilizată în mod eficient. Combustibilul trebuie să fie cât mai omogen amestecat cu materialele supuse aglomerării, astfel încât în procesul de sinterizare să se evite temperaturi locale prea mari [78,79].

Principali fondanți utilizați în procesul de aglomerare sunt calcarul și uneori dolomita. Pentru aceasta, calcarul trebuie să fie măcinat la granulații sub 3mm considerându-se pentru procesul de aglomerare și calitatea aglomeratului valoarea optimă a granulație cuprinsă între 0,5-2mm. Patul de protecție este format din pelete cu granulație peste 13mm fiind încărcate direct pe grătarul instalației. În cadrul experimentărilor înălțimea patului de protecție a fost cuprinsă între 30-50mm.

Patul de protecție îmbunătățește condițiile de aglomerare. protejând grătarul împotriva temperaturilor ridicate, reduce antrenarea fracțiilor mărunte din încărcătură sub grătar, și permite

conducerea procesului de aglomerare până la ultimul strat, fără a se produce lipirea aglomeratului de barele grătarului. De asemenea, patul de protecție împiedică obturarea cu material mărunț a secțiunii libere dintre barele grătarului, îmbunătățind astfel regimul de aspirație.

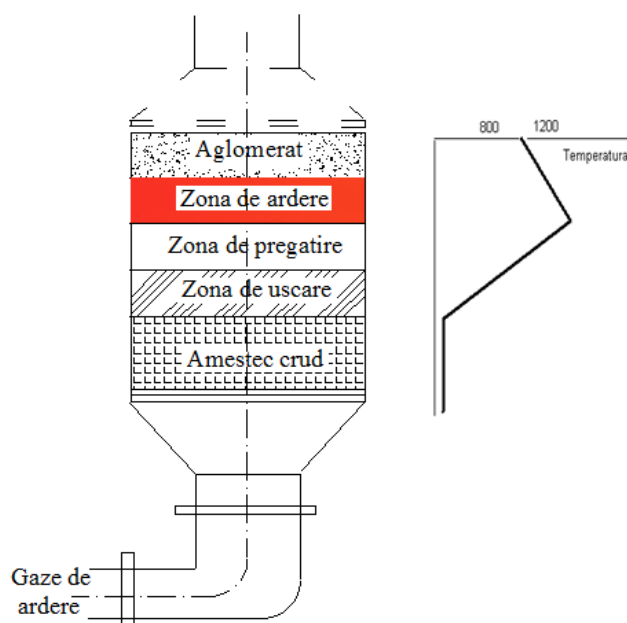


Figura 5.31. Evoluția temperaturii și zonele de ardere la producerea aglomeratului [40]

Asupra procesului de aglomerare, care în general este caracterizat prin viteza de aglomerare și calitatea aglomeratului obținut, influențează o serie de factori, printre care cei mai importanți sunt [77]:

- calitatea pregătirii materiilor prime pentru asigurarea unei permeabilități ridicate a stratului de material, permeabilitate influențată la rândul ei de granulația componentelor amestecului, forma granulelor și uniformitatea acestora, umiditatea amestecului de șarjă;
- calitatea aprinderii amestecului de șarjă, determinată de natura combustibilului sau amestecurilor, calitatea aerului de combustie și tipul instalațiilor de combustie;
- utilizarea în amestecul de aglomerare a diferiților intensificatori;
- componenta mineralogică a deșeurilor utilizate.

5.3.1. Experimentări în fază de laborator privind valorificarea șlamului feros sub formă de aglomerat

În continuare se prezintă posibilitățile de valorificare a șlamului feros (caracteristicile calitative ale acestuia au fost prezentate în capitolul 4). Analizând compoziția chimică și granulometrică a deșeurilor utilizați, pentru a putea fi supuși procesării prin aglomerare, acesta trebuie supus unui proces de micropeletizare.

Șlamul feros a fost supus operației de peletizare conform fluxului tehnologic prezentat în figura 5.32 în scopul obținerii de micropelete. Șarja crudă a fost formată din șlam feros iar ca și liant (10%) s-a utilizat un amestec de 1:1 de bentonită și zgură de LF. Micropeletele obținute s-au utilizat în rețetă pentru producerea aglomeratului experimental.

Rețeta de aglomerare a constat din: 90% micropelete și 10% cocs mărunț. Fluxul tehnologic de producere a aglomeratului se prezintă în figura 5.33. S-au realizat 2 șarje pentru obținerea aglomeratului experimental.

După dozarea micropeletelor a fost introdus și cocsul mărunț necesar asigurării căldurii procesului de sinterizare, pe de o parte, iar pe de altă parte a asigura dezvoltarea reacțiilor de reducere a oxizilor de fier. După omogenizarea amestecului de aglomerare (șarja crudă) acesta s-a introdus în instalația pilot pentru aglomerare, în care inițial s-a depus pe grătar stratul de

protecție, repartizat cât mai uniform pe secțiunea instalației. S-a aprins arzătorul, s-a așezat capacul instalației deasupra șarjei, timp în care s-a pornit exhaustorul (ventilatorul) și s-a lăsat aprins în medie 60 secunde pentru aprinderea cocsului, după care s-a rabătut capacul și se sting arzătoarele. Ca urmare a aspirației de aer prin stratul de material, cocsul se aprinde și frontul de sinterizare avansează de la suprafața încărcăturii spre grătar. În funcție de excesul de cocs, în stratul de sinterizare se dezvoltă reacțiile de reducere a oxilor de fier de la forma superioară spre forma inferioară și, într-o anumită proporție la fier metalic [59, 61,76,77].

Aspectele din timpul experimentărilor sunt prezentate în figura 5.34 și Anexa 2.

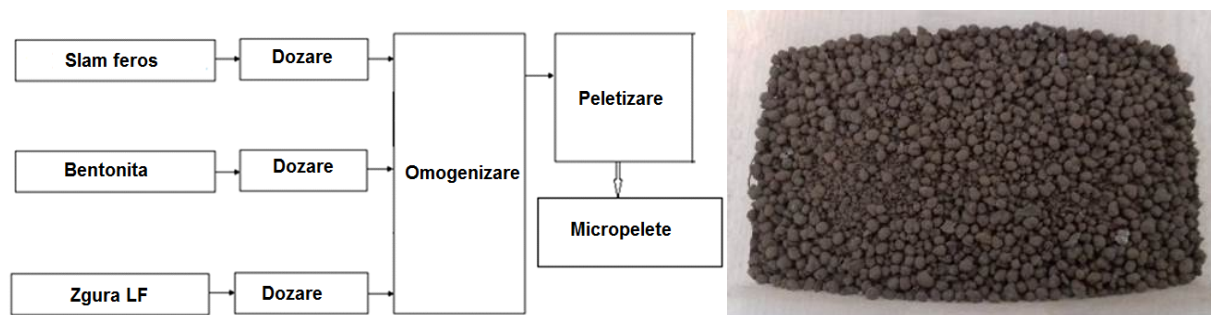


Figura 5.32. Flux tehnologic de peletizare

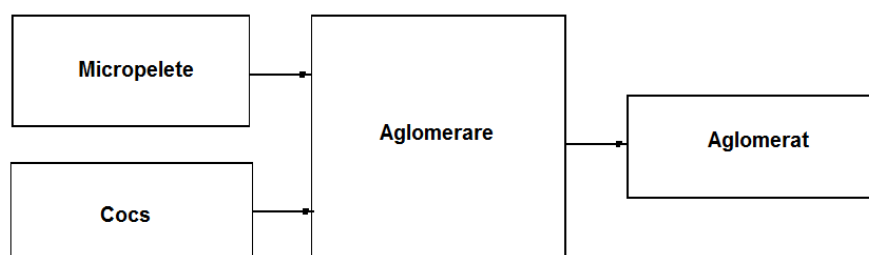


Figura 5.33. Flux tehnologic de producere a aglomeratului







Figura 5.34. Aspecte din timpul obținerii aglomeratului experimental

Pe durata procesului de aglomerare s-a urmărit evoluția depresiunii, temperaturii și a reducerii înălțimii stratului de aglomerare. După terminarea procesului de aglomerare s-a evacuat aglomeratul, s-a lăsat să se răcească, după care s-au determinat caracteristicile calitative [76].

Compoziția chimică a aglomeratului este controlată în vederea cunoașterii conținutului de Fe, Mn și al bazicității. Conținutul de Fe în aglomeratul experimental are valori cuprinse între 54-60%. Granulatia aglomeratului se determină prin ciuruire și este reprezentată prin conținutul în procente a fracției 6-10mm, din aglomeratul sortat care nu trebuie să depășească 22%. Rezistența mecanică se determină cu ajutorul tobei Rubin sau alte metode standardizate (MICUM, IRSID, ASTM, etc), și este dată de conținutul în procente al fracției granulometrice 0-6,3 mm. Indicatorii de calitate sunt legați în special de compoziția chimică, starea fizică a bucăților de aglomerat, rezistența mecanică a acestora, precum și comportarea la cald. Porozitatea aglomeratului variază de regula, în limite destul de largi, și anume între 40-60%.

În tabelul 5.27 se prezintă aglomeratul rezultat și aspectul acestuia la stereomicroscop. Indicatorii calitativi ai aglomeratului se prezintă în tabelul 5.28.

Tabelul 5.27. Aglomeratul experimental

Reteta	Aglomerat	Imagine stereomicroscop
R1		
R2		

Tabelul 5.28. Indicatori calitativi - șarje experimentale

Clasa granulometrică, [mm]	R1		R2	
	[kg]	[%]	[kg]	[%]
> 50	1,1	10	0,5	9
35 – 50	1,1	10	1,5	13
25 – 35	1,5	13	1,5	13
15 – 25	2,0	20	2,0	18
10 – 15	2,5	23	2,5	23
5 – 10	1,5	13	1,5	13
3 – 5	1,3	11	1,3	11
< 3				
Total	11,0	100	11,8	100

Aprecierea calității aglomeratului din punct de vedere fizico-mecanic se face după conținutul în fracția granulometrică 6-10 mm și rezistența mecanică. Aglomeratul experimental are rezistența mecanică 11% iar fracția 6-10 mm este 13%.

În concluzie, aglomeratul obținut se încadrează în clasa B de calitate (bun pentru utilizare).

În figura 5.35 se prezintă proba de aglomerat supusă analizei SEM iar în figura 5.36 imaginile SEM obținute.



Figura 5.35. Probă aglomerat experimental supusă analizei SEM

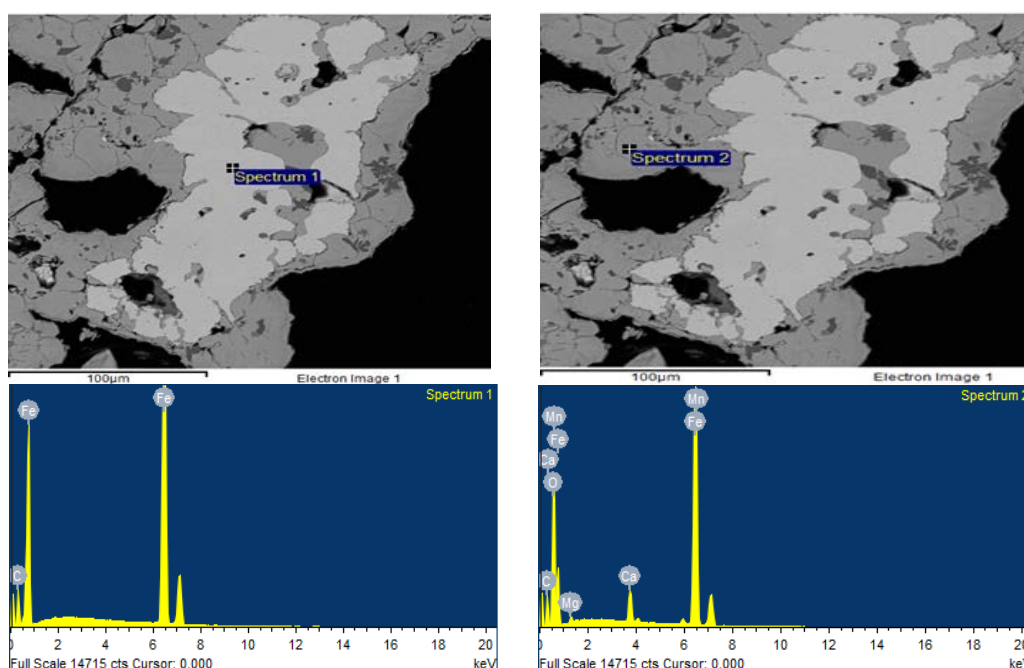


Figura 5.36. Imagine SEM aglomerat

Aglomeratul experimental obținut a fost utilizat ca materie primă la elaborarea oțelului în cuptorul cu inducție urmând același flux de elaborare ca și în cadrul brichetelor pentru a determina gradul de recuperare al fierului pentru peletele experimentale. Pentru formarea băii metalice s-a utilizat deșeu de oțel în cantitate de 4,5kg șarjă și 3,5kg aglomerat/șarjă, iar pentru corecția compoziției chimice a zgurii un adaos format din: 0,30kg var/șarjă, 0,15kg bentonită/șarjă și 0,15kg/șarjă fluorură și 0,20kg/șarjă grafit. Proba de oțel obținută s-a cântărit, împreună cu zgura extrasă, în vederea efectuării bilanțului de materiale. Pe baza compozițiilor chimice a oțelului și zgurii s-a determinat gradul de recuperare a fierului. În tabelele 5.29-5.33 se prezintă rezultatele obținute.

Gradul de recuperare a fierului din aglomerat se determină cu relația:

$$\eta_{recFe} = \frac{Fe_2 - Fe_1}{Fe_{agl}} \cdot 100, [\%] \quad (5.7)$$

unde: η_{Fe} este gradul de recuperare a fierului din aglomerat;
 Fe_1 - cantitatea de fier din oțel înaintea adaosului de aglomerat;
 Fe_2 - cantitatea de fier din oțel după adaosul de aglomerat.

Tabelul 5.29. Compoziția chimică a oțelului la topire

Compoziția chimică, [%]					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0,44	0,68	0,29	0,031	0,032	98,514

Tabelul 5.30. Compoziția chimică finală a oțelului

Compoziția chimică, [%]					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0,45	0,71	0,28	0,038	0,034	97,96

Tabelul 5.31. Compoziția chimică a zgurii

Compoziția chimică, [%]									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S	CaO/SiO ₂
51,79	21,54	8,41	7,08	4,87	2,22	0,83	2,14	1,11	2,21

Tabelul 5.32. Bilanțul încărcăturii

Încărcătura, [kg]					Topitura, [kg]					Gaze
Deșeu oțel	Aglomerat experimental	Ados 1	Ados 2	Total	Oțel 1	Zgură 1	Oțel 2	Zgură 2	Total topitura	Praf, [kg]
4,52	3,51	0,60	0,10	8,73	4,36	0,16	6,10	1,41	7,68	0,22

Table 5.33. Bilanțul fierului

Fier, [kg]					$\eta_{rec.Fe}$, [%]
Fe ₁	Fe ₂	Fe ₂ – Fe ₁	Fe _{agl}	Fe _{slag}	
4,292	5,982	1,691	1,722	0,027	94,571

Din datele prezentate mai sus, rezultă că aglomeratul experimental produs din deșeuri pulverulente cu conținut de fier (șlam feros) prin ardere poate fi metalizat, ceea ce permite utilizarea acestuia ca și component în încărcătura cuptoarelor pentru elaborarea oțelurilor.

5.3.2. Experimentări în fază de laborator privind valorificarea țunderului și a zgurii sub formă de aglomerat

În continuare se prezintă posibilitățile de valorificare a țunderului și a fracției feroase a zgurii cu granulația sub 10mm alături de șlamul feros prin aglomerare.

Compoziția chimică a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente utilizate pentru testările în faza de laborator se prezintă în tabelele 5.34-5.38.

Deșeurile feroase pulverulente au fost supuse analizei granulometrice iar compoziția granulometrică a acestora se prezintă în figurile 5.37-5.39. Analiza SEM a probelor de zgură, țunder și șlam feros se prezintă în fig.5.40.

Tabelul 5. 34. Compoziția chimică a țunderului

Fe [%]	FeO [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	MnO [%]	Alți oxizi [%]
66,42	7,40	86,66	0,50	0,86	4,58

Tabelul 5.35. Compoziția chimică a fracției feroase a zgurii de oțelărie

Fe ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	P ₂ O ₅ [%]	Cr ₂ O ₃ [%]	Na ₂ O [%]	Altele [%]	Fe [%]
27,64	20,29	4,56	27,94	8,00	4,82	0,30	1,02	1,09	4,34	19,35

CaO/SiO₂=1.38

Tabelul 5.36. Compoziția chimică a șlamului de aglomerare furnale

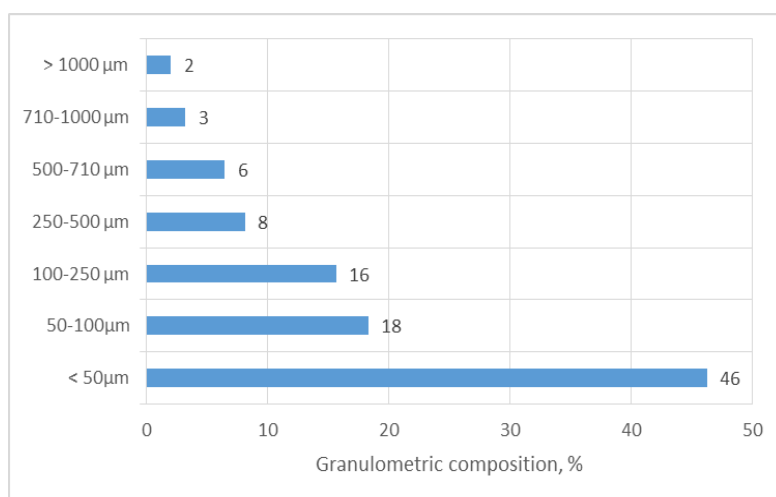
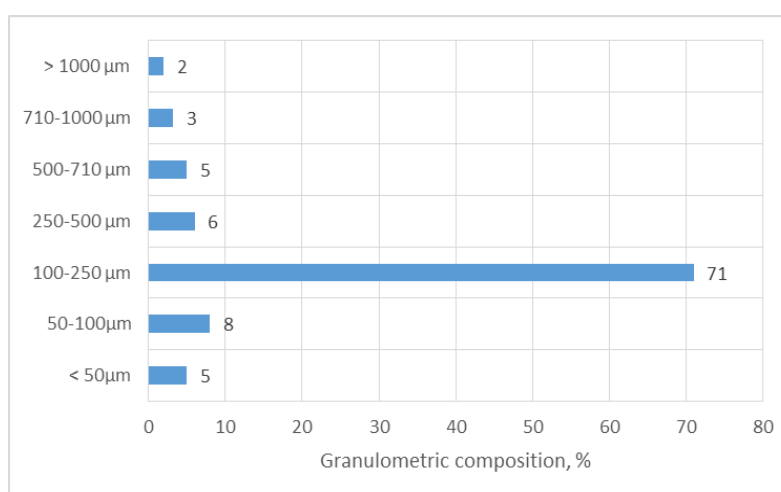
Fe [%]	FeO [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	S [%]	P [%]	C [%]	P.C. [%]
30,25	8,74	33,5	10,15	9,23	10,2	2,47	0,89	1,38	0,13	22,04	1,27

CaO/SiO₂=1.01**Tabelul 5.37. Compoziția chimică a șlamului feros**

Fe [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Cr ₂ O ₃ [%]	Na ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	Altele [%]
66,54	95,06	0,91	0,23	0,30	0,71	0,27	0,05	0,77	0,01	1,69

CaO/SiO₂=0.33**Tabelul 5.38. Compoziția chimică a șlamului de țunder**

Fe [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Cr ₂ O ₃ [%]	Na ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	Altele [%]
62,70	89,57	3,15	1,14	2,12	0,65	1,70	0,28	0,39	0,05	1,23

CaO/SiO₂=0.67**Figura 5.37. Clasele granulometrice a șlamului de aglomerare furnale****Figura 5.38. Clasele granulometrice a șlamului feros**

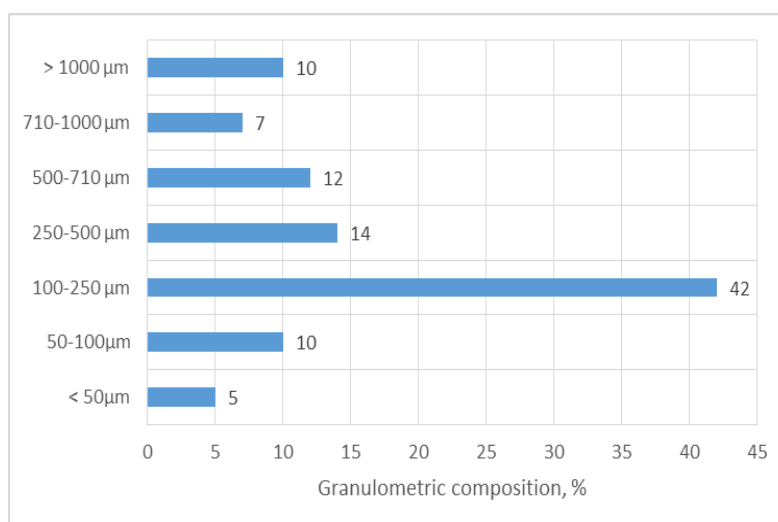


Figura 5.39. Clasele granulometrice a șlamului de țunder

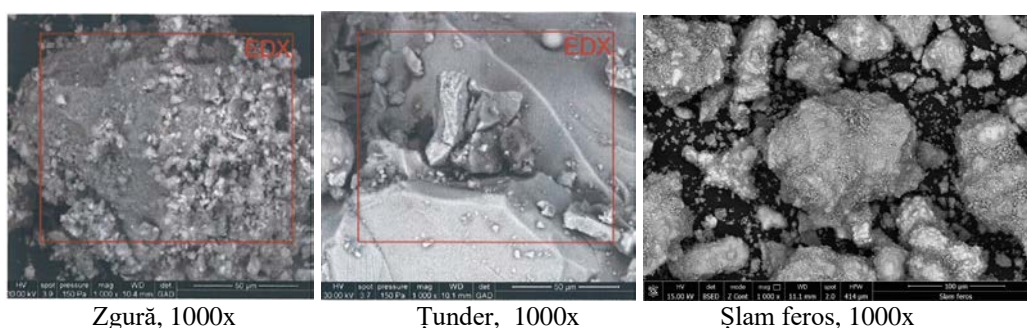


Figura 5.40. Analizele SEM a deșeurilor utilizate

Analizând compoziția chimică și granulometrică a probelor s-a stabilit tehnologia de procesare a acestora prin aglomerare în cutia de aglomerare. Având în vedere granulația probelor de șlam, acestea au fost supuse micropelletizării cu ajutorul instalației de pelletizare tip taler. Probele de șlam au fost supuse operației de pelletizare iar pentru liere s-a utilizat bentonita, conform fluxului tehnologic prezentat în figura 5.41. Micropelletele obținute s-au utilizat la producerea aglomeratului. S-au realizat două rețete, componența acestora fiind prezentată în tabelul 5.39. Țunderul a fost supus operației de clasare, fracția mai mare de 5mm fiind reintrodusă la măcinat (în moara Kollergan). Cocsul a fost măcinat la granulația de max. 3mm. Calitatea aglomeratului și consumul de combustibil, sunt direct influențate de gradul de măcinare a combustibilului. Patul de protecție a fost format din pelete cu granulație peste 12mm fiind încărcate direct pe grătarul instalației. În cadrul experimentărilor înălțimea patului de protecție a fost cuprinsă între 30-40mm. Șarja crudă s-a introdus în cutia de aglomerare, în care inițial s-a introdus pe grătar stratul de protecție, se repartizează cât mai uniform pe secțiune instalației și se pornește procesul de aglomerare [77].

Tabelul 5.39. Componența rețetelor aglomeratului experimental

Component, [%]	R1	R2
Șlam de țunder	17	15
Șlam de aglomerare furnale	8	15
Șlam feros	17	15
Țunder	8	6
Zgură de oțelărie – fracția feroasă	33	38
Cocs mărunț	8	8
Resturi de electrozi	8	3

Procesul de aglomerare începe în stratul superficial când se produce aprinderea combustibilului în șarjă și se finalizează când procesele de ardere ajung la gratarul instalației de aglomerare.

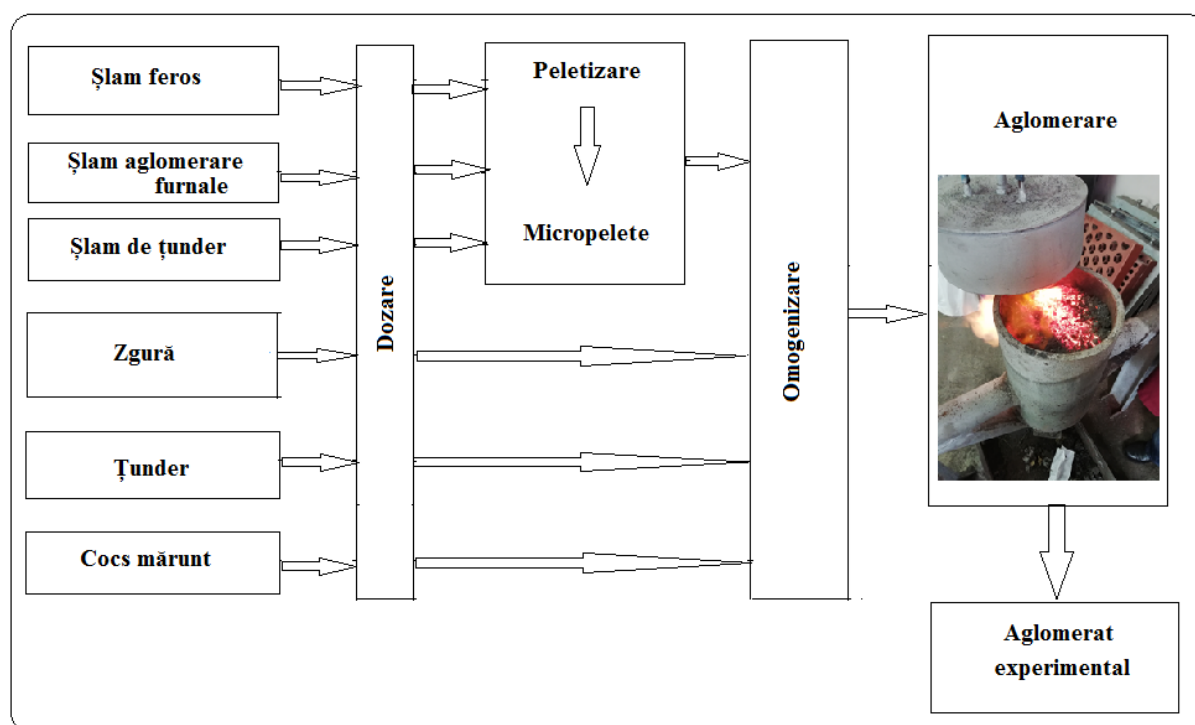


Figura 5.41. Fluxul tehnologic de obținere a aglomeratului experimental

Aspecte din timpul experimentărilor sunt prezentate în figura 5.42. După terminarea procesului de aglomerare s-a evacuat aglomeratul, s-a lăsat să se răcească, după care s-au determinat caracteristicile calitative prezentate în tabelul 5.40-5.41.

Aglomeratul experimental rezultat și vizualizarea acestuia obținută cu ajutorul stereomicroscopului este prezentată în tabelul 5.42.

Tabelul 5.40 Compoziția chimică a aglomeratului experimental

Recipes	Fe [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Cr ₂ O ₃ [%]	Na ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]	Altele [%]
R1	46,12	65,88	13,85	4,95	8,18	3,27	1,46	0,17	0,44	0,24	1,56
R2	42,40	60,57	14,37	4,49	9,87	4,56	1,99	0,44	0,65	0,50	2,56

R₁ - CaO/SiO₂=0,59; R₂ - CaO/SiO₂=0,69

Tabelul 5.41. Indicatori calitativi - șarje experimentale

Clasa granulometrică, [mm]	R1		R2	
	[kg]	[%]	[kg]	[%]
> 50	1,1	11	1,2	11
35 – 50	1,7	17	1,0	9
25 – 35	1,7	17	1,5	14
15 – 25	1,5	15	2,0	19
10 – 15	1,8	18	2,5	23
5 – 10	1,2	12	1,4	12
3 – 5				
< 3	1,0	10	1,4	12
Total	10,0	100	11,0	100

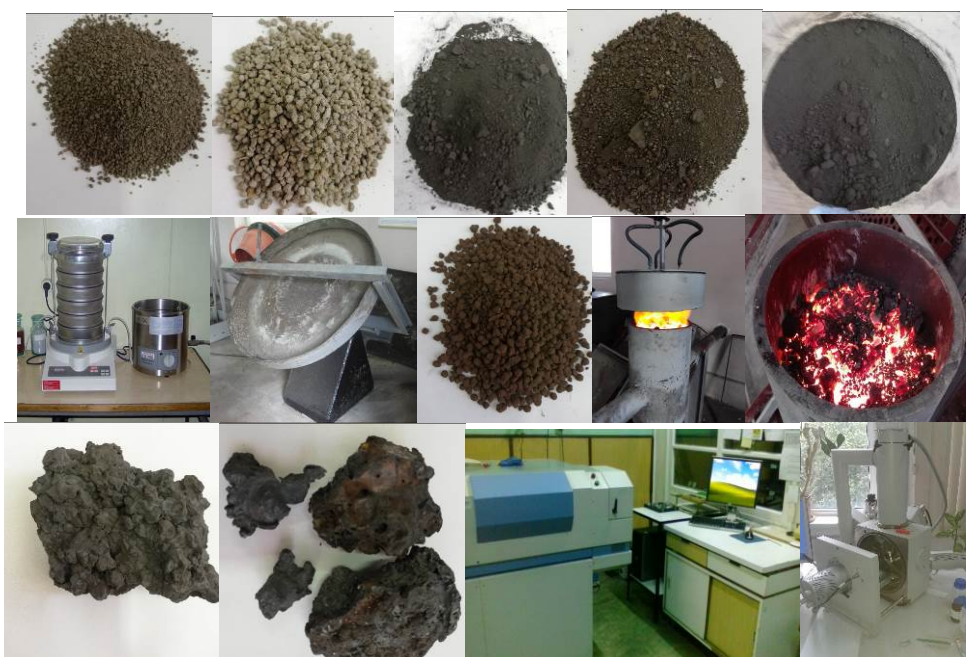






Figura 5.42. Aspecte din timpul obținerii aglomeratului în instalația pilot de aglomerare

Tabelul 5.42 Caracterizare aglomerat experimental

Reteta	Aglomerat experimental	Imagie stereomicroscop
R1		
R2		

Conținutul de fier în aglomeratul experimental are valori cuprinse între 42-46%, funcție de balanța de materii prime. Granulația aglomeratului s-a determinat prin ciuruire. Rezistența mecanică s-a determinat cu ajutorul tobei MICUM. Aglomeratul experimental are rezistența mecanică 10-12% iar fracția 6 - 10 mm este 12%. Porozitatea aglomeratului variază în limitele 40-60%. În concluzie, glomeratul obținut se încadrează în clasa B de calitate.

Indicatorii de calitate sunt legați în special de compoziția chimică, starea fizică a bucăților de aglomerat, rezistența mecanică a acestora, precum și comportarea la cald.

5.3.3. Experimentări în fază de laborator privind valorificarea șlamurilor feroase sub formă de aglomerat

Șlamurile supuse experimentărilor în fază de laborator sunt: șlam feros, șlam de țunder și șlam aglomerare-furnale. Ca și combustibil s-a utilizat pentru procesul de aglomerare cocs mărunț (în proporție de 10%). Compoziția chimică și granulometrică a acestor șlamuri este prezentată în capitolul 4 și în subcapitolul 5.3.2.

Tehnologia de procesare a acestora prin aglomerare, în instalația pilot de aglomerare este prezentată în figura 5.43. Probele de șlam au fost supuse operației de peletizare iar micropeletele obținute s-au utilizat pentru formarea șarjei crude de aglomerare. Componenta rețetei experimentale este prezentată în tabelul 5.43.

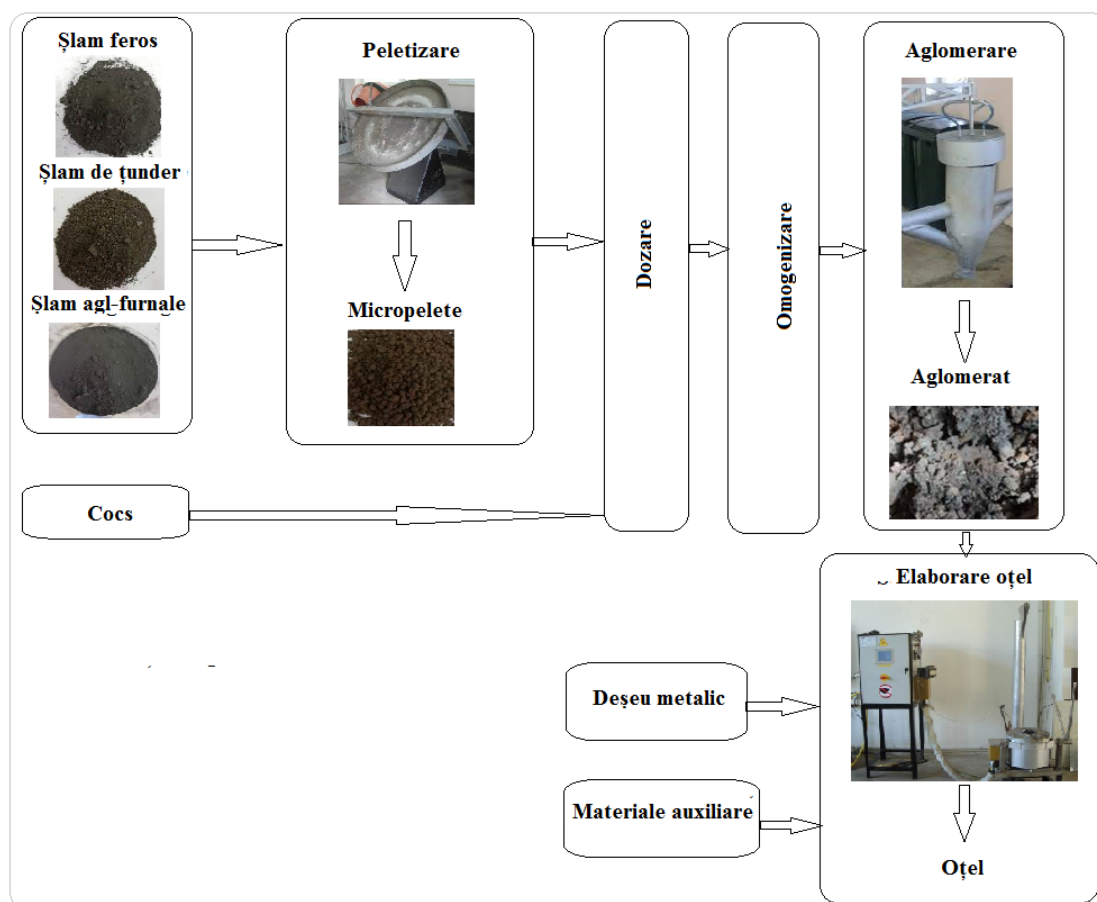


Figura 5.43. Flux tehnologic de procesare a șlamurilor feroase

Tabelul 5.43. Componenta rețetei experimentale

Component	Componenta fracției feroase a rețetei [%]
Șlam feros	50
Șlam de țunder	20
Șlam de aglomerare furnale	10

Produsele obținute și aspectele din timpul experimentărilor de laborator sunt prezentate în figura 5.44. Pentru aglomeratul obținut s-au determinat caracteristicile calitative iar compoziția chimică a acestuia este prezentată în tabelul 5.44.

Tabelul 5.44. Compoziția chimică a aglomeratului experimental





Compoziția chimică, [%]										
Fe _{tot}	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	ZnO	S	Alți oxizi
62,20	88,85	4,54	1,69	1,03	0,61	0,61	0,37	0,16	0,34	1,80



Figura 5.44. Aspecte din timpul experimentărilor de laborator

Procesarea șlamurilor rezultate din industria siderurgică a condus la obținerea unui aglomerat experimental prezentat în tabelul 5.45 [77] precum și macrostructura acestuia realizată cu ajutorul stereomicroscopului digital model 520SZM-D. Analiza topografică și morfologică a aglomeratului experimental este prezentată în Anexa 7.

Tabelul 5.45 Caracterizare aglomerat experimental

Probe	Aglomerat experimental	Imagine stereomicroscop
P1		
P2		

Aglomeratul experimental, obținut din șlamurile feroase, a fost utilizat ca și materie primă la elaborarea oțelului într-un cuptor cu inducție urmând același flux experimental. Pentru formarea băii metalice am utilizat deșeu de oțel în cantitate de 4,5kg șarjă și 3,5kg aglomerat/șarjă, iar pentru corecția compoziției chimice a zgurii un adaos format din: 0,30kg var/șarjă, 0,15kg bentonită/șarjă și 0,15kg/șarjă fluorură și 0,20kg/șarjă grafit. S-a determinat gradul de recuperare a fierului iar rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 5.46-5.50.

Tabelul 5.46. Compoziția chimică a oțelului la topire

Compoziția chimică, [%]					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0,46	0,63	0,32	0,040	0,033	98,54

Tabelul 5.47. Compoziția chimică finală a oțelului

Compoziția chimică, [%]					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0,48	0,61	0,32	0,045	0,035	98,12

Tabelul 5.48. Compoziția chimică a zgurii

Compoziția chimică, [%]									
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S	CaO/SiO ₂
52,40	23,46	8,33	7,10	2,31	2,40	0,85	2,14	0,91	2,24

Tabelul 5.49. Bilanțul încărcăturii

Încărcătura, [kg]					Topitura, [kg]				Gaze	
Deșeu oțel	Aglomerat experimental	Ados 1	Ados 2	Total	Oțel 1	Zgură 1	Oțel 2	Zgură 2	Total topitura	Praf, [kg]
4,50	3,50	0,65	0,15	8,80	4,30	0,20	6,65	1,95	8,70	0,20

Tabelul 5.50. Bilanțul fierului

Fier, [kg]					η _{rec.Fe} , [%]
Fe ₁	Fe ₂	Fe ₂ – Fe ₁	Fe _{agl}	Fe _{zgura}	
4.44	6.53	2.09	2.21	0.028	95.00

Din datele prezentate mai sus, rezultă că aglomeratul experimental produs din deșeuri pulverulente cu conținut de fier (șlam feros) prin ardere poate fi metalizat, ceea ce permite utilizarea acestuia ca și component în încărcătura cuptoarelor pentru elaborarea oțelurilor.

5.3.4. Concluzii

Compoziția rețetelor experimentale pentru producerea aglomeratului în fază pilot depinde de granulația materialelor, conținutul de Fe_{total} (în limitele celui existent în minereurile utilizate la aglomerare) și de conținutul de carbon.

Din analiza datelor experimentale în fază de laborator, referitoare la procesarea deșeurilor prin aglomerare, rezultă următoarele:

- deșeurile feroase pulverulente și mărunte, rezultate din industria siderurgică, procesate prin aglomerare sunt: șlamul feros, țunder, șlamul de țunder, șlamul de aglomerare-furnale, zgura de oțelărie – fracția feroasă;

- subprodusul rezultat (aglomeratul) are un conținut de fier de peste 42% și poate fi utilizat în încărcătura agregatelor de elaborare a oțelului ca și materie primă în proporție de 5-25% în funcție de conținutul de fier și gradul de recuperare al acestuia.

La procesarea prin aglomerare s-au obținut următoarele subproduse:

- aglomerat din șlam feros cu un conținut de fier de 54-60% și un grad de recuperare al fierului de 94%;

- aglomerat din șlam feros, țunder și zgură de oțelărie cu un conținut de fier de 42-46%;

- aglomerat din șlamuri (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale) cu un conținut de fier de 62-65% și un grad de recuperare al fierului de 95%.

Referitor la produsele obținute din procesarea deșeurilor cu un conținut de fier total cuprins între 30%-65% dar de compoziție chimică bine cunoscută se poate aprecia că acestea pot fi luate în considerație ca un component în încărcătura cuptoarelor cu arc electric în proporție de 4-5%, având în vedere și faptul că în practică de multe ori o parte din scoarțe (provenite din zgură) au conținut de fier în aceste limite.

5.4. Experimentări în fază de laborator pentru valorificarea deșeurilor sub formă de pelete

Varianta procesării deșeurilor prin peletizare s-a realizat cu adaos de lianți, în vederea valorificării deșeurilor sub formă de pelete ca și materie primă în cuptoarele de elaborare a oțelului [81-84].

S-au experimentat 10 rețete, pentru formarea șarjei crude s-a utilizat șlam feros, la 5 rețete s-a utilizat ca și liant 5-10% bentonite iar la 5 rețete 5-10% zgură de LF.

Fluxul tehnologic de procesare a peletelor este prezentat în figura 5.45. Peletele experimentale au fost supuse durificării în cuptor conform diagramei din figura 5.6.

Aspectele din timpul procesării deșeurilor cu obținerea de subproduse sunt prezentate în figura 5.46.

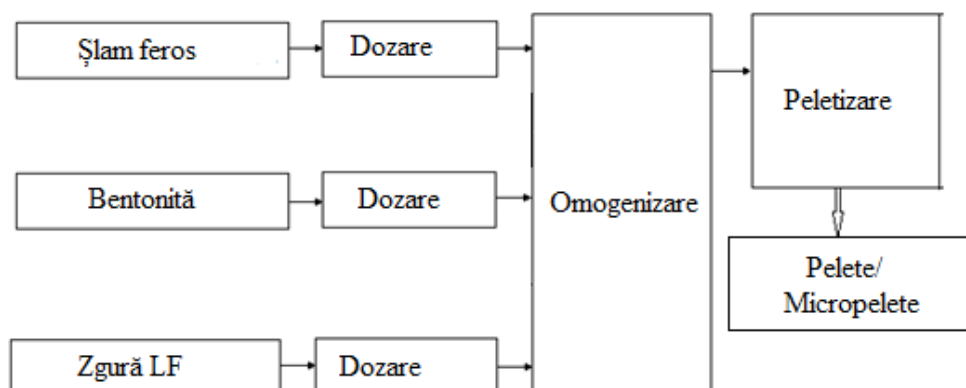


Figura 5.45. Flux tehnologic de peletizare [82]













Figura 5.46. Aspecte din timpul experimentărilor de laborator

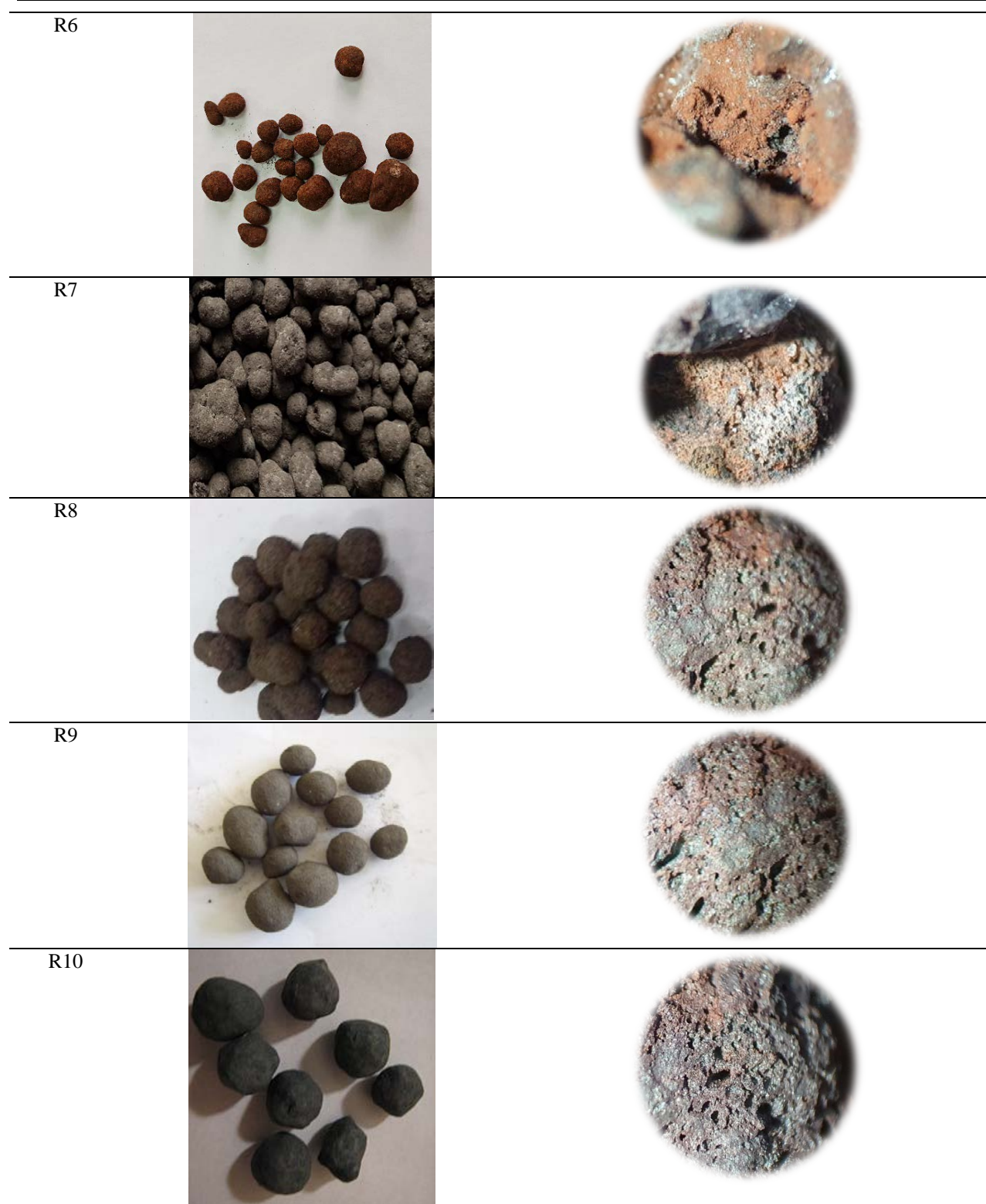
Compoziția chimică a peletelor obținute este prezentată în tabelul 5.51, peletele experimentale și imaginea la stereomicroscop a acestora sunt prezentate în tabelul 5.52. Din fiecare lot de pelete au fost alese pelete cu diametrul 12-15mm pentru care s-a determinat rezistența la compresiune, datele experimentale fiind prezentate în tabelul 5.53.

Tabelul 5.51. Compoziția chimică a peletelor/micropeletelor

Compoziția chimică, [%] ASTM E 1479/2016												
Al	Ca	Cu	Cr	Mg	Mn	Ni	Si	Fe	W	S	Na	Alte el.
1,16	3,44	0,13	0,06	0,63	0,41	0,03	3,13	75,18	1,68	0,13	0,26	13,76

Tabelul 5.52. Pelete experimentale

Reteta	Pelete – stare cruda	Imagine stereomicroscop - pelete durificate
R1		
R2		
R3		
R4		
R5		

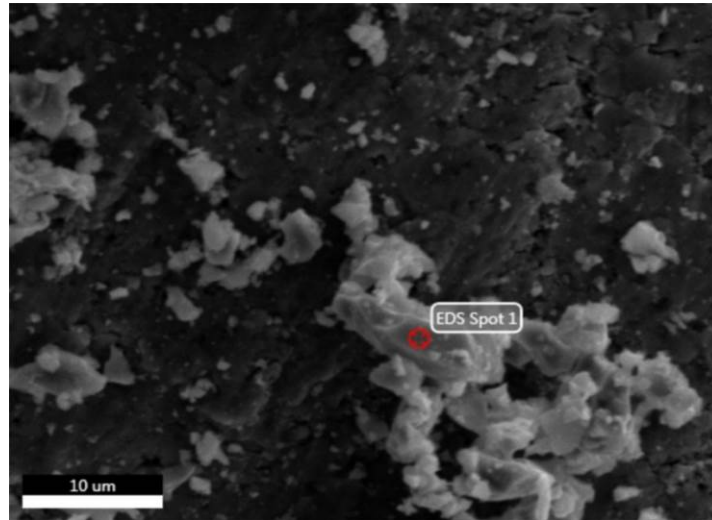


Analiza EDS/SEM a probelor prelevate precum și analiza liniară efectuată este prezentată în figurile 5.47-5.49.

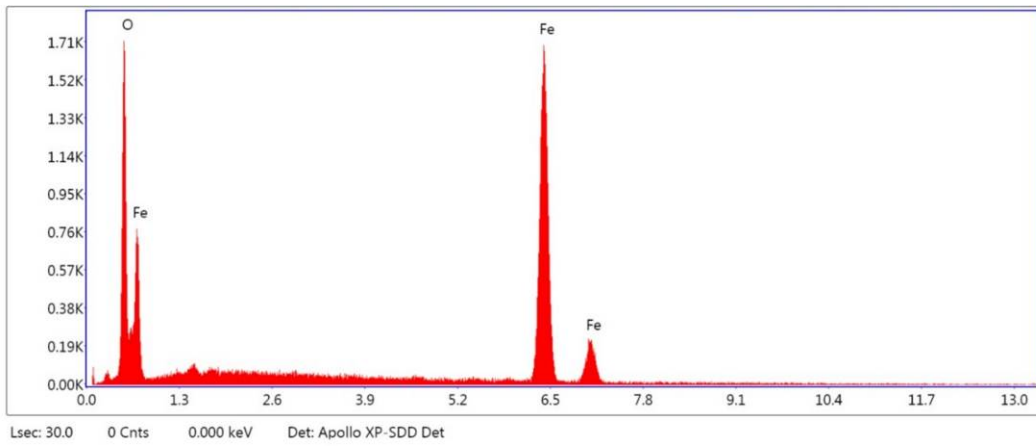
Analiza topografică și morfologică a peletelor experimentale este prezentată în Anexa 8.

Tabelul 5.53. Rezistența la compresiune a peletelor

Rezistența la compresiune a peletelor [daN/peletă]									
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
178	172	167	157	175	180	175	170	177	178

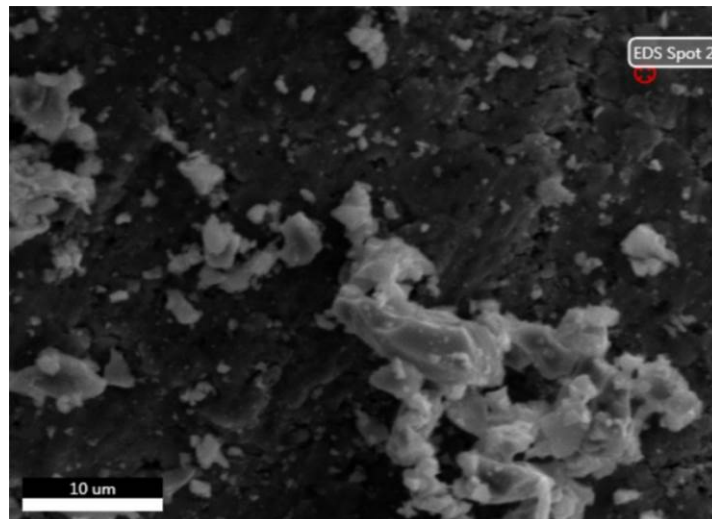


(a) Imagine SEM

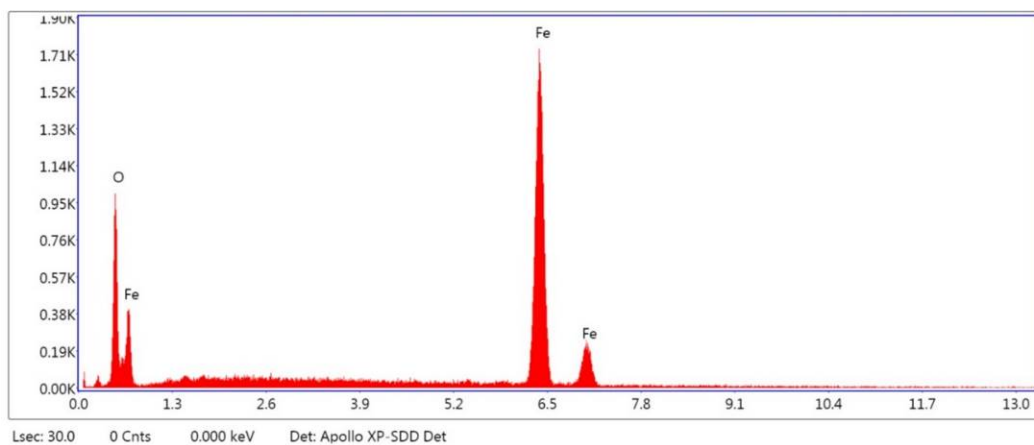


(b) spectrul EDS (47,77%Fe)

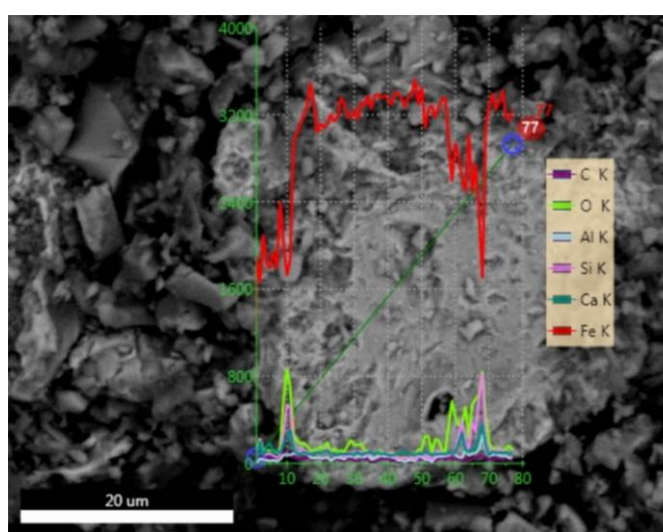
Figura 5.47. Rezultatele analizei EDS (Spot 1)



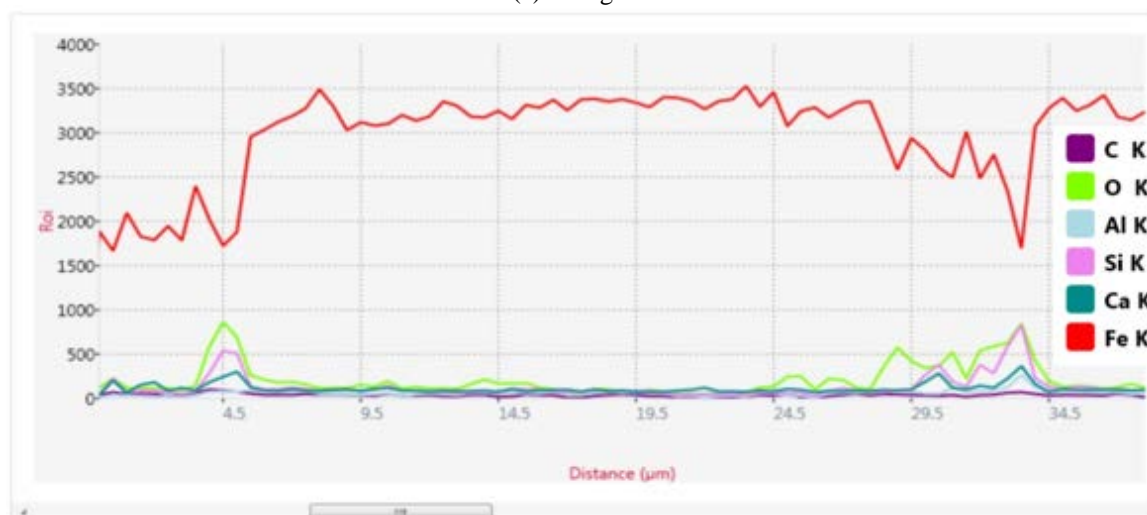
(a) imagine SEM



(b) spectrul EDS (60.88%Fe)

Figura 5.48. Rezultatele analizei EDS (Spot 2)

(a) imagine SEM



(b) Spectrul EDS (analiza liniara)

Figura 5.49. Rezultatele analizei liniare EDS pentru peletele experimentale

Valorile obținute pentru rezistența la compresiune a peletelor arse confirmă faptul că aceste subproduse obținute au rezistența necesară pentru manipulare și transport la agentul economic și pot destinate pentru încărcarea în cuptoarele de elaborare a oțelului.

Pentru determinarea randamentului de recuperare a fierului din peletele experimentale obținute s-au efectuat experimentări într-un cuptor cu inducție utilizând același flux experimental de elaborare și turnare a șarjei de oțel în laborator. Pentru formarea băii metalice s-a utilizat deșeu de oțel 4,5kg șarjă și 3,5kg pelete/șarjă, iar adaosurile au fost: 0,30kg var/șarjă, 0,15kg bentonită/șarjă și 0,15kg fluorură. S-au elaborat 2 șarje de oțel. În tabelele 5.54-5.58 se prezintă bilanțul încărcăturii și rezultatele analizelor de laborator, referitoare la probele finale de oțel și zgură, precum și a calculelor tehnologice.

Tabelul 5.54. Compoziția chimică a oțelului la topire

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,46	0,63	0,31	0,042	0,034	98,524
2	0,45	0,65	0,31	0,037	0,032	98,521

Tabelul 5.55. Bilanțul încărcăturii

Nr crt	Încărcătura, [kg]					Topituri, [kg]				Gaze praf [kg]	
	Deșeu oțel	Pelete reduce	¹ Adaos 1	² Adaos 2	Total	Oțel 1	Zgură 1	Oțel 2	Zgură 2		³ Tot. topit.
1	4,45	3,53	0,62	0,11	8,71	4,27	0,18	6,02	1,47	7,67	0,17
2	4,51	3,48	0,57	0,11	8,62	4,43	0,17	6,02	1,67	7,86	0,19

1) var + fluorină+bauxită; 2)siliciomangan+aluminii; 3) oțel 2+zgura 1 + zgura 2.

Tabelul 5.56. Compoziția chimică a oțelului

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]					
	C	Mn	Si	P	S	Fe
1	0,48	0,60	0,32	0,045	0,035	98,13
2	0,47	0,66	0,33	0,041	0,035	98,07

Tabelul 5.57. Compoziția chimică a zgurii

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]									CaO/SiO ₂
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	FeO	MnO	P ₂ O ₅	S	
1	51,41	22,45	8,42	7,02	4,21	2,52	0,83	2,23	1,01	2,29
2	52,14	22,05	8,56	7,05	4,05	2,09	0,85	2,15	1,06	2,36

Tabelul 5.58. Bilanțul fierului

Nr. șarjă	Fier, [kg]					η _{rec.Fe} , [%]
	¹ Fe ₁	² Fe ₂	Fe ₂ – Fe ₁	Fe _{pelete}	Fe _{zgură}	
1	4,207	5,908	1,701	1,731	0,028	95,13
2	4,368	5,906	1,638	1,675	0,031	96,522

1)Cantitatea de fier din oțel înaintea adaosului de pelete metalizate; 2)Cantitatea de fier din oțel după adaosul de pelete

Gradul de recuperare a fierului din pelete se determină cu relația:

$$\eta_{recFe} = \frac{Fe_2 - Fe_1}{Fe_{pelete}} \cdot 100, [\%] \quad (5.8)$$

unde: η_{rec Fe} este gradul de recuperare a fierului din pelete;
Fe₁- cantitatea de fier din oțel înaintea adaosului de pelete;
Fe₂- cantitatea de fier din oțel după adaosul de pelete.

Determinarea rezistenței la compresiune pentru peletele crude și arse confirmă faptul că asemenea deșeuri pot fi valorificate prin peletizare iar peletele obținute au rezistența necesară pentru manipulare și transport la agentul economic pentru încărcarea în cuptoarele de elaborare a oțelului. Din datele prezentate mai sus, rezultă că peletele produse din deșeuri pulverulente cu

conținut de fier/fier și carbon prin ardere pot fi metalizate, ceea ce permite utilizarea acestora ca și component în încărcătura cuptoarelor pentru elaborarea oțelurilor.

În concluzie, la procesarea șlamului feros prin peletizare s-au obținut pelete cu un conținut de fier 60-67% și un grad de recuperare al acestuia de 95-96%.

5.5. Concluzii

Din analiza caracteristicilor calitative (compoziție chimică și granulometrică) a deșeurilor utilizate la experimentări rezultă următoarele:

- deșeurile analizate au conținut de fier diferit de la circa 30% în zgura de oțelărie până la aproximativ 85% în șlamurile feroase;

- din punct de vedere a compoziției chimice și granulometrice deșeurile pot fi valorificate prin reciclare, alegerea tehnologiei experimentale a avut în vedere caracteristicile calitative a deșeurilor precum și destinația produsului rezultat (brichete/aglomerat/pelete);

- valorificarea deșeurilor prin procedeele clasice (brichetare/aglomerare/peletizare) asigură subproduse (cu oxizi de fier avansat reduși) utilizabile ca și materie primă feroasă în industria siderurgică în sectorul de elaborare a oțelului.

Rețetelor experimentale au fost stabilite pentru fiecare tehnologie de procesare, astfel:

- Rețete brichete:

- 10 rețete având în componență – șlam feros;
- 4 loturi a câte 12 rețete având în componență – șlamuri feroase și țunder;
- 9 rețete având în componență – șlamuri feroase, țunder și zgură de oțelărie;
- 10 rețete având în componență – șlamuri feroase;
- 10 rețete având în componență – șlamuri feroase și praf de oțelărie;

- Rețete aglomerat:

- 2 rețete având în componență – șlam feros;
- 2 rețete având în componență – șlamuri feroase, țunder și zgură de oțelărie;
- 2 rețete având în componență – șlamuri feroase;

- Rețete pelete:

- 10 rețete având în componență – șlam feros.

Experimentările în fază de laborator efectuate cu privire la posibilitățile de valorificare a deșeurilor feroase pulverulente au condus la obținerea de **subproduse experimentale: brichete, aglomerat și pelete.**

Din analiza procesului de procesare a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente, rezultate din industria siderurgică, în vederea valorificării, rezultă următoarele concluzii:

- a) deșeurile feroase pulverulente și mărunte, procesate prin brichetare/aglomerare/peletizare sunt: șlamul feros, țunder, șlamul de țunder, șlamul de aglomerare-furnale, zgura de oțelărie – fracția feroasă și praful de oțelărie;
- b) **subprodusele experimentale rezultate (brichete/aglomerat/pelete)** au un conținut de fier de 42-80% și pot fi utilizate în încărcătura agregatelor de elaborare a oțelului ca și materie primă în proporție de 5-25%;
- c) alegerea variantei de procesare respectiv a subprodusului (brichete/aglomerat/pelete) rezultat se face în funcție de sortimentele de deșuri disponibile, adaosurile de lianți, apă și finețea granulometrică a acestora precum și de tehnologiile existente;
- d) reintroducerea în circuitul economic a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente sub formă de brichete, aglomerat sau pelete în diverse procente din încărcătura feroasă a agregatelor siderurgice prezintă avantaje de ordin economic dar și ecologic.

Abordarea, rezolvarea și implementarea tehnologiilor de valorificare a deșeurilor feroase depinde de natura materialelor supuse procesării (feroase pulverulente și mărunte) și de forma produsului finit (brichete/aglomerat/pelete), sub care sunt procesate aceste materiale. Procesarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente poate fi realizată prin diferite procedee, alegerea trebuie făcută de procesator, care trebuie să aibă în vedere cererea de produse rezultate, aspectele de ordin economic și ecologic.

CAPITOLUL 6

OPTIMIZAREA STRUCTURII REȚETELOR EXPERIMENTALE LA PROCESAREA DEȘEURILOR SUB FORMĂ DE BRICHETE

Modelarea matematică a datelor experimentale s-a efectuat aplicând metoda proiectării experimentelor, metoda celor mai mici pătrate și algoritmi genetici.

Pentru stabilirea unor relații de corelație între factorii tehnologici de rezistență la compresiune a brichetelor experimentale, datele au fost prelucrate în programul de calcul Matlab, optimizarea făcându-se utilizând algoritmi genetici.

Cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns [85-87] se determină în continuare legătura dintre parametrii acestui proces și răspunsurile caracteristice ale acestuia ca suprafețe în spațiul multidimensional al variabilelor. În experimentele conduse după această metodă, variabilele independente sunt variate simultan, luând un număr limitat de valori în domeniul de experimentare considerat, numite nivele. Cu ajutorul acestei metode, deși cele trei variabile independente sunt variate simultan, efectele lor principale și de ordin superior, precum și interacțiunile dintre ele se pot determina separat. Modificarea variabilelor independente va duce automat la modificarea datelor de ieșire. Rezultatele astfel obținute pot fi folosite la îmbunătățirea performanțelor procesului studiat.

Considerând cazul unui proces cu trei parametri x_1 , x_2 , x_3 care pot fi variați în limitele $x_{1a} \leq x_1 \leq x_{1b}$, $x_{2a} \leq x_2 \leq x_{2b}$ și respectiv $x_{3a} \leq x_3 \leq x_{3b}$, suprafața din planul variabilelor independente reprezintă regiunea experimentală, iar punctele acestei suprafețe, având coordonate diferite triplete de valori (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}) ale parametrilor, reprezintă puncte experimentale. Suprafața pe care se află răspunsurile corespunzătoare fiecărui punct experimental reprezintă suprafața de răspuns a caracteristicii considerate a procesului.

Modelele de ordinul al doilea aproximează cel mai bine suprafețele de răspuns numite și *suprafețe de regresie*:

$$f(x_1, x_2, x_3) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_3^2 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_2 x_3 + \varepsilon \quad (6.1)$$

În notație matriceală relația (1) devine

$$[y] = [x]^T [\beta] + [\varepsilon] \quad (6.2)$$

unde $[x]$ reprezintă vectorul factorilor și contribuțiilor lor asupra modelului

$$[x]^T = \left[1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_1^2 \quad x_2^2 \quad x_3^2 \quad x_1 x_2 \quad x_1 x_3 \quad x_2 x_3 \right] \quad (6.3)$$

$[y]$ reprezintă vectorul observațiilor răspunsului în cele N experimente, $[\varepsilon]$ reprezintă vectorul erorilor de măsurare, iar $[\beta]$ este vectorul coeficienților suprafeței de regresie

$$[\beta] = \left[\beta_0 \quad \beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad \beta_4 \quad \beta_5 \quad \beta_6 \quad \beta_7 \quad \beta_8 \quad \beta_9 \right] \quad (6.4)$$

care urmează a fi determinați.

Pentru determinarea coeficienților β ai suprafeței de răspuns cu ajutorul datelor experimentale, cea mai indicată este metoda celor mai mici pătrate [85,87-89], care asigură o dispersie minimă a coeficienților determinați.

În acest scop, se consideră *funcția obiectiv* de forma

$$F(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_9) = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_1, x_2, x_3))^2 \quad (6.5)$$

Rezultă că determinarea coeficienților suprafeței de răspuns este echivalentă cu următoarea problemă de minimizare a funcției obiectiv:

$$\min_{\beta} F(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_9) = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_1, x_2, x_3))^2 \quad (6.6)$$

ceea ce conduce la un sistem ecuații algebrice de tipul:

$$\frac{\partial F(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_9)}{\partial \beta_0} = 0, \dots, \frac{\partial F(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_9)}{\partial \beta_9} = 0 \quad (6.7)$$

Practic, coeficienții suprafeței de răspuns care modelează procesul în studiu sunt dați de expresia:

$$[\beta] = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T [Y] \quad (6.8)$$

Pentru validarea modelului de regresie este necesară calcularea coeficientului de corelație R^2 , care măsoară „apropierea” suprafeței de răspuns de punctele experimentale și are expresia

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} \quad (6.9)$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^N (f(x_1, x_2, x_3) - y_i)^2, \quad SS_T = \sum_{i=1}^N (f(x_1, x_2, x_3) - \bar{y})^2, \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6.10)$$

unde SS_R reprezintă suma pătratelor erorilor față de observațiile experimentale, iar SS_T măsoară variația totală a celor N observații.

Problema determinării parametrilor optimali care maximizează suprafața de răspuns a fost rezolvată utilizând algoritmi genetici [90-93]:

$$\max_{(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}} f(x_1, x_2, x_3) \quad (6.11)$$

6.1. Modelarea matematică a procesului de valorificare a zgurii de oțelărie sub formă de brichete

Pentru stabilirea unor relații de corelație între factorii tehnologici de rezistență la compresiune a brichetelor experimentale obținute din deșeuri feroase mărunte și pulverulente (zгурă de oțelărie, țunder și șlam de aglomerare furnale), datele au fost prelucrate în programul de calcul Matlab, optimizarea făcându-se utilizând algoritmi genetici.

În cadrul optimizării efectuate s-au efectuat următoarele notații:

x_1 – Țunder, %;

x_2 – Zgură, %;

x_3 – Șlam aglomerare furnale, %;

y_1 – R_f – rezistența la fisurare, N/mm^2 ;

y_2 – R_s – rezistența la sfărâmare, N/mm^2 ;

y_3 – $I_s = R_s - R_f$ - Intervalul de sfărâmare, N/mm^2 .

Aplicând metoda proiectării experimentelor (Design Of Experiments) [88-90] s-a generat tabloul experimentelor necesare realizate în cazul a trei parametrii (factori), în care factorii iau valorile extreme și centrale în domeniile lor de variație (tabelul 6.1). Un asemenea tablou de experimente se numește design experimental central sau de tip Box-Behnken [88-90]. Anexa 9

prezintă rețetele realizate după modelul Box-Behnken, în care factorii se încadrează în următoarele limite: $20 \leq x_1 \leq 100$, $0 \leq x_2 \leq 70$, $0 \leq x_3 \leq 10$ [49, 94].

Tabelul 6.1. Tabloul experimentelor pentru valorificarea zgurii de oțelărie sub formă de brichete

Nr. rețetă	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	20	18	40	2	3	1
2	15	18	45	4	6	2
3	22	15	40	3	5	2
4	20	20	33	2	4	2
5	20	18	40	3	6	3
6	25	18	35	4	8	4
7	20	25	35	2	5	3
8	15	30	35	3	6	3
9	30	15	35	4	7	3
10	40	20	18	4	9	5

Suprafața de răspuns care modelează rezistența la fisurare y_1 în funcție de parametrii x_1 – Țunder, x_2 – Zgură, x_3 – Șlam aglomerare furnale, are expresia:

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = -4.4 + 1.19x_1 - 0.63x_2 + 0.22x_3 + 0.0010x_1x_2 - 0.0284x_1x_3 + 0.0130x_2x_3 \quad (6.12)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 50,66\%$

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.2. Suprafața de răspuns (6.12) și liniile de contur aferente sunt prezentate în figura 6.1 pentru valoarea medie a parametrului x_1 [49].

Tabelul 6.2. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_1

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}$	Valoare maximă y_1^{max}
(25.0000, 22.0000, 30.0000)	5.92

Suprafața de răspuns care modelează rezistența la sfărâmare y_2 în funcție de parametrii x_1 – Țunder, x_2 – Zgură, x_3 – Șlam aglomerare furnale, are expresia:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 33 + 0.54x_1 - 2.47x_2 + 0.33x_3 + 0.059x_1x_2 - 0.0527x_1x_3 + 0.0232x_2x_3 \quad (6.13)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 66,41\%$

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.3. Suprafața de răspuns (6.13) și liniile de contur aferente sunt prezentate în figura 6.2 pentru valoarea medie a parametrului x_2 .

Tabelul 6.3. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_2

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}$	Valoare maximă y_2^{max}
(25.0000, 22.0000, 30.0000)	10.297

Suprafața de răspuns care modelează intervalul de sfărâmare y_3 în funcție de parametrii x_1 – Țunder, x_2 – Zgură, x_3 – Șlam aglomerare furnale, are expresia:

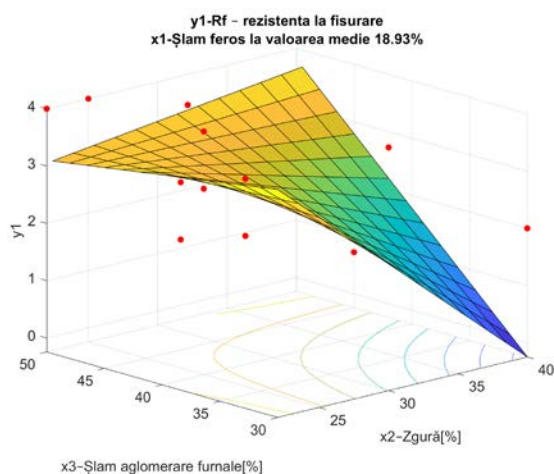
$$y_3(x_1, x_2, x_3) = 37.7 - 0.65x_1 - 1.84x_2 + 0.112x_3 + 0.0578x_1x_2 - 0.0243x_1x_3 + 0.0102x_2x_3 \quad (6.14)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 75,53\%$.

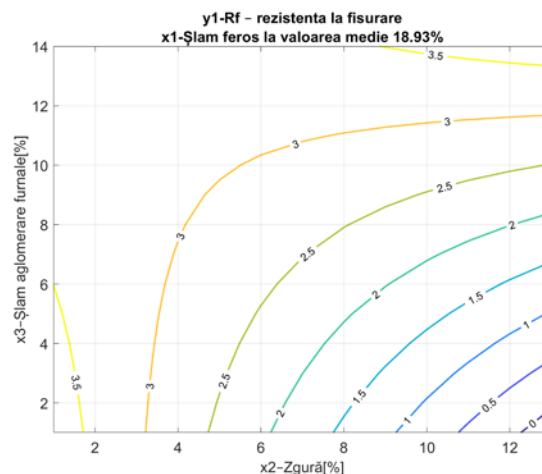
Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.4. Suprafața de răspuns (6.14) și liniile de contur sunt prezentate în figura 6.3 pentru valoarea medie a parametrului x_3 .

Tabelul 6.4. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_3

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{optim}$	Valoare maximă y_3^{max}
(15.0000, 22.0000, 30.0000)	5.7010

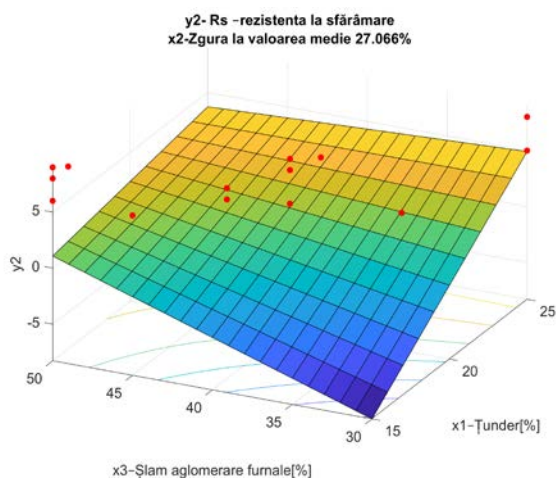


a. Suprafața de regresie $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$

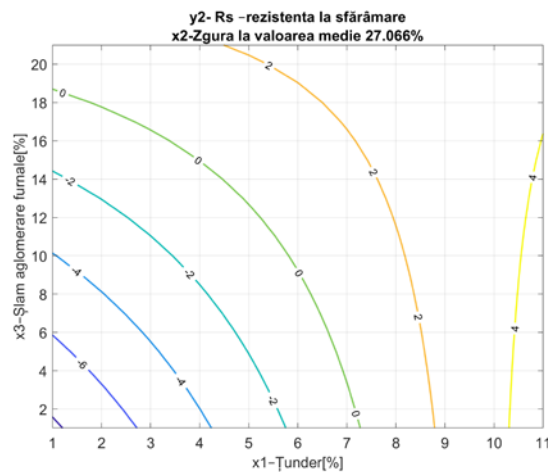


b. Curbele de nivel

Figura 6.1. $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$



a. Suprafața de regresie $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$



b. Curbele de nivel

Figura 6.2. $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$

Domeniile optime de variație (din punct de vedere al compoziției chimice și a rezistenței la compresiune) a componentelor care alcătuiesc brichetele sunt: 20-40% țunder; 15-25% zgură și 30-40% șlam aglomerare furnale.

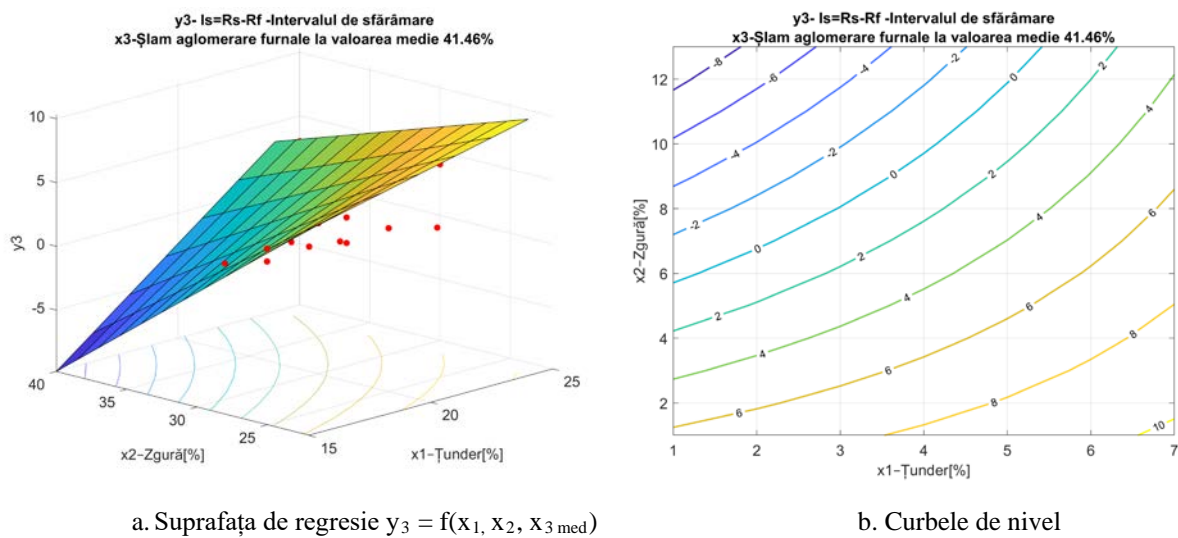


Figura 6.3. $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$

În funcție de disponibilul de materie primă (șlamuri/zguri/țunder) se realizează brichete cu un conținut de fier de 48-55% și o rezistență la compresiune corespunzătoare utilizării subproduselor la cuptorul electric cu arc.

6.2. Modelarea matematică a procesului de valorificare a șlamurilor sub formă de brichete

Pentru stabilirea unor relații de corelație între factorii tehnologici de rezistență la compresiune a brichetelor experimentale obținute din șlamurile feroase (șlamul feros, șlamul de țunder și șlamul de aglomerare furnale), datele au fost prelucrate în programul de calcul Matlab, optimizarea făcându-se utilizând algoritmi genetici.

În cadrul optimizării efectuate s-au efectuat următoarele notații:

- x_1 – Șlam feros, %
- x_2 – Șlam de țunder, %
- x_3 – Șlam aglomerare furnale, %
- y_1 – R_f – rezistența la fisurare, N/mm^2
- y_2 – R_s – rezistența la sfărâmare, N/mm^2
- y_3 – $I_s = R_s - R_f$ -Intervalul de sfărâmare, N/mm^2

Alicând metoda proiectării experimentelor (Design Of Experiments) [88-90] s-a generat tabloul experimentelor necesare, realizate în cazul a trei parametri (factori), în care factorii iau valorile extreme și centrale în domeniile lor de variație (tabelul 6.5). Un asemenea tablou de experimente se numește design experimental central sau de tip Box-Behnken [88-90]. Anexa 9 prezintă rețete realizate după modelul Box-Behnken, în care factorii se încadrează în următoarele limite: $20 \leq x_1 \leq 100$, $0 \leq x_2 \leq 70$, $0 \leq x_3 \leq 10$.

Suprafața de răspuns care modelează rezistența la fisurare y_1 în funcție de parametrii x_1 – Șlam feros, x_2 – Șlam de țunder, x_3 – Șlam aglomerare furnale, are expresia

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = 4.00 + 0.0219x_1 + 0.0393x_2 - 0.025x_3 + 0.000156x_1^2 - 0.000612x_2^2 - 0.0200x_3^2 + 0.00125x_1x_3 + 0.00429x_2x_3 \quad (6.15)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 88.62\%$.

Tabelul 6.5. Tabloul experimentelor pentru valorificarea șlamurilor feroase sub formă de brichete

Nr. rețetă	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	100	0	0	7	14	7
2	95	2	3	5	8	3
3	90	5	5	4	6	2
4	80	10	10	5	10	5
5	70	20	10	6	12	6
6	60	30	10	4	8	4
7	50	40	10	4	7	3
8	40	50	10	6	10	4
9	30	60	10	7	12	5
10	20	70	10	5	8	3

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.6. Suprafața de răspuns (6.15) și liniile de contur aferente sunt prezentate în Figura 6.4 pentru valoarea medie a parametrului x_1 .

Tabelul 6.6. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_1

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}$	Valoare maximă y_1^{max}
(100.0000, 65.4843, 9.5232)	9.5130

Suprafața de răspuns care modelează rezistența la sfărâmare y_2 în funcție de parametrii x_1 – Șlam feros, x_2 – Șlam de țunder, x_3 – Șlam aglomerare furnale, are expresia:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = 10.00 + 0.0563x_1 - 0.0119x_2 + 0.117x_3 - 0.000104x_1^2 - 0.000340x_2^2 - 0.0567x_3^2 + 0.000179x_1x_2 + 0.00375x_1x_3 + 0.00857x_2x_3 \quad (6.16)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 88.50\%$.

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.7. Suprafața de răspuns (6.16) și liniile de contur aferente sunt prezentate în figura 6.5 pentru valoarea medie a parametrului x_2 .

Tabelul 6.7. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_2

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}$	Valoare maximă y_2^{max}
(100.0000, 70.000, 9.6293)	18.6088

Suprafața de răspuns care modelează intervalul de sfărâmare y_3 în funcție de parametrii x_1 – Șlam feros, x_2 – Șlam de țunder, x_3 – Șlam aglomerare furnale, are expresia:

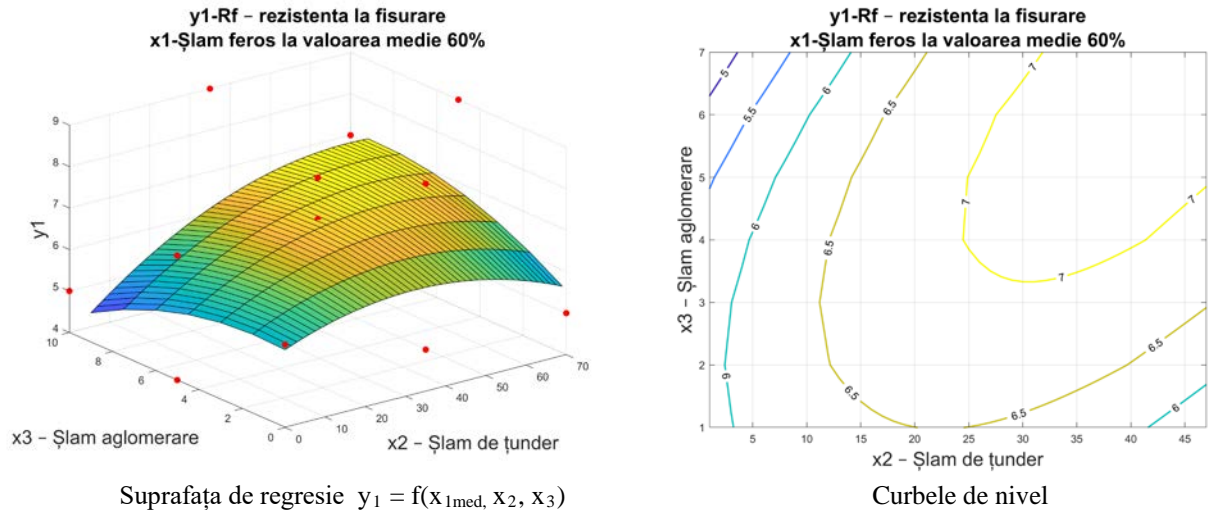
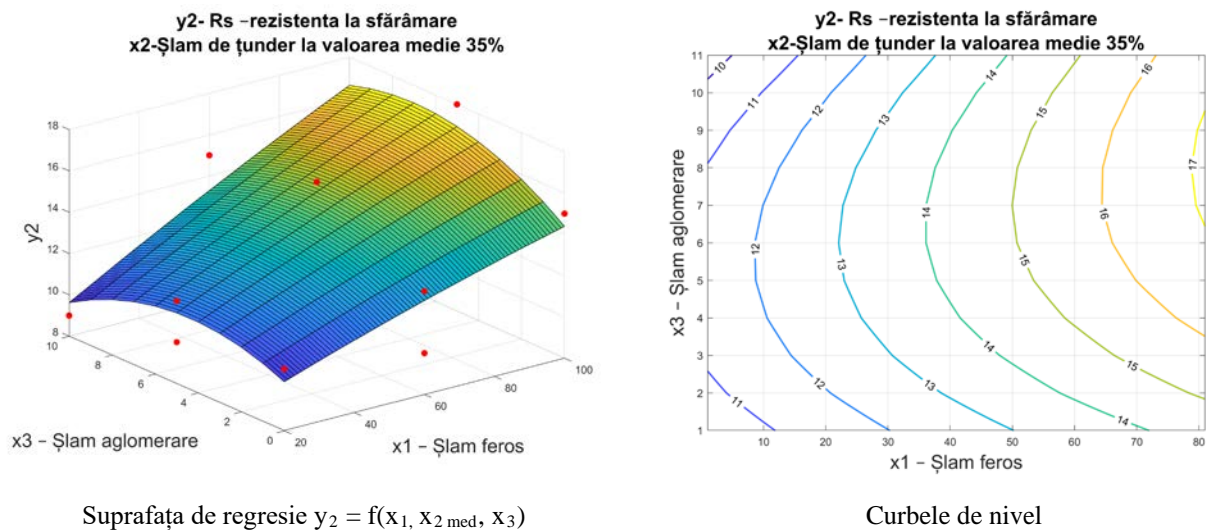
$$y_3(x_1, x_2, x_3) = 5.03 + 0.0531x_1 - 0.0298x_2 + 0.092x_3 - 0.000339x_1^2 + 0.000170x_2^2 - 0.0317x_3^2 + 0.00250x_1x_3 + 0.00429x_2x_3 \quad (6.17)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 76.51\%$.

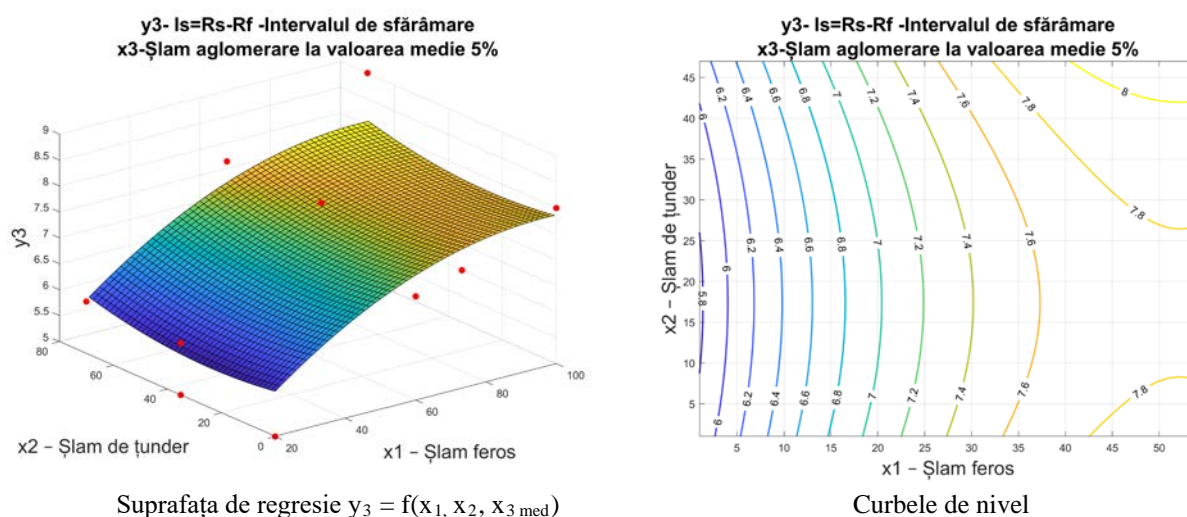
Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.8. Suprafața de răspuns (6.17) și liniile de contur sunt prezentate în figura 6.6 pentru valoarea medie a parametrului x_3 .

Tabelul 6.8. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_3

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{optim}$	Valoare maximă y_3^{max}
(100.0000, 70.0000, 10.0000)	8.9500

**Figura 6.4. $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$** **Figura 6.5. $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$**

Din analiza corelațiilor prezentate (suprafețe de regresie și curbe de nivel) se constată că pentru valori ale șlamului de țunder cuprinse în intervalul 15-50%, valori ale șlamului de aglomerare în intervalul 5-10% respectiv pentru valori ale șlamului feros 40-100% se obțin valori foarte bune pentru rezistența la fisurare $R_f \geq 6,5N/mm^2$.

Suprafața de regresie $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$

Curbele de nivel

Figura 6.6. $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$

Cele mai bune rezultate (din punct de vedere al compoziției chimice și a rezistenței la compresiune) se obțin pentru brichetele în componența cărora intră șlamul feros (90-100%). În funcție de disponibilul de materie primă (șlamuri) rezultate comparabile se obțin prin înlocuirea șlamului feros cu șlamul de tunder în rețete până la max 50% respectiv maxim 10% șlam de aglomerare furnale.

6.3. Modelarea matematică a procesului de valorificare a deșeurilor feroase pulverulente sub formă de brichete

S-au efectuat următoarele notații:

x_1 – Șlam feros, %

x_2 – Praf de oțelărie, %

x_3 – Zgură LF, %

y_1 – R_f – rezistența la fisurare, N/mm^2

y_2 – R_s – rezistența la sfărâmare, N/mm^2

y_3 – $I_s=R_s-R_f$ -Intervalul de sfărâmare, N/mm^2

Alicând metoda proiectării experimentelor (Design Of Experiments) [88-90] vom genera tabloul experimentelor necesare a fi realizate în cazul a trei parametrii (factori), în care factorii iau valorile extremale și centrale în domeniile lor de variație (tabelul 6.9). Un asemenea tablou de experimente se numește design experimental central sau de tip Box-Behnken [88-90]. Anexa 9 prezintă rețetele realizate după modelul Box-Behnken, în care factorii se încadrează în următoarele limite: $20 \leq x_1 \leq 100$, $0 \leq x_2 \leq 70$, $0 \leq x_3 \leq 10$.

Tabelul 6.9. Tabloul experimentelor pentru valorificarea deșeurilor pulverulente sub formă de brichete

Nr. rețetă	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3
1	60	35	5	6	14	8
2	55	40	5	5	10	5
3	50	45	5	4	6	2
4	45	50	5	3	6	3
5	40	55	5	2	4	2
6	70	20	10	6	15	9
7	60	30	10	4	9	5
8	50	40	10	6	12	6
9	40	50	10	4	8	4
10	30	60	10	3	6	3

Suprafața de răspuns care modelează rezistența la fisurare y_1 în funcție de parametrii x_1 – Șlam feros, x_2 – Praf de oțelărie, x_3 – Zgură LF, are expresia:

$$y_1(x_1, x_2, x_3) = -14.54 + 0.375x_1 + 0.298x_2 + 0.70x_3 - 0.00148x_1^2 - 0.002083x_2^2 - 0.0133x_3^2 - 0.00167x_1x_2 - 0.00667x_1x_3 - 0.00500x_2x_3 \quad (6.18)$$

având un coeficient de corelație: $R^2=93,29\%$.

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.10. Suprafața de răspuns (6.18) și liniile de contur aferente sunt prezentate în figura 6.7 pentru valoarea medie a parametrului x_1 .

Tabelul 6.10. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_1

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}$	Valoare maximă y_1^{max}
(60.0000, 41.4791, 5.0000)	7.3823

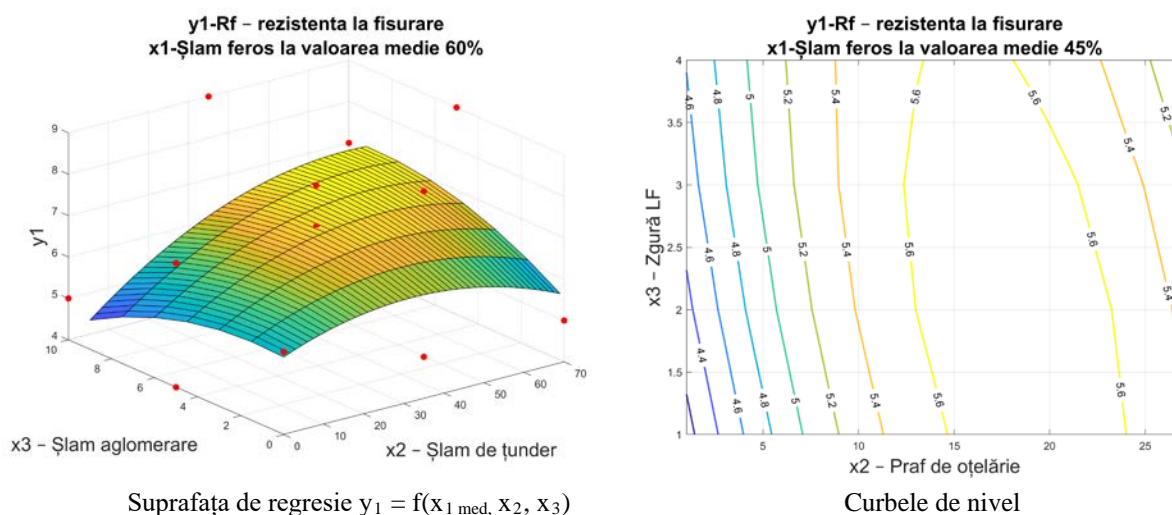


Figura 6.7. $y_1 = f(x_{1med}, x_2, x_3)$

Suprafața de răspuns care modelează rezistența la sfărâmare y_2 în funcție de parametrii x_1 – Șlam feros, x_2 – Praf de oțelărie, x_3 – Zgură LF, are expresia:

$$y_2(x_1, x_2, x_3) = -20.9 + 0.667x_1 + 0.281x_2 + 1.55x_3 - 0.00222x_1^2 - 0.00187x_2^2 - 0.040x_3^2 - 0.00250x_1x_2 - 0.0200x_1x_3 \quad (6.19)$$

având un coeficient de corelație: $R^2=90,97\%$.

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.11. Suprafața de răspuns (6.19) și liniile de contur aferente sunt prezentate în figura 6.8 pentru valoarea medie a parametrului x_2 .

Tabelul 6.11. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_2

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{\text{optim}}$	Valoare maximă y_2^{max}
(60.0000, 35.0269, 5.0008)	14.1722

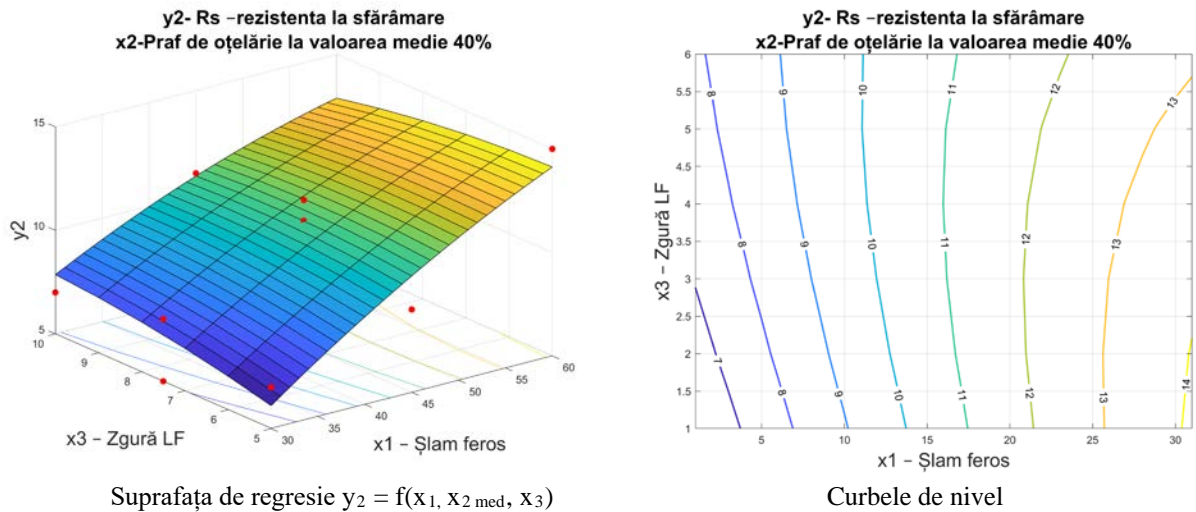


Figura 6.8. $y_2 = f(x_1, x_{2med}, x_3)$

Suprafața de răspuns care modelează intervalul de sfărâmare y_3 în funcție de parametrii x_1 – Șlam feros, x_2 – Praf de oțelărie, x_3 – Zgura de LF, are expresia:

$$y_3(x_1, x_2, x_3) = -6.3 + 0.292x_1 - 0.017x_2 + 0.85x_3 - 0.00074x_1^2 + 0.00021x_2^2 - 0.027x_3^2 - 0.00083x_1x_2 - 0.0133x_1x_3 + 0.0050x_2x_3 \quad (6.20)$$

având un coeficient de corelație $R^2 = 76.51\%$.

Rezultatele problemei de optimizare (6.11) sunt prezentate în tabelul 6.12. Suprafața de răspuns (6.20) și liniile de contur sunt prezentate în figura 6.9 pentru valoarea medie a parametrului x_3 .

Tabelul 6.12. Rezultatele problemei de optimizare pentru y_3

Parametrii optimali $(x_1, x_2, x_3)^{optim}$	Valoare maximă y_3^{max}
(60.0000, 20.0000, 5.0000)	7.3890

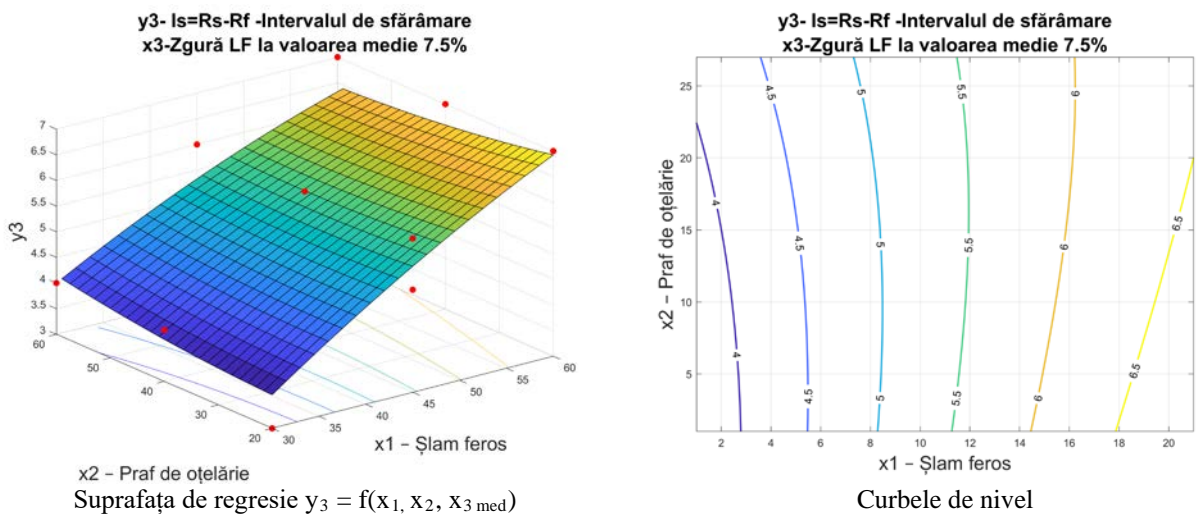


Figura 6.9. $y_3 = f(x_1, x_2, x_{3med})$

Domeniile optime de variație (din punct de vedere al compoziției chimice și a rezistenței la compresiune) a componentelor care alcătuiesc brichetele sunt: 30-70% șlam feros; 5-10% zgură LF și 20-40% praf de oțelărie. În funcție de disponibilul de materie primă (șlamuri/zguri/țunder) se realizează brichete cu un conținut de fier de minim 42% și o rezistență la compresiune corespunzătoare utilizării subproduselor la cuptorul electric cu arc.

6.4. Concluzii

O analiză tehnologică a corelațiilor prezentate permite identificarea intervalelor optime de variație pentru deșeurile din componența rețetelor brichetelor experimentale.

Astfel, domeniile optime de variație a componentelor subproduselor experimentale, sunt:

a) Pentru cazul brichetelor alcătuite din țunder, zgură de oțelărie și șlam de aglomerare furnale:

- 20-40% țunder;
- 15-25% zgură;
- 30-40% șlam aglomerare furnale;

b) Pentru cazul brichetelor alcătuite din șlamuri (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale):

- 40-100% șlam feros;
- 15-50% șlam de țunder;
- 5-10% șlam aglomerare furnale;

c) Pentru cazul brichetelor alcătuite din șlam feros, zgură LF și praf de oțelărie:

- 20-70% șlam feros;
- 5-10% zgură LF;
- 5-30% praf de oțelărie.

În funcție de disponibilul de deșeuri (materia primă pentru producerea brichetelor) se recomandă următoarele:

- Producerea brichetelor din șlam feros 100%;
- Producerea brichetelor care au în componență pe lângă șlamul feros unul sau două deșeuri (țunder, șlam de țunder, zgură de oțelărie – fracția feroasă, șlam de aglomerare furnale, praf de oțelărie), astfel: zgura de oțelărie 15-25%, țunder 20-40%, 15-50% șlam de țunder, șlam de aglomerare furnale 5-45% respectiv zgură de LF 5-10%;
- Brichetele experimentale sunt utilizate ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptoarele cu arc electric, în proporție de 5-25% din încărcătură, în funcție de calitatea oțelului elaborat;
- Subprodusele rezultate – brichetele experimentale au ca domeniu de utilizare industria siderurgică.

CAPITOLUL 7

VERIFICAREA INDUSTRIALĂ A DATELOR PRIVIND VALORIFICAREA DEȘEURILOR MĂRUNTE ȘI PULVERULENTE SUB FORMĂ DE BRICHETE

Pornind de la rezultatele obținute în cadrul experimentărilor în fază de laborator în continuare se prezintă verificarea industrială a datelor privind valorificarea deșeurilor feroase pulverulente (șlam feros) sub formă de brichete în industria siderurgică. Brichetele (sortiment E3P) sunt procesate din deșeuri feroase pulverulente și mărunte (șlam feros) la o societate de procesare a deșeurilor în Parcul Industrial Hunedoara și expediate către beneficiari – uzine siderurgice.

7.1. Cadrul tehnologic experimental

Cercetările efectuate pentru validarea rezultatelor obținute în laborator cu privire la utilizarea în industria siderurgică a brichetelor obținute din șlamul feros s-au efectuat la o oțelărie electrică, echipată cu un cuptor electric cu arc tip EBT de capacitate 100 tone, instalație de tratament secundar al oțelului tip LF, instalație de tratament secundar în vid tip VD și o instalație de turnare continuă cu 3 fire. Uzina siderurgică are o capacitate de producție de 450.000t oțel lichid pe an, produce bare rotunde de diametru 177mm, 220mm, 280mm și 350mm turnate continuu, din oțel carbon, slab aliat și aliat [94-96].

Figura 7.1 prezintă fluxul tehnologic de producere a oțelului la nivelul organizației.

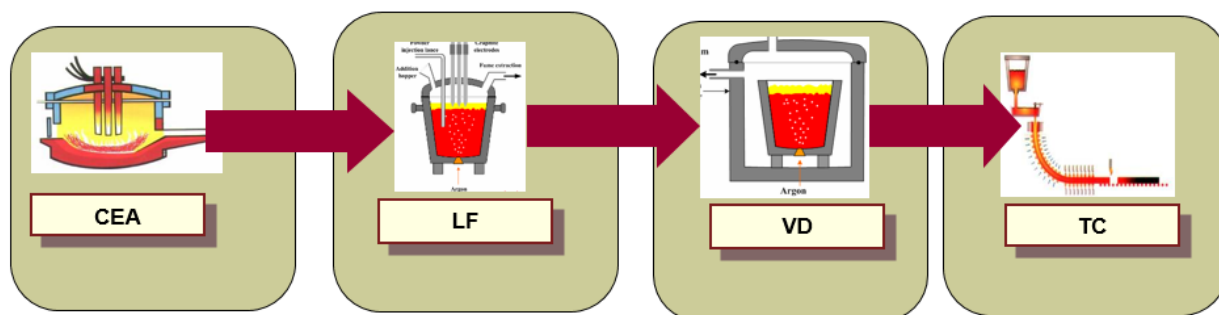


Figura 7.1. Fluxul tehnologic de elaborare și turnare a oțelului [95]

Cuptorul cu arc electric tip EBT este prezentat în figura 7.2. Media benelor pentru elaborare: 3-4 bene /șarjă.

După terminarea elaborării oțelului are loc tratarea acestuia în oala de turnare, și anume: instalația de tratare tip LF prezentată în figura 7.3 respectiv instalația de tratare în vid tip VD prezentată în figura 7.4. Elementele de aliere se pot introduce fie o dată cu încărcătura metalică, fie în perioada de elaborare. Durata medie a tratamentului este de 40-50min.

Efectele economice care se obțin în urma desfășurării procesului de elaborare–rafinare a oțelului pe ansamblul duplexului metalurgic CAE–LF–VD se reflectă în [95]:

- reducerea temperaturii de evacuare din agregatul primar de elaborare cu 40-80°C;
- scurtarea duratelor de elaborare în agregatul primar.

Instalația de turnare continuă se prezintă în figura 7.5, aceasta este compusă din distribuitor, cristalizor, sistemul de răcire secundară, sistemul de ghidare și de tragere, sistemul de debitare și sistemul de basculare.



Figura 7.2. Cuptorul electric cu arc tip EBT



Figura 7.3. Instalația de tratament secundar LF



Figura 7.4. Instalația de tratament în vid tip VD

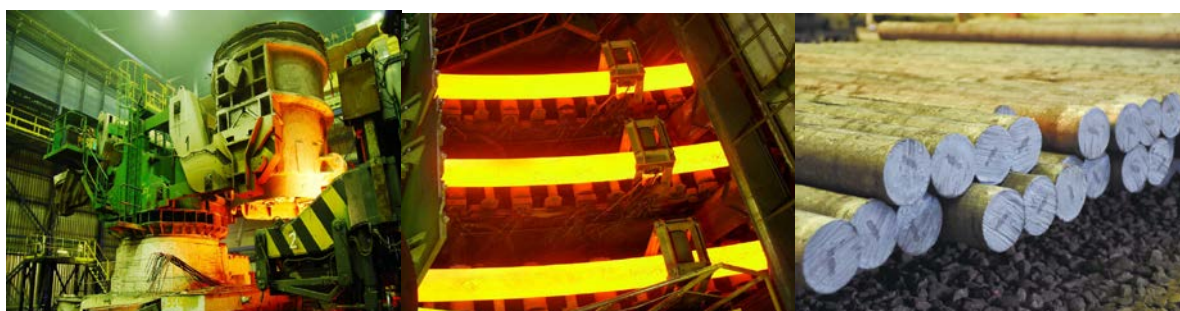


Figura 7.5. Instalația de turnare continuă [27]

- Șarjele experimentale au fost urmărite pe tot fluxul tehnologic, etapă cu etapă, și anume:
- elaborare în cuptor: încărcătura de bună calitate, fără fier vechi cu uleiuri, umiditate, rugină sub cca 2%, var proaspăt ars, minereul de fier calcinat, oala de turnare încălzită corespunzător;
 - tratarea în instalațiile LF și VD: respectarea limitelor de variație a parametrilor tehnologici (încălzire, barbotare), adausuri fără umiditate (pentru formarea zgurii și aliere), omogenizare chimică și termică prin barbotare cu argon urmate de tratamentul în instalația de vidare fără aport de căldură VD, la turnare oală încălzită corespunzător și la fel distribuitorul;
 - respectarea parametrilor turnării continue: viteza de turnare corelată cu temperatura de turnare, debitul și presiunea apei de răcire pe fiecare zonă de răcire.

7.2. Raport șarje-bilanț utilizare sortiment E3P brichete

Pentru validarea rezultatelor cercetărilor în fază de laborator și verificarea industrială a datelor, cercetările industriale s-au efectuat pe 5 șarje de oțel aliat cu crom și molibden, la o uzină siderurgică de producere a oțelului. Șarjele de oțel elaborate au fost supuse tratamentului sub vid. Compoziția chimică standard a șarjelor de oțel elaborate, fluxul tehnologic și aspecte din timpul cercetărilor industriale sunt prezentate în Anexa 10.

S-au elaborat două mărci de oțel:

- oțel marca 4140 standard ASTM (42CrMo4 - SR EN 10083-1);
- oțel marca 4130 standard ASTM (25CrMo4 - SR EN 10083-1).

Pentru evidențierea influenței utilizării în încărcătura metalică a **sortimentului E3P (brichete din șlam feros)**, s-a efectuat o analiză pe 5 șarje de oțel și bilanțul pe secvențe (elaborare EBT și elaborare-turnare) pentru fiecare șarjă.

Pentru acuratețea datelor experimentale s-au avut în vedere o serie de măsuri tehnologice:

- verificare și etalonare, conform procedurilor în vigoare, pentru aparatura destinată măsurătorilor;
- utilizarea numai a materialelor cu caracteristici fizice și chimice cunoscute (feroaliaje, materiale de spumare a zgurii și carburare, fondanți, etc.);
- cântărirea țagelilor, șutajelor și a restului distribuitor rezultate la turnarea continuă;
- cântărirea zgurii și deșeurilor rezultate din proces.

În analiza efectuată s-a urmărit:

- verificare grad metalizare;
- verificare diluție;
- verificare aport molibden total - $[Mo]_t$.

Datele inițiale sunt prezentate în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1. Date inițiale elaborare șarje oțel cu adaos de brichete E3P

Nr. crt.	Marca	E3P [t/șarja]	Turnare continuă diametru țagă	Observatie
1	4140	20	220	s-a dorit să se verifice
2	4140	20	220	capacitatea de diluție și
3	4130	25	220	%Mo adus la topire
4	4140	20	280	
5	4140	20	280	

Prin turnarea continuă a oțelului s-au realizat următoarele:

- țagă Ø220, o secvență de 2 șarje/secvență – șarja 1 și 2;
- țagă Ø220, o secvență de o șarjă – șarja 3;
- țagă Ø280, o secvență de 2 șarje/secvență – șarja 4 și 5.

7.2.1. Bilanț încărcătură cuptor cu arc electric tip EBT

Datele referitoare la structura încărcăturii metalice, sortimentele de deșuri metalice folosite pentru elaborarea oțelului și benele încărcate sunt prezentate în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2. Structura încărcăturii metalice a șarjelor de oțel

Nr. șarjă	Încărcătură metalică [t]	Nr. bene	Încărcătură bena, [t]					Încărcătură metalică, [t]							
			B1	B2	B3	B4	E1	E3	E3P	E5	E6	Fonta	Aliat	E40	
1	125,850	4	52,40	39,45	22,2	11,8	26,95	49,15	19,75	5,05	19,10	5,85	-	-	
2	127,900	4	61,35	38,45	19,6	8,5	24,40	52,70	20,65	5,15	20,40	4,6	-	-	
3	122,100	4	54,25	40,05	19,2	8,6	28,85	11,75	25,10	7,05	-	-	39,35	10	
4	126,900	3	60,65	39,95	26,3	-	26,30	21,90	19,90	4,85	28,25	-	25,70	-	
5	127,250	3	63,05	39,40	24,8	-	24,80	31,95	20,65	6,90	25,40	-	17,55	-	
Total încărcătură metalică 630 t							131,3	167,45	106,05	29	93,15	10,45	82,6	10	

Încărcătura metalică a șarjelor experimentale s-a constituit din următoarele sortimente de deșuri metalice:

- E1 - Fier vechi ușor procesat;
- E3 - Fier vechi greu;
- E3P – Brichete – obținute din deșuri feroase mărunte și pulverulente (șlam feros);
- E5 – Șpan oțel;
- E6 – Deseuri metalice cu reziduale mici, subtiri, comprimate/balotate;
- Fontă – deșuri de fontă;
- Aliat – deșuri de oțel aliat;
- E40 - Fier vechi maruntit

În figura 7.6 se prezintă repartitia încărcăturii metalice la șarjele de oțel elaborate în vederea verificării datelor experimentale.

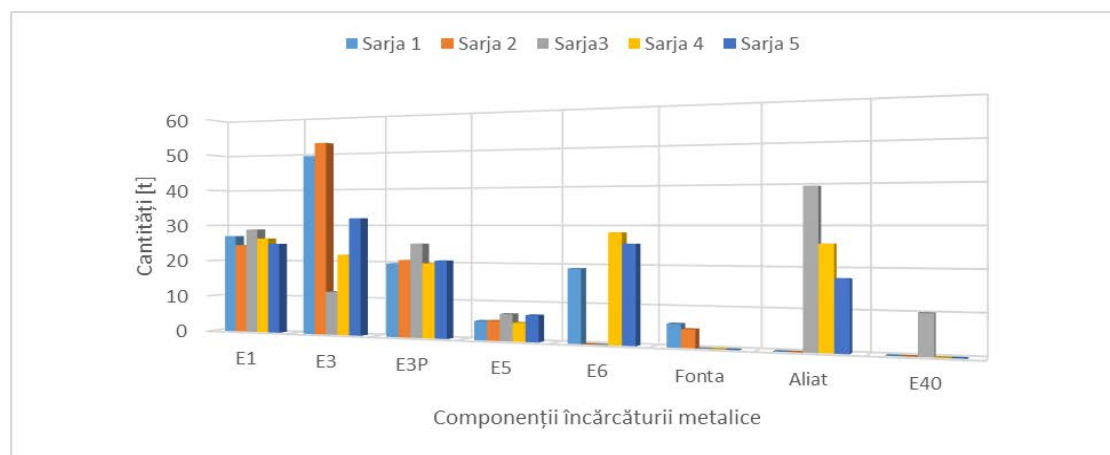


Figura 7.6. Repartitia încărcăturii metalice la șarjele de oțel elaborate

Bilanțul încărcăturii metalice, bilanțul de metal respectiv cantitatea de oțel elaborat și turnat este prezentată în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3. Bilanțul de metal

Nr. Crt.	Total turnat/șarjă [t]	Șutaje TC [t]	Țunder [t]	Prelevare probe [t]	Capeti ajustaj [t]	Rest distribuitor [t]	Total deșeu [t]	Total lichid [t]	Încărcătură metalică [t]
1	108,964	0,709	0,494	0,062	-	-	1,265	110,229	125,850
2	108,674	1,330	0,509	0,124	2,956	2	4,919	115,593	127,900
3	108,810	0,709	0,517	0,124	4,877	2	6,227	117,037	122,100
4	104,275	1,149	0,475	0,101	-	-	1,725	106,000	126,900
5	107,575	2,154	0,497	0,101	0,718	2	3,470	113,045	127,250
Total	538,298	6,060	2,500	0,390	8,560	8	17,610	561,904	630,000

În figurile 7.7-7.8 se prezintă încărcătura metalică a șarjelor de oțel elaborate cu evidențierea sortimentului E3P – brichete șlam feros, acest sortiment fiind utilizat în cantitate de aproximativ 20 t/șarjă (19,75t/șarjă–25,10t/șarjă) respectiv 15,7-20,05% - în medie 16,8%.

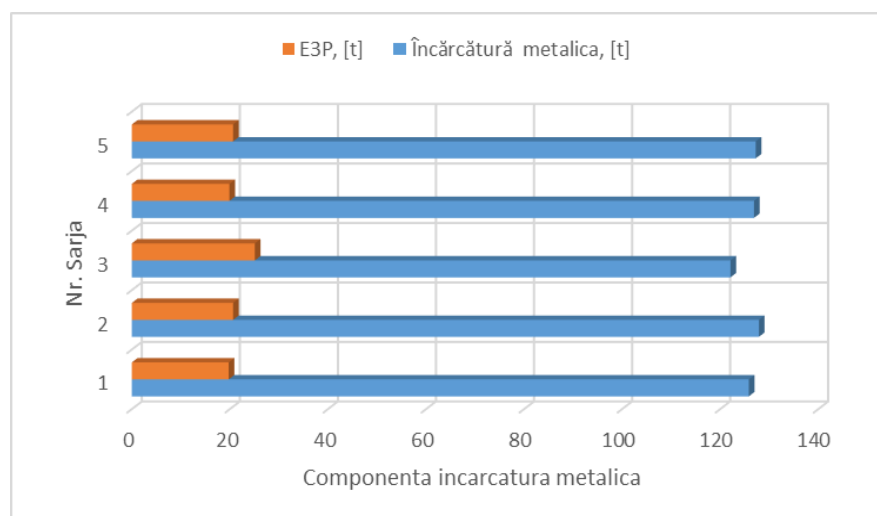


Figura 7.7. Încărcătura metalică la șarjelor de oțel elaborate cu evidențierea sortimentului E3P

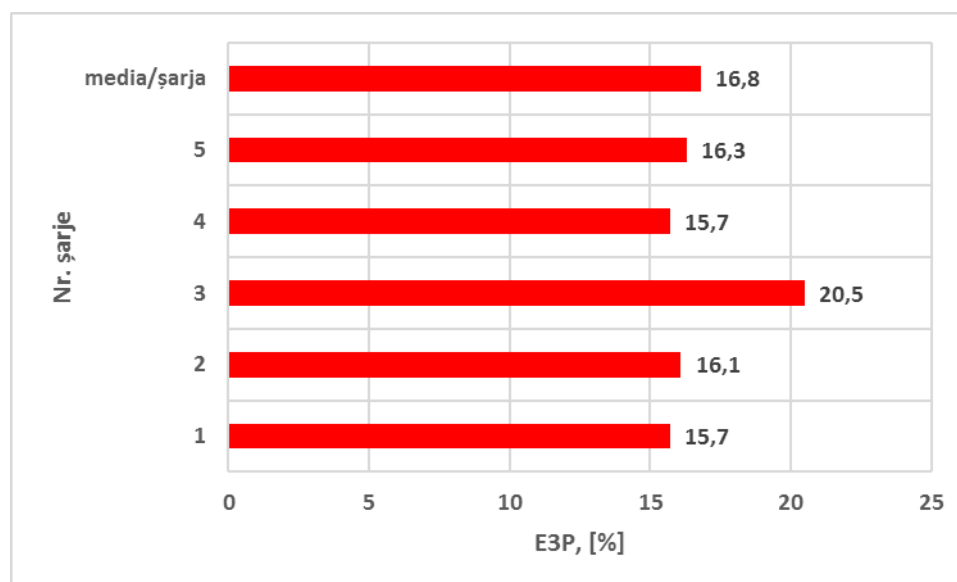


Figura 7.8. Sortimentul E3P utilizat în încărcătura metalică a șarjelor de oțel

Consumurile specifice de oxigen, gaz metan și energie electrică realizate la șarjele de oțel analizate sunt prezentate în tabelul 7.4.

În tabelele 7.5-7.7 se prezintă datele referitoare la consumurile specifice, pe marcă de oțel și secvențe.

Tabelul 7.4. Consumuri specifice – situație globală șarje de oțel

Nr. Crt.	Oxigen [Nm ³]	Gaz metan [Nm ³]	Energie electrică EBT [MWh]	Energ electrică LF [MWh]
1	4324	491	53,7	16,1
2	4322	499	52,1	17,1
3	4954	546	55,4	12,2
4	4381	509	51,5	19,2
5	4539	550	58,1	15,0
Total	22520	2595	270,8	79,6

Tabelul 7.5. Consumuri specifice (șarjele 1-2), oțel marca 4140, țagă Ø220

Consumuri specifice	Realizat/Normat	U.M.	Sarja 1	Sarja 2	Media	Diferența
Energie electrică EBT	Realizat	MWh	53,7	52,1	52,9	
	Normat	kWh/t	445	445	445	23,9
	Realizat		487,2	450,7	468,9	
Oxigen	Realizat	Nm ³	4324	4322	4323	
	Normat	Nm ³ /t	42	42	42	-3,7
	Realizat		39,2	37,4	38,3	
Gaz metan	Realizat	Nm ³	491	499	495	
	Normat	Nm ³ /t	5,1	5,1	5,1	-0,7
	Realizat		4,5	4,3	4,4	
Electrozi Ø 600mm	Realizat total	Kg	-	-	565	
Electrozi Ø 600mm	Normat	Kg/t	2,4	2,4	2,4	0,10
	Realizat		-	-	2,5	

Tabelul 7.6. Consumuri specifice (șarja 3), oțel marca 4130, țagă Ø220

Consumuri specifice	Realizat/Normat	U.M.	Sarja 3	Diferența
Energie electrică EBT	Realizat	MWh	55,4	
	Normat	kWh/t	445	28,4
	Realizat		473,4	
Oxigen	Realizat	Nm ³	4954	
	Normat	Nm ³ /t	42	0,3
	Realizat		42,3	
Gaz metan	Realizat	Nm ³	546	
	Normat	Nm ³ /t	5,1	-0,4
	Realizat		4,7	

Tabelul 7.7. Consumuri specifice (șarjele 4-5), oțel marca 4140, țagă Ø280

Consumuri specifice	Realizat/Normat	U.M.	Sarja 4	Sarja 5	Media	Diferența
Energie electrică EBT	Realizat	MWh	51,5	58,1	54,8	
	Normat	kWh/t	445	445	445	54,9
	Realizat		485,85	513,95	468,9	499,9
Oxigen	Realizat	Nm ³	4381	4539	4460	
	Normat	Nm ³ /t	42	42	42	-1,3
	Realizat		41,33	40,15	40,74	
Gaz metan	Realizat	Nm ³	509	550	529,5	
	Normat	Nm ³ /t	5,1	5,1	5,1	-0,27
	Realizat		4,80	4,87	4,83	
Electrozi Ø 600mm	Realizat total	Kg	-	-	565	
Electrozi Ø 600mm	Normat	Kg/t	2,4	2,4	2,4	0,10
	Realizat		-	-	2,5	

În tabelul 7.8 se prezintă consumurile specifice de materii prime, combustibil și energie la șarjele de oțel elaborate.

Tabelul 7.8. Consumuri specifice materii prime, combustibil, energie și electrozi la șarjele de oțel

Consumuri specifice		
pelete	9,65	kg/t
zgura EBT	140,82	kg/t
consum incarcatura metalica	1121,19	kg/t
consum metal/total	0,89	%
consum oxigen	40,08	m ³ /t
consum gaz metan	4,62	m ³ /t
consum energie electrica	481,93	kWh/t
consum electrozi Ø600	2,50	kg/t
consum total electrozi Ø350	0,686	kg/t
consum electrozi Ø350 MTC	0,797	kg/t

Pentru a analiza influența brichetelor E3P asupra diluției și a recuperării elementelor utile din acestea s-au efectuat o serie de determinari calitative și cantitative asupra brichetelor, sortimentelor de fier vechi utilizate în încărcătură, a materialelor auxiliare, a materialelor de adaos sau a feroaliajelor.

De asemenea, s-au luat probe pentru determinarea analizei chimice la topire, datele fiind prezentate în tabelul 7.9.

Tabelul 7.9. Compoziția chimică la topire la șarjele de oțel

Analiza chimică la topire a șarjelor EBT, [%]												
Nr șarjă	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	N ₂	
1	0,07	0,01	0,06	0,005	0,021	0,23	0,13	0,05	0,05	0,012	0,0063	
2	0,06	0,01	0,05	0,005	0,023	0,24	0,13	0,05	0,05	0,013	0,0064	
3	0,04	0,01	0,05	0,004	0,026	0,26	0,14	0,02	0,05	0,014	0,0061	
4	0,05	0,01	0,05	0,005	0,013	0,22	0,12	0,04	0,04	0,012	0,0068	
5	0,06	0,01	0,05	0,004	0,014	0,23	0,08	0,04	0,06	0,013	0,0058	

Asupra brichetelor E3P au fost efectuate mai multe analize chimice, pentru stabilirea elementelor chimice, în principal Cu și Mo, pentru a evidenția recuperarea molibdenului și încadrarea în standarde a conținutului de cupru. În tabelul 7.10 se prezintă rezultatele analizelor efectuate pentru sortimentul E3P.

Tabelul 7.10. Analize chimice probe brichete E3P

Nr. Crt.	% Cu mediu	% Mo mediu	Nr. probe analizate
1	0,07	0,10	6
2	0,08	0,12	5
3	0,08	0,18	4
4	0,07	0,10	9

Verificarea gradului de metalizare a brichetelor - Sortimentul E3P

La șarjele 1 și 2 s-a utilizat un consum de oxigen redus 40,08Nm³/t, măsura a fost adoptată din punct de vedere tehnologic pentru a proteja bolta, deci o funcționare, normală.

După elaborare șarjele de oțel sunt supuse tratamentului secundar în instalația LF și apoi urmează tratamentul de vidare în instalația VD.

Datele referitoare la gradul de metalizare al sortimentului de încărcătură metalică – Brichete E3P se prezintă în tabelul 7.11.

Sortimentul E3P are grad de metalizare sensibil mai mare, lucru reflectat și în consumurile specifice de încărcătură metalică.

Tabelul 7.11. Gradul de metalizare

Marca	Taglă	Consum încărcătura metalică	
		[kg/t]	[%]
4140	Ø220	1126,67	0,89
4130	Ø220	1043,21	0,95
4140	Ø280	1160,26	0,86

Verificarea capacității de diluție și de recuperare a conținutului de molibden Mo

Datele referitoare la capacitatea de diluție și de recuperare a conținutului de molibden al sortimentului de încărcătură metalică – brichete E3P se prezintă în tabelul 7.12.

Tabelul 7.12. Date experimentale capacitate diluție și recuperare elemente

Nr șarjă	Structura pe sortiment de fier vechi, [t]								[Cu] _t / [Cu]	[Mo] _t
	E1	E3	E3P	E5	E6	Fonta	Aliat	E40		
1	26,95	49,15	19,75	5,05	19,1	5,85	-	-	0,23 / 0,22	0,05
2	24,40	52,70	20,65	5,15	20,4	4,6	-	-	0,24 / 0,22	0,05
3	28,85	11,75	25,10	7,05	-	-	39,35	10	0,26 / 0,24	0,05
4	26,30	21,90	19,90	4,85	28,25	-	25,70	-	0,22 / 0,20	0,04
5	24,80	31,95	20,65	6,90	25,40	-	17,55	-	0,23 / 0,20	0,06

Din analiza datelor experimentale se observă următoarele:

- [Cu]_t / [Cu] – conținutul de cupru la topire / conținutul de cupru în final

Conținutul de cupru în proba de topire este mai mare cu circa 0,01 – 0,05% decât la finalul tratamentului oțelului. Pentru realizarea unui conținut de Cu = 0,2 - 0,22% cantitatea de deșeuri feroase cu conținut de cupru scăzut (E2+E6) trebuie să fie de 40 - 46 t/șarjă, în funcție de conținut de Cu al sortimentului E1 0,30-0,35%.

- [Mo]_t – conținutul de molibden

În încărcătura metalică a șarjelor s-a introdus deșeu feros aliat care aduc în încărcătură cca. 0,03%Mo. Conținutul de molibden la topire fiind în medie 0,05% rezultă faptul că sortimentul E3P a condus un plus de 0,02% Mo (echivalent a 35 kgFeMo/șarjă).

7.2.2. Bilanț încărcătură cuptor cu arc electric tip EBT- turnare continua TC

Bilanțul s-a efectuat pentru evidențierea influenței utilizării în încărcătura metalică a sortimentului E3P - brichete din șlam feros la elaborarea și turnarea oțelului pe fluxul CEA-LF-VD-TC.

La șarjele 1 și 2 s-a turnat țaglă Ø220, oțel marca 4140 iar în rețetă s-a utilizat circa 20t/șarjă brichete E3P. S-a realizat o secvență de 2 șarje/secvență. Bilanțul de metal este prezentat în tabelul 7.13, iar compoziția chimică la elaborare și compoziția chimică finală a oțelului elaborate este prezentată în tabelele 7.14 respectiv 7.15.

Tabelul 7.13. Bilanț CEA-TC pentru șarjele 1 și 2

Componentă șarja	U.M	Șarja 1	Șarja 2	TOTAL
E1	[t]	26,95	24,4	51,35
E3	[t]	49,15	52,7	101,85
E3P	[t]	19,75	20,65	40,4
E5	[t]	5,05	5,15	10,2
E6	[t]	19,10	20,4	39,5
Fonta	[t]	5,85	4,6	10,45

Total	[t]	125,85	127,90	-
Consum specific	[kg/t]	1141,7	1106,5	-
Total oțel lichid	[t]	110,229	115,593	-
Total pierderi, din care	[t]	1,265	4,912	-
Șutaje TC	[t]	0,709	1,33	Cântărit
Probe	[t]	0,062	0,124	Calcul
Țunder	[t]	0,494	0,509	Calcul
Capeti	[t]	-	2,956	Cântărit
Rest distribuitor	[t]	-	2	Cântărit
Total oțel turnat	[t]	108,964	108,674	-

Tabelul 7.14. Analiza chimică la elaborare în cuptor pentru șarjele 1 și 2

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ca	Sn	N ₂
1	0,07	0,01	0,06	0,005	0,021	0,23	0,13	0,05	0,05	0,012	0,0063	0,07	0,01
2	0,06	0,01	0,05	0,005	0,023	0,24	0,13	0,05	0,05	0,013	0,0064	0,06	0,01

Tabelul 7.15 Analiza chimică finală pentru șarjele 1 și 2

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ca	Sn	N ₂
1	0,41	0,21	0,9	0,01	0,001	0,22	0,12	0,96	0,2	0,019	0,0020	0,012	0,0067
2	0,39	0,23	0,8	0,01	0,002	0,22	0,12	0,93	0,2	0,022	0,0019	0,012	0,0069

Consumurile specifice pentru șarjele 1 și 2 pe fluxul CEA – TC se prezintă în tabelul 7.16.

Tabelul 7.16. Consumuri specifice pentru CEA - TC la șarjele 1 și 2

Consumuri specifice		
pelete	9,65	[kg/t]
zgura EBT	140,82	[kg/t]
consum incarcatura metalica	1123,67	[kg/t]
consum metal	0,89	
consum oxigen	38,29	[m ³ /t]
consum gaz metan	4,38	[m ³ /t]
consum energie electrica	468,51	[kwh/t]
consum electrozi Ø600	2,50	[kg/t]

La șarja 3 s-a turnat țagla Ø220, oțel marca 4130, o singură secvență iar în încărcătură s-au utilizat 25 t/șarjă brichete E3P.

Bilanțul de metal pentru șarja 3 este prezentat în tabelul 7.17, iar compoziția chimică la elaborare și compoziția chimică finală a oțelului este prezentată în tabelele 7.18 respectiv 7.19. Consumurile specifice pentru șarja 3 pe fluxul CEA – TC se prezintă în tabelul 7.20.

La șarjele 4 și 5 s-a turnat țagla Ø280, oțel marca 4140 iar în încărcătură s-au utilizat aproximativ 20 t/șarjă – brichete E3P. S-a realizat o secvență de 2 șarje/secvență.

Bilanțul de metal pentru șarjele 4 și 5 este prezentat în tabelul 7.21. Compoziția chimică a oțelului la elaborare și compoziția chimică finală a oțelului pentru șarjele 4 și 5 este prezentată în tabelele 7.22 respectiv 7.23. Consumurile specifice pentru șarjele 4 și 5 pe fluxul CEA – TC se prezintă în tabelul 7.24.

Tabelul 7.17. Bilanț CEA-TC la șarja 3

Componentă șarja	UM	Șarja 3	TOTAL
E1	[t]	28,85	28,85
E3	[t]	11,75	11,75
E3P	[t]	25,1	25,1
E5	[t]	7,05	7,05
Deșeu Aliat	[t]	39,35	39,35
E40	[t]	10	10
Total	[t]	122,10	-
Consum specific	[kg/t]	1043,2	-
Total oțel lichid	[t]	117,04	-
Total pierderi, din care	[t]	8,277	-
Șutaje TC	[t]	-	Cântărit
Probe	[t]	0,124	Calcul
Țunder	[t]	0,517	Calcul
Capeti	[t]	5,586	Cântărit
Rest distribuitor	[t]	2	Cântărit
Total oțel turnat	[t]	108,810	-

Tabelul 7.18. Analiza chimică la elaborare în cuptor pentru șarja 3

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ca	Sn	N ₂
3	0,04	0,01	0,05	0,004	0,026	0,26	0,14	0,02	0,05	0,014	0,0061	0,04	0,01

Tabelul 7.19. Analiza chimică finală pentru șarja 3

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ca	Sn	N ₂
3	0,30	0,26	0,53	0,009	0,004	0,24	0,13	1,03	0,2	0,024	0,0024	0,013	0,0063

Tabelul 7.20 Consumuri specifice pentru CEA - TC la șarja 3

Consumuri specifice		
pelete	8,65	[kg/t]
zgura EBT	170,20	[kg/t]
consum incarcatura metalica	1043,20	[kg/t]
consum metal	0,95	
consum oxigen	42,30	[m ³ /t]
consum gaz metan	4,70	[m ³ /t]
consum energie electrica	473,40	[kwh/t]
consum electrozi Ø600	2,50	[kg/t]

Tabelul 7.21. Bilanț CEA – TC la șarjele 4 și 5

Componentă șarja	UM	Șarja 1	Șarja 2	TOTAL
E1	[t]	26,3	24,8	51,1
E3	[t]	21,9	31,95	63,85
E3P	[t]	19,9	20,65	40,55
E5	[t]	4,85	6,9	11,75
E6	[t]	28,3	25,4	53,65
Deșeu aliat	[t]	25,7	17,55	43,25
Total	[t]	126,9	127,25	254,15
Consum specific	[kg/t]	1197,17	1125,65	1160,26
Total oțel lichid	[t]	106,00	113,045	-
Total pierderi, din care	[t]	1,725	3,470	-
Șutaje TC	[t]	1,149	2,154	Cântărit
Probe	[t]	0,101	0,101	Calcul
Țunder	[t]	0,475	0,497	Calcul
Capeti	[t]	-	0,718	Cântărit
Rest distribuitor	[t]	-	2	Cântărit
Total oțel turnat	[t]	104,275	107,575	-

Tabelul 7.22. Analiza chimică a oțelului la elaborare în cuptor pentru șarjele 4 și 5

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ca	Sn	N ₂
4	0,05	0,01	0,05	0,005	0,013	0,22	0,12	0,04	0,04	0,012	0,0068	0,05	0,01
5	0,06	0,01	0,05	0,004	0,014	0,23	0,08	0,04	0,06	0,013	0,0058	0,06	0,01

Tabelul 7.23. Analiza chimică finală a oțelului pentru șarjele 4 și 5

Nr. șarjă	Compoziția chimică, [%]												
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	Ca	Sn	N ₂
4	0,42	0,19	0,86	0,010	0,004	0,20	0,11	0,98	0,2	0,020	0,0021	0,011	0,0063
5	0,41	0,22	0,87	0,011	0,001	0,20	0,09	0,99	0,2	0,020	0,0020	0,012	0,0063

Tabelul 7.24 Consumuri specifice pentru CEA - TC la șarjele 4 și 5

Consumuri specifice		
pelete	8,50	[kg/t]
zgura EBT	150,62	[kg/t]
consum incarcatura metalica	11160,26	[kg/t]
consum metal	0,86	
consum oxigen	40,74	[m ³ /t]
consum gaz metan	4,83	[m ³ /t]
consum energie electrica	468,00	[kwh/t]
consum electrozi Ø600	2,50	[kg/t]

7.3. Concluzii

Din analiza datelor experimentale se observă următoarele:

- Conținutul de cupru la topire, conținutul de cupru la finalul elaborării și conținutul de cupru final se încadrează în standardul de produs pentru semifabricatele turnate continuu obținute în cadrul experimentărilor;

- Conținutul de cupru în proba prelevată la topire este mai mare cu circa 0,01 – 0,05% decât la finalul tratamentului oțelului;

- Pentru obținerea conținutului de cupru, conform standardului cerut de beneficiar, cuprins în limitele 0,2-0,22%Cu cantitatea de deșeuri feroase cu conținut de cupru scăzut E2 respectiv E6 trebuie să varieze în limitele 40 - 46 t/șarjă, având în vedere sortimentul E1 care are un conținut de cupru de 0,30-0,35%;

- Utilizarea sortimentului E3P nu conduce la o creștere a conținutului de cupru în oțelul elaborat;

- În ce privește conținutul de molibden, acesta este la topire în medie 0,05%, rezultă faptul că sortimentul E3P a condus la o creștere a conținutului de molibden de 0,02%Mo (echivalent a 35 kg FeMo/șarjă), deci se poate substitui o parte din feroaliajele utilizate;

- Utilizarea în încărcătura cuptorului electric cu arc a sortimentului E3P, în medie 16%/șarjă, conduce la economie de materii prime (poate substitui sortimentele de fier vechi deficitare, fără a avea influență asupra calității oțelului elaborat);

- La utilizarea în încărcătură a sortimentului E3P nu s-au constatat depășiri ale consumurilor specific la energie, combustibili, oxigen, acestea încadrându-se în normativele tehnologice în vigoare.

Obținerea oțelului presupune materii prime, investiții, energie și forță de muncă.

În prezent, predomină obținerea oțelului în combinatele integrate (flux primar/tehnologii moderne-otelarie dotata cu convertizoare cu oxigen, circa 70% din producția mondială de oțel) însă există și o serie de constrângeri de natură tehnică, economică și de mediu iar în ultimii ani se observă o creștere a ponderii oțelului elaborat în miniuzine (tehnologii moderne și oțelărie dotata cu cuptoare electrice cu arc-instalații de tratament secundar-turnare continua, circa 30% din producția mondială de oțel).

Principalele probleme întâmpinate de industria siderurgică:

- calitatea materiilor prime utilizate (materii prime epuizate, aprovizionare foarte limitată sau geografic neaccesibil, flexibilitate limitată în termeni de producție, utilizarea unor sisteme complementare foarte complexe de epurare a gazelor, etc);

- investiții mari de capital (costuri operaționale ridicate, marje mici, eficiență scăzută a utilajelor, etc)

- probleme de mediu (obținerea autorizației pentru construcție și exploatare foarte greu; subproduse greu de valorificat; o cantitate mare de apă uzată, amprenta de carbon, etc.)

Astfel, în cazul valorificării deșeurilor feroase, în contextul economiei circulare, prin utilizarea subproduselor obținute ca și materie primă se obțin o serie de avantaje: tehnologice economice respectiv ecologice.

Extinderea bazei de materii prime în industria siderurgică prin reintroducerea în circuitul economic a deșeurilor feroase mărunte și pulverulente conduce la economii de materii prime, material, energie și combustibil. De asemenea, subprodusele obținute și utilizate ca și materii prime din punct de vedere calitativ sunt superioare comparativ cu o parte din categoriile de fier vechi utilizate în agregatele de elaborare a oțelului.

CAPITOLUL 8

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

8.1. Concluzii finale

Analizând literatura de specialitate și rezultatele cercetărilor experimentale proprii, privind valorificarea deșeurilor pulverulente și mărunte cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică, rezultă următoarele concluzii finale:

- în zona de Vest a României în zonele industriale (Hunedoara, Călan, Oțelu Roșu și Reșița) există cantități mari de deșeuri feroase (o mare parte depozitate și o parte care rezultă din procesele tehnologice pe fluxurile de fabricație ale oțelului), produse secundare mărunte și pulverulente cu conținut de fier;

- deșeurile rezultate din industria siderurgică conțin fier metalic sau fier legat chimic, conținutul acestora variază în limitele 20-75%;

- pe lângă fier unele dintre deșeurile rezultate din industria siderurgică au și un conținut ridicat de carbon de 14–36% precum și componenți cu caracter bazic (CaO și MgO) sau cu caracter fluidificator (Al_2O_3), acestea putând fi folosiți, în procesul de reciclare, ca și lianți sau fluidificatori, pe lângă recuperarea elementului util (fierul);

- în prezent, există o creștere a ponderii utilizării deșeurilor cu conținut de fier sub formă de subproduse (pelete, brichete, aglomerat) în încărcătura metalică a agregatelor de elaborare a oțelului;

- folosirea subproduselor cu conținut de fier în agregatele de elaborare generează reduceri substanțiale de materii prime, combustibili și energie;

- obiectivul principal al industriei siderurgice fiind zero deșeuri, astfel că recuperarea și utilizarea subproduselor în cadrul și în afara industriei siderurgice, combinate cu gestionarea responsabilă a resurselor naturale, contribuie la eficiența materialelor și la prevenirea generării deșeurilor;

- la alegerea procedurii și tehnologiei de valorificare, trebuie să se aibă în vedere atât caracteristicile deșeurilor, cantitatea de deșeu disponibilă, respectiv rezultată pe fluxurile tehnologice curente, posibilitatea procesării concomitente a mai multor deșeuri și nu în ultimul rând destinația produsului obținut (industria siderurgică);

- valorificarea deșeurilor prin procedeele clasice (aglomerare, brichetare și peletizare), poate asigura subproduse utilizabile în industria siderurgică ca și materie primă la elaborarea oțelurilor;

- în cercetările și experimentările efectuate s-au aplicat tehnologiile de valorificare a deșeurilor pulverulente prin brichetare/aglomerare/peletizare;

- valorificarea deșeurilor prin brichetare/aglomerare/peletizare, prezintă interes deosebit pentru unitățile siderurgice puternic restructurate și cantități mari de deșeuri depozitate pe halde și iazuri, pe lângă cele care rezultă pe fluxurile curente;

- în cadrul cercetărilor și experimentărilor în fază de laborator s-au analizat următoarele deșeuri feroase mărunte și pulverulente - șlam feros, șlam de aglomerare-furnale/praf de furnal, praf de convertizor/șlam de convertizor, praf de oțelărie, fracția feroasă a zgurii de oțelărie, tunder/șlam de tunder și deșeu sideritic - deșeuri rezultate frecvent pe fluxurile tehnologice curente, cât și a celor depozitate ca urmare a unor fluxuri tehnologice de procesare a oțelului dezafectate;

- caracterizarea morfologică și compozițională a deșeurilor pulverulente și mărunte cu conținut de fier s-a efectuat cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj HITACHI model S-2600N echipat cu spectrometru de raze X dispersiv în energie (EDAX);

- s-a analizat morfologia tuturor probelor acestea fiind prezentate în imaginile de microscopie electronică cu baleiaj - imagini de electroni secundari și distribuția de raze X;

- compoziția chimică și granulometrică, precum și conținutul de elemente dăunătoare a deșeurilor analizate a condus la stabilirea variantei de procesare a acestora prin brichetare/aglomerare/peletizare obținându-se următoarele subproduse – brichete, aglomerat și pelete.

Din analiza datelor experimentale în fază de laborator, în ce privește **procesarea deșeurilor prin brichetare**, rezultă următoarele:

- deșeurile feroase pulverulente și mărunte, rezultate din industria siderurgică, procesate prin brichetare sunt: șlamul feros, țunder, șlamul de țunder, șlamul de aglomerare-furnale, zgura de oțelărie – fracția feroasă și praful de oțelărie;

- subprodusele rezultate au un conținut de fier de peste 45% și pot fi utilizate în încărcătura agregatelor de elaborare a oțelului ca și materie primă în proporție de 5-25%.

La procesarea prin brichetare s-au obținut următoarele subproduse:

- brichete din șlam feros, fără adaos de liant și cu adaos de liant (la rece și la cald), cu un conținut de fier de 59-72% și un grad de recuperare al fierului de 97,85-98%;
- brichete din țunder cu un conținut de fier de 60-65%, acestea având în componență și deșeuri cu conținut ridicat de carbon, pe lângă recuperarea fierului contribuie și la formarea unei zguri active respectiv la procesul de spumare a zgurii;
- brichete din șlam feros și zgură de oțelărie cu un conținut de fier de 48-55% și un grad de recuperare al fierului de 66%;
- brichete din șlamuri (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale) cu un conținut de fier de 60-78,76% și un grad de recuperare al fierului de 98%;
- brichete din șlam feros și praf de oțelărie cu un conținut de fier 42-61% și un grad de recuperare 68-82%.

Rezultatele obținute în cadrul experimentărilor, conduc la concluzia că deșeurile analizate pot fi procesate prin brichetare (cu obținerea pentru caracteristicile de rezistență mecanică a unor valori superioare celor minime pentru acest procedeu), acest procedeu permițând valorificarea deșeurilor cu limite de variație mari din punct de vedere granulometric (de dorit sub 2mm). Componența rețetelor se stabilește în funcție de disponibilul de deșeuri mărunte și pulverulente și de destinația materialului procesat - oțelării. Pentru obținerea unor indicatori calitativi superiori pentru produsele obținute (brichete), pot fi utilizate optimizări sau pot fi făcute o serie de alte modificări ale rețetelor șarjei crude, inclusiv prin utilizarea unui liant care să elimine durificarea la cald – în acest caz fiind nevoie de controlul mult mai riguros a compoziției chimice, în special din punct de vedere a elementului util: fierul.

Din analiza datelor experimentale în fază de laborator, în ceea ce privește **procesarea deșeurilor prin aglomerare**, rezultă următoarele:

- deșeurile feroase pulverulente și mărunte, rezultate din industria siderurgică, procesate prin aglomerare sunt: șlamul feros, țunder, șlamul de țunder, șlamul de aglomerare-furnale, zgura de oțelărie – fracția feroasă;

- subprodusul rezultat (aglomeratul) are un conținut de fier de peste 42% și poate fi utilizat în încărcătura agregatelor de elaborare a oțelului ca și materie primă în proporție de 5-25% în funcție de conținutul de fier și gradul de recuperare al acestuia.

La procesarea prin aglomerare s-au obținut următoarele subproduse:

- aglomerat din șlam feros cu un conținut de fier de 54-60% și un grad de recuperare al fierului de 94%;
- aglomerat din șlam feros, țunder și zgură de oțelărie cu un conținut de fier de 42-46%;
- aglomerat din șlamuri (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale) cu un conținut de fier de 62-65% și un grad de recuperare al fierului de 95%.

Referitor la produsele obținute din procesarea deșeurilor cu un conținut de fier total cuprins între 30%-65% dar de compoziție chimică bine cunoscută se poate aprecia că acestea pot fi luate în considerație ca un component în încărcătura cuptoarelor cu arc electric în proporție de 4-5%, având în vedere și faptul că în practică de multe ori o parte din scoarțe (provenite din zgură) au conținut de fier în aceste limite.

Din analiza datelor experimentale în fază de laborator, în ceea ce privește **procesarea deșeurilor prin peletizare**, rezultă următoarele:

- determinarea rezistenței la compresiune pentru peletele crude și arse confirmă faptul că asemenea deșeuri pot fi valorificate prin peletizare iar peletele obținute au rezistența necesară pentru manipulare și transport la agentul economic pentru încărcarea în cuptoarele de elaborare a oțelului;

- peletele produse din deșeuri pulverulente cu conținut de fier/fier și carbon prin ardere pot fi metalizate, ceea ce permite utilizarea acestora ca și component în încărcătura cuptoarelor pentru elaborarea oțelurilor;

- la procesarea șlamului feros prin peletizare s-au obținut pelete cu un conținut de fier 60-67% și un grad de recuperare al acestuia de 95-96%.

Evaluarea proprietăților și caracteristicilor subproduselor obținute din punct de vedere morfologic, structural și topografic s-a realizat prin microscopie electronică (analiză chimică elementară prin tehnica EDS și analize SEM), analiză topografică (harta 2D și imagini 3D obținute pentru subprodusele experimentale cu ajutorul microscopului LEXT OLS4000 3D Confocal Laser Measuring Microscope) și analiza macrostructurală (realizate cu stereomicroscopului digital model 520SZM-D).

Analizând tehnologic corelațiile obținute la procesarea prin brichetare s-au identificat intervalele optime de variație pentru deșeurile din componența rețetelor brichetelor experimentale, astfel:

a) Pentru cazul brichetelor alcătuite din țunder, zgură de oțelărie și șlam de aglomerare furnale: 20-40% țunder; 15-25% zgură; 30-40% șlam aglomerare furnale;

b) Pentru cazul brichetelor alcătuite din șlamuri (șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale): 40-100% șlam feros; 15-50% șlam de țunder; 5-10% șlam aglomerare furnale;

c) Pentru cazul brichetelor alcătuite din șlam feros, zgură LF și praf de oțelărie: 20-70% șlam feros; 5-10% zgură LF; 5-30% praf de oțelărie.

În funcție de disponibilul de deșeuri (materia primă pentru producerea brichetelor) se recomandă următoarele:

- Producerea brichetelor din șlam feros 100%;

- Producerea brichetelor care au în componență pe lângă șlamul feros unul sau două deșeuri (țunder, șlam de țunder, zgură de oțelărie – fracția feroasă, șlam de aglomerare furnale, praf de oțelărie), astfel: zgura de oțelărie 15-25%, țunder 20-40%, 15-50% șlam de țunder, șlam de aglomerare furnale 5-45% respectiv zgură de LF 5-10%;

- Brichetele experimentale sunt utilizate ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptoarele cu arc electric, în proporție de 5-25% din încărcătură, în funcție de calitatea oțelului elaborat;

- Subprodusele rezultate – brichetele/aglomeratul/peletele experimentale au ca domeniu de utilizare industria siderurgică.

Verificarea industrială a rezultatelor și datelor experimentale obținute în fază de laborator a confirmat veriguitatea acestora. Subprodusele obținute (brichete obținute din șlamul feros) se utilizează în proporție de 15-20% ca și materie primă în încărcătura cuptorului cu arc electric la produserea oțelului.

8.2. Contribuții originale

Analizând rezultatele obținute în cadrul experimentărilor în fază de laborator și industriale, rezultă următoarele contribuții originale:

1. Evidențierea aspectelor importante în procesele de generare a produselor secundare la elaborarea oțelului precum și a alternativelor de procesare deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier;

2. Realizarea unei sinteze tehnologice privind metodele, procedee și tehnologiile clasice respectiv neconvenționale de valorificare prin reciclare în siderurgie a deșeurilor feroase pulverulente și mărunte;

3. Determinarea caracteristicilor calitative a deșeurilor pulverulente și mărunte cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică;

4. Stabilirea sortimentelor de deșeuri pentru cercetări și experimentări în fază de laborator, a rețetelor experimentale și a tehnologiei de procesare a acestora;

5. Stabilirea tehnologiilor experimentale de procesare, a deșeurilor mărunte cu conținut de fier, prin brichetare, aglomerare și peletizare;

6. Stabilirea rețetelor experimentale pentru fiecare tehnologie de procesare, astfel:

- Rețete brichete:

- 10 rețete având în componență – șlam feros;

- 4 loturi a câte 12 rețete având în componență – șlamuri feroase și țunder;

- 9 rețete având în componență – șlamuri feroase, țunder și zgură de oțelărie;

- 10 rețete având în componență – șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale;

- 10 rețete având în componență – șlamuri feroase și praf de oțelărie;

- Rețete aglomerat:

- 2 rețete având în componență – șlam feros;

- 2 rețete având în componență – șlamuri feroase, țunder și zgură de oțelărie;

- 2 rețete având în componență – șlam feros, șlam de țunder și șlam de aglomerare furnale;

- Rețete pelete:

- 10 rețete având în componență – șlam feros.

7. Obținerea de subproduse experimentale (brichete/aglomerat/pelete) utilizând în rețete deșeuri mărunte cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică (șlamul feros, țunder, șlamul de țunder, șlamul de aglomerare-furnale, zgura de oțelărie – fracția feroasă și praful de oțelărie).

8. Studiul caracterizării morfologice, structurale și topografice a deșeurilor utilizate respectiv determinarea caracteristicilor calitative și tehnologice a subproduselor obținute (brichete, aglomerat, pelete);

9. Modelarea matematică a datelor experimentale efectuată, aplicând metoda proiectării experimentelor, metoda celor mai mici pătrate și algoritmi genetici;

10. Stabilirea unor relații de corelație între factorii tehnologici de rezistență la compresiune a brichetelor experimentale, optimizarea făcându-se utilizând algoritmi genetici, rezultatele obținute conducând la îmbunătățirea performanțelor procesului experimental;

11. Determinarea componenței optime a rețetelor pentru producerea brichetelor, pe baza analizei matematice și tehnologice a corelațiilor obținute între caracteristicile de rezistență și componenții rețetelor experimentale. Optimizarea parametrilor tehnologici în vederea stabilirii domeniilor optime de variație pentru componenții rețetelor în vederea obținerii subproduselor experimentale de calitate superioară.

12. Determinarea gradului de recuperare a fierului (94-96%) din subprodusele experimentale, utilizându-le ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptorul cu inducție din laboratorul facultății;

13. Caracterizarea morfologică, topografică și compozițională a subproduselor experimentale obținute respectiv analiza și compararea rezultatelor;

14. Rezultatele obținute pot constitui un suport științific bine fundamentat din punct de vedere al performanței tehnologice, economice și ecologice în vederea utilizării subproduselor

rezultate, obținute din deșeuri mărunte cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică, utilizabile ca și materie primă la elaborarea oțelului în cuptoarele cu arc electric;

15. Stabilirea componenței optime a rețetelor pentru deșeurile supuse experimentărilor și confirmarea faptului că acestea pot fi valorificate prin procedeele clasice (brichetare, aglomerare și peletizare) și utilizate cu succes în practica industrială la elaborarea oțelului.

16. Procesele de valorificare identificate în cadrul tezei de doctorat oferă soluții sustenabile de valorificare a deșeurilor mărunte și pulverulente cu conținut de fier prin utilizarea subproduselor rezultate (brichete/aglomerat/pelete) ca și componente de capital natural în procesul de elaborare a oțelului.

17. Datele experimentale obținute pot fi utilizate ca suport pentru luarea deciziei de valorificare a deșeurilor cu conținut de fier rezultate din industria siderurgică pentru obținerea subproduselor și extinderea bazei de materii prime și materiale destinate fabricației oțelului.

18. Identificarea celor mai simple și rentabile metode de reciclare pentru implementarea cu ușurință în practica industrială, cu costuri reduse, de către firmele procesatoare de deșeuri sau de agenții economici din industria siderurgică.

Cele mai bune rezultate s-au obținut pentru brichetele experimentale realizate din șlamuri, rețetele acestora fiind utilizate de firmele procesatoare de deșeuri din Parcul Industrial Hunedoara și utilizate în practica industrială la o uzină de elaborare a oțelului (TMK Reșița) ca și materie primă în proporție de 15-20%.

8.3. Direcții de continuare a cercetărilor

- Dezvoltarea cercetărilor privind reciclarea din deșeurile pulverulente și mărunte a metalelor (mangan, crom, nichel, cobalt și wolfram) și reintroducerea lor în circuitul economic în contextul economiei circulare;

- Creșterea gradului de valorificare a zgurilor metalurgice feroase și neferoase și a cenușilor de termocentrală depozitate în halde;

- Recuperarea avansată a metalelor neferoase din cenușile piritice.

DISEMINAREA REZULTATELOR

1. Lucrări științifice publicate în reviste indexate Web of Science-WoS (ISI)

1. **O. Lupu**, M. Ardelean, A. Socalici, E. Ardelean, “Research regarding the capitalization of the waste resulted from the steel industry“, *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B-Chemistry and Materials Science*, 83(1), 2021, pp. 187-196, IF 0.07, Q4 (WOS:000627764100017).
2. A. Budiul Berghian, **O. Lupu**, A. Socalici, C. Birtok Baneasa, “Harnessing the ferrous sludge resulting from steel industry in the context of the circular economy“, *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B-Chemistry and Materials Science*, 83(4), 2021, pp. 241-250, IF 0.07, Q4 (WOS:000731356100020)
3. E. Ardelean, A. Socalici, **O. Lupu**, D. Bistriean, C. Dobrescu, N. Constantin, “Recovery of waste with a high iron content in the context of the circular economy“, *Materials*, 15(14), 2022, art.no. 4995, pp. 1-18, IF 3.748, Q1 (WOS:000831547900001)

2. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate Web of Science-WoS (ISI) Proceedings

1. **O. Lupu**, L. Zgripcea, A. Socalici, E. Popa, C. Hărău, “Pulverous ferrous waste processing by agglomeration“, *International Conference on Applied Sciences ICAS 2018*, Banja Luka, Bosnia Herzegovina, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 477, 012007, 2018 (WOS:000461184100007)
2. L. Zgripcea, **O. Lupu**, V. Putan, C. Birtok Baneasa, “Research for improving mechanical characteristics of high strength weld“, *International Conference on Applied Sciences ICAS 2018*, Banja Luka, Bosnia Herzegovina, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 477, 012008, 2018 (WOS:000461184100008)
3. **O. Lupu**, A. Socalici, F. Bucur, E. Ardelean, “Capitalization possibilities of small ferrous and pulverous waste in the iron production industry“, *International Conference on Applied Sciences ICAS 2019*, Hunedoara, Romania, Journal of Physics: Conference Series 1426, 012051, 2020, (WOS:000649150700051)

3. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI

1. **O. Lupu**, “Pulverous Ferrous Waste Processing By Pelletization“, *ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering*, 12(1), 2019, pp.39-42, (ProQuest, Google Scholars, EBSCO).

4. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate BDI

1. **O. Lupu**, L. Zgripcea, A. Socalici, E. Ardelean, “Recovery and Valorification of Iron From Industrial Waste“, *7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 416, 2018 012096, (SCOPUS).
2. L. Zgripcea, **O. Lupu**, M. Ardelean and V. Putan, “Researches Regarding Heterogeneous Welding between Carbon and Stainless Steel used in Fabrication of Cylinders’ Rod for Magnesium Alloy Extruders“, *7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 416, 2018, 012100, (SCOPUS).
3. **O. Lupu**, A. Socalici, E. Popa and O. Gaianu, “Processing of ferrous iron and steel waste in the context of the circular economy“, *International Conference on Applied Sciences ICAS 2020*, Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1781, no.012058 (SCOPUS).

5. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale (Proceedings) din străinătate

1. -

6. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

1. **O. Lupu**, “Procesarea deșeurilor feroase pulverulente și mărunte sub formă de brichete”, *Conferința Internațională Multidisciplinară Profesor Dorin Pavel – fondatorul hidrotehnicii românești, Știință și Inginerie* vol 32, Editura Agir, pp. 329-334, 2017.
2. **O. Lupu**, “Posibilități de valorificare a deșeurilor feroase prăfoase prin peletizare”, *Simpozion științific studentesc HD 47 STUD*, 26-27 Mai, Hunedoara, 2017
3. **O. Lupu**, C. Dăscălescu “Valorificarea deșeurilor feroase pulverulente în industria siderurgică prin peletizare”, *Simpozion științific studentesc HD 48 STUD*, 26-27 Mai, Hunedoara, 2018
4. **O. Lupu** and C. Dăscălescu, “Valorificarea șlamului feros în industria siderurgică”, *Simpozion științific studentesc HD 49 STUD*, 25-26 Mai, Hunedoara, 2019.
5. **O. Lupu** and O. Gaianu, “Valorificarea deșeurilor rezultate din siderurgie în contextul economiei circulare”, *Simpozion științific studentesc HD 50 STUD*, 15-16 Mai, Hunedoara, 2020

7. Premii

1. **O. Lupu**, Medalie de argint, Recovery of small waste resulting from the process of obtaining steel, PhD thesis, *International Exhibition INVENTCOR*, Deva, 2020.
2. **O. Lupu**, A. Socalici Medalie de argint, Capitalization of ferrous sludge in the steel industry, PhD thesis, *International Exhibition INVENTCOR*, Deva, 2021.
3. **O. Lupu**, A. Socalici, Premiu special și Medalie de aur - acordat de SciEdTech (Science, Education and Technology Platform), Capitalization of ferrous sludge in the steel industry, *International Exhibition INVENTCOR* Deva, 2021.
4. **O. Lupu**, A. Socalici, Diplomă de excelență - acordată de Asociația Iustin Capră, Capitalization of ferrous sludge in the steel industry, *International Exhibition INVENTCOR* Deva, 2021.
5. **O. Lupu**, A. Socalici, Medalie de aur, Research in the laboratory phase regarding the processing of steel slag by briquetting, *International Exhibition INVENTCOR* Deva, 2022.
6. **O. Lupu**, Medalie de aur, Valorification of ferrous sludges resulting from the steel industry, *Youth International Science Fair 2022*, Semarang, Indonesia, 2022.
7. **O. Lupu**, Medalie de argint, Valorification of ferrous sludges resulting from the steel industry, *World Youth Invention and Inovation Award 2022*, Yagyakarta, Indonesia, 2022.

BIBLIOGRAFIE

1. <http://www.worldsteel.org>
2. COM (2013) 407 final (<http://www.europarl.europa.eu>)
3. <https://www.steel.org>
4. <https://www.bursa.ro>
5. https://www.sustainableinsteel.eu/p/531/production_routes_for_steel.html
6. <http://apps.aist.org/steelwheel/index.html>
7. Noldin, J.H., An overview of the new and emergent ironmaking technologies, 18th Steelmaking Conference and 8th Ironmaking Conference in Rosario, Argentina, 2012
8. *** Norme interne ArcelorMittal Hunedoara
9. Drăgoi, F., Cercetări privind reducerea conținutului de gaze din oțelurile elaborate și tratate pe fluxul tehnologic EBT - LF, Teză de doctorat, Editura Politehnica Timișoara, 2012
10. http://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/electric-arc-furnace_26_83.htm
11. <http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2012/industry/metals-technologies/2012-03-steel/simetal-eaf-en.pdf>
12. Abdous, F. et al., Chaos Control of Voltage Fluctuations in Dc Arc Furnaces Using Time-Delay Feedback Control, IEEE Second International Conference on Electrical Engineering, 25-26 March 2008, University of Engineering and Technology, Lahore Pakistan, 2008
13. <http://tenova.com/public/AA/products/consteel%20evolution.pdf>
14. http://www.sms-siemag.com/download/H3_303_EAF_E_Internet.pdf
15. Geantă, V., Procese și tehnologii de obținere a oțelurilor de înaltă puritate prin tratare în afara cuptorului, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, 1998
16. http://www.anpm.ro/anpm_resources/migrated_content/files2/bref/BREF/BREF_Production_of_Iron_and_Steel_RO.pdf
17. http://www.sms-siemag.com/download/H3_303_EAF_E_Internet.pdf
18. https://www.sms-mevac.com/secondary_metallurgy.php
19. http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_1.html
20. <http://dezvoltaredurabila.gov.ro/web/obiective/>
21. https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:2941f748-b906-4952-8b11-03ffee835b39/Co-products_position_paper_vfinal.pdf
22. <https://www.midrex.com/technology/direct-reduced-iron/>
23. Hepuș, T., Socalici, A., Ardelean E., Ardelean M., Constantin N., Buzduga R., Valorificarea deșeurilor feroase mărunte și pulverulente, Timișoara, Editura Politehnica, 2011, pp. 8-200
24. Popescu, D.A. Research on the Valorization of Powdering and Small Waste in the Metallurgical Industry, Ph.D. Thesis, University Politehnica, Timisoara, Romania, 2018
25. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control, ISBN 978-92-79-26475-7, 2013 (<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu>)
26. <https://www.google.com/maps/>
27. Șerban, V., Nicolae, A., Bilanț de materiale – instrument de analiză a eficienței valorificării materialelor secundare, Metalurgia nr.1, 2004, pp. 130-137

28. Nicolae, A., ș.a., Dezvoltarea durabilă în siderurgie prin valorificarea materialelor secundare, București, Editura Printech, 2004, pp.15-50
29. Changa, M.B., Huanga, H.C., Tsaia, S.S., Chia, K.H., Chang-Chienb, G.P., Evaluation of the emission characteristics of PCDD/Fs from electric arc furnaces, Chemosphere, Volume 62, Issue 11, March 2006, pp. 1761–1773
30. *** Sistem monitorizare și control SCADA pentru instalația de desprafuire a cuptorului electric cu arc ArcelorMittal Hunedoara SA, Manual de operare, Ekoplant 2019
31. www.anpm.ro/documents/21661/2135868/Proiect+autorizatie+integrata+de+mediu+ArcelorMittal+Hunedoara.doc
32. <http://www.sms-siemag.com>
33. **Lupu, O.**, Analiza situației actuale a generării și valorificării deșeurilor mărunte rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului, Raport de cercetare nr.1, 2019
34. <http://apmgl-old.anpm.ro/files/ARPM%20Galati/AIM/Emise/rev.3-30.03.2005-SCHOEGANAESCORPORATIONEUROPESABuzau.pdf>
35. <http://www.mmediu.ro/app/webroot/uploads/files/Hoeganaes.pdf>
36. Constantin, N., Procedee neconvenționale de obținere a materialelor feroase, București, Ed. Printech, 2002.
37. *** Contract de cercetare dezvoltare și consultanță nr. BC 13/28.02.2018 cu titlul Procesarea deșeurilor feroase pulverulente și mărunte, Director proiect Conf.dr.ing. Marius ARDELEAN, Beneficiar Jonson Solution Deva, **O. Lupu**, cercetator - membru în echipa de cercetare.
38. <https://www.researchgate.net/publication/290051638>
39. Aula, M. et.all, Some environmental aspects of BF, EAF and BOF, University of Oulu, Faculty of Technology, Department of Process and Environmental Engineering, 2012
40. Socalici, A., Miloștean D., Baza energetică și de materii prime în industrie, Editura Politehnica, 2014
41. Crisan, E. Research on the Valorization of Pulverulent Waste Containing Iron and Carbon in Siderurgy. Ph.D. Thesis, University Politehnica, Timisoara, Romania, 2013
42. <https://www.primetals.com/>
43. K.E. Joyner Jr., Fastmet/Fastmelt: the final steps in waste recovery, Rev. Met. Paris, Vol. 97, No.4, pp. 461–469, 2000.
44. <https://www.kobelco.co.jp/english/products/ironunit/fastmet/>
45. **Lupu, O.**, Procedee și tehnologii de valorificare a deșeurilor mărunte rezultate din procesul de elaborare și procesare a oțelului, Raport de cercetare nr.2, 2019
46. <https://biblioteca.regielive.ro/cursuri/ecologie/tehnologii-de-prelucare-si-valorificare-a-deșeurilor-metalice-164466.html>
47. **Lupu, O.**, Socalici, A., Bucur F., Ardelean, E., “Capitalization possibilities of small ferrous and pulverous waste in the iron production industry”, International Conference on Applied Sciences ICAS 2019, Journal of Physics: Conference Series 1426, 012051, 2020
48. **Lupu, O.**, Dăscălescu, C., Valorificarea șlamului feros în industria siderurgică, Simpozion științific studentesc HD 49 STUD, 25-26 Mai, Hunedoara, 2019
49. Ardelean, E., Socalici, A., **Lupu, O.**, Bistriean, D., Dobrescu, C., Constantin, N., Recovery of waste with a high iron content in the context of the circular economy, Materials, 15(14), 2022, art.no. 4995, pp. 1-18.
50. Research Project no.31-098/2007, “Prevention and fighting pollution in the steelmaking, energetic and mining industrial areas through the recycling of small-size and powdery wastes”, Program 4 Partnerships in priority areas, 2007–2010, CO Responsible Heput T, Beneficiary CNMP Romania.

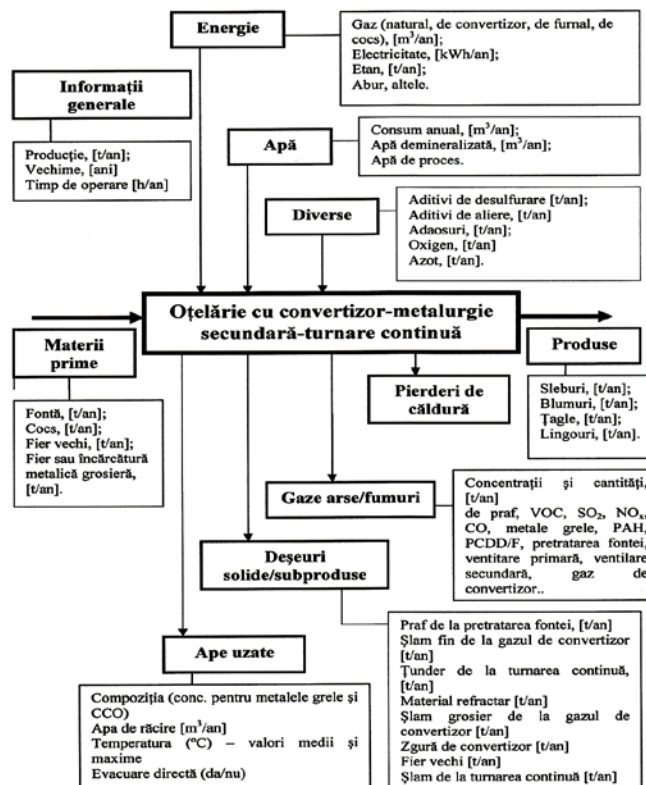
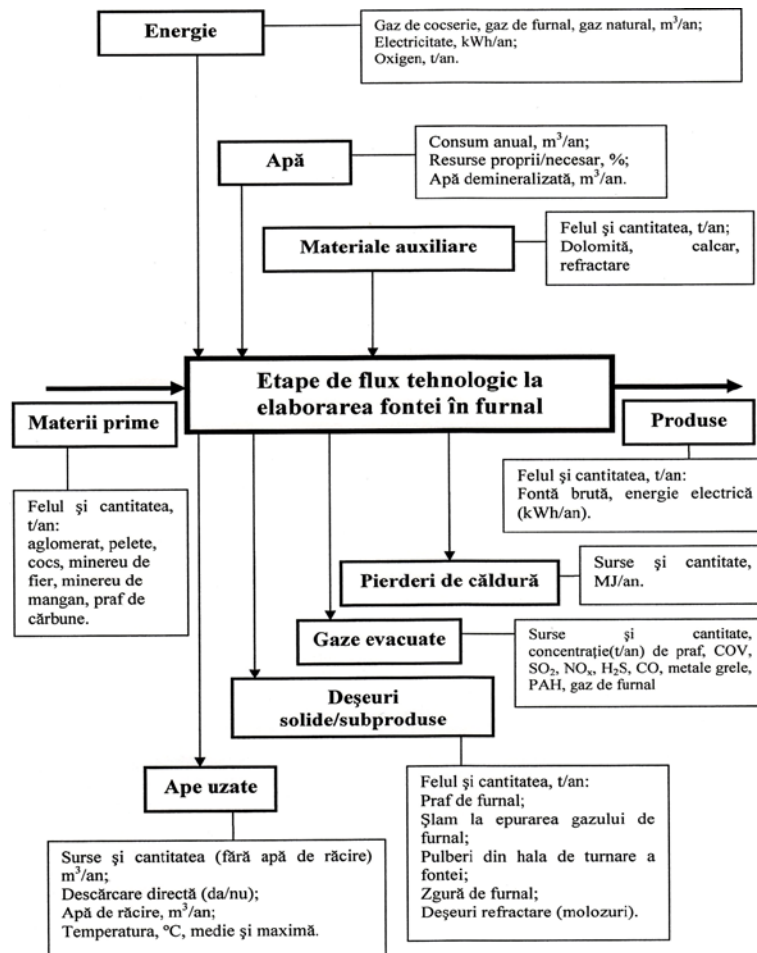
51. Steel—The Permanent Material in the Circular Economy, World Steel Association. 2020. Available online: <http://circulareconomy.worldsteel.org/> (accessed on 17 May 2022)
52. Costoiu, M., Ioana, A., Semenescu, A., Constantin, N., Florea, B., Rucai, V., Dobrescu, C., Polifroni, M., Păunescu, L., Environmental performance indicators for decision making and stakeholder interests, *Environ. Eng. Manag. J.* 2016, 15, pp.2279–2284
53. Mititelu, C.P., Hritac, M., Constantin, N., Laboratory experiments for determination of optimal characteristics of ultrafine ferrous waste briquettes to be used in cupola furnace. *Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci.*, 2015, 77, pp.157–164
54. Branca, T.A., Colla, V., Algermissen, D., Granbom, H., Martini, U., Morillon, A., Pietruck, R., Rosendahl, S., Reuse and Recycling of By-Products in the Steel Sector: Recent Achievements Paving the Way to Circular Economy and Industrial Symbiosis in Europe, *Metals*, 2020, 10, pp.345
55. Rieger, J., Colla, V., Matino, I., Branca, T.A., Stubbe, G., Panizza, A., Brondi, C., Falsafi, M., Hage, J., Wang, X., Residue Valorization in the Iron and Steel Industries: Sustainable Solutions for a Cleaner and More Competitive Future Europe, *Metals*, 2021, 11, pp.1202
56. Lohmeier, L., Thaler, C., Harris, C., Wollenberg, R., Schröder, H.W., Briquetting of fine-grained residues from iron and steel production using organic and inorganic binders. *St. Res. Int.*, 2020, 91(12), 2022238
57. **Lupu, O.**, Procesarea deșeurilor feroase pulverulente și mărunte sub formă de brichete, Conferința Internațională Multidisciplinară Profesor Dorin Pavel – fondatorul hidrotehnicii românești, Știință și Inginerie vol 32, Editura Agir 2017, pp. 329-334
58. **Lupu, O.**, Socalici, A., Popa, E., Gaianu, O., Processing of ferrous iron and steel waste in the context of the circular economy, International Conference on Applied Sciences ICAS 2020, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1781, 012058
59. **Lupu, O.**, Zgripcea, L., Socalici A., Ardelean, E. Recovery and Valorification of Iron From Industrial Waste, 7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 416, 2018 012096
60. **Lupu, O.**, Gaianu, O., Valorificarea deșeurilor rezultate din siderurgie în contextul economiei circulare, Simpozion științific studențesc HD 50 STUD, 15-16 Mai, Hunedoara, 2020
61. **Lupu, O.**, Ardelean, M., Socalici, A., Ardelean, E., Research regarding the capitalization of the waste resulted from the steel industry, *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B-Chemistry and Materials Science*, 83(1), 2021, pp. 187-196
62. Todorut, A.S. Management Research and Recovery of Small and Powdery Wastes, Resulted from Materials Industry, for Sustainable Development of Hunedoara. Ph.D. Thesis, University Politehnica, Timisoara, Romania, 2013
63. Environment and Climate Change. Available online: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/environment-climate-change.html> (accessed on 15 May 2022)
64. Rieger, J., Reiter, W., Raupenstrauch, H., Lohmeier, L., Schröder, H. W.; Thaler, C. Solutions for internal recycling of steelmaking dusts and sludges, In Proceedings of the Residue Valorization in Iron and Steel Industry—Sustainable Solutions for A Cleaner and More Competitive Future Europe, Virtual Workshop, ESTEP, Brussels, Belgium, 13 November 2020
65. Hage, J., Wang, X., Ho, H.T., Ouwehand, M., Blaffart, F., Vanderheyden, B., Metal recovery from secondary raw materials through the HISarna process - The ReclaMet project, In Proceedings of the Residue Valorization in Iron and Steel Industry Sustainable Solutions for A Cleaner and More Competitive Future EUROPE, Virtual Workshop, ESTEP, Brussels, Belgium, 13 November 2020

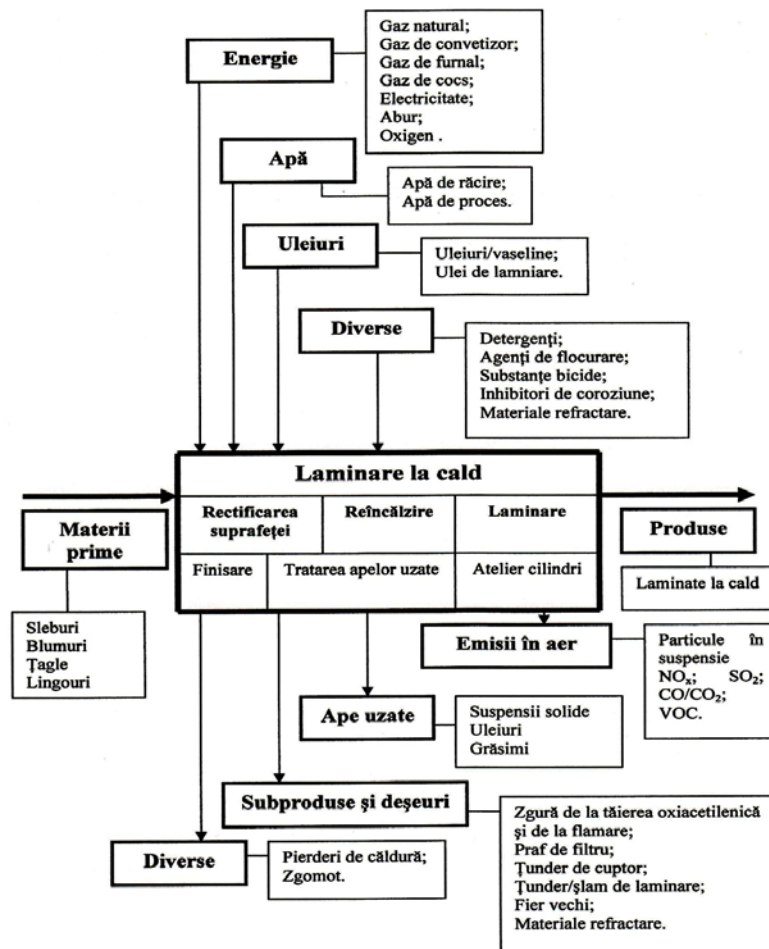
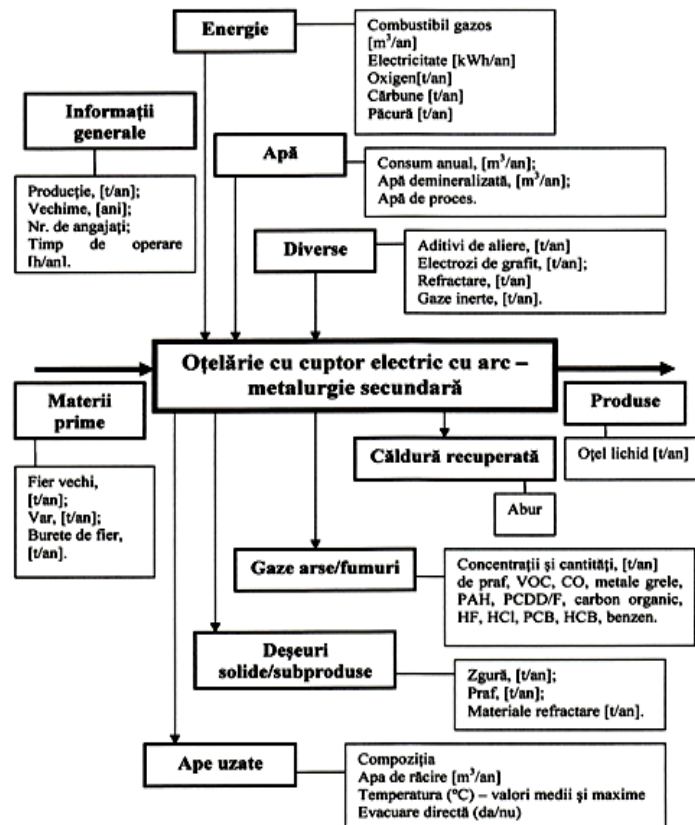
66. Kumara, N., Amritphaleb, S.S., Matthews, J.C., Lynama, J.G., Alamb, S. Abdulkareem, O.A. Synergistic utilization of diverse industrial wastes for reutilization in steel production and their geopolymerization potential. *Waste Manag.* 2021, 126, 728–736
67. Șerban, S., Cercetări privind valorificarea deșeurilor cu conținut de fier și elemente pentru alierea oțelului, Teza de doctorat, Politehnica Timișoara, 2015
68. Strugariu, L., Cercetări privind valorificarea subproduselor rezultate de la epurarea apelor industriale, Teza de doctorat, Politehnica Timișoara, 2014
69. World Steel Association Life Cycle Inventory Study. 2019. Available online: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-thinking.html> (accessed on 15 May 2022)
70. Petrache, R., Studii și cercetări privind valorificarea deșeurilor feroase fine în condiții ecologice prin tehnologii neconventionale, teză doctorat, Universitatea Politehnica București, 2011
71. Panasiuk, D., Daigo, I., Hoshino, T., Hayashi, H., Yamasue, E., Tran, D.H., Sprecher, B., Shi, F., Shatokha, V., International comparison of impurities mixing and accumulation in steel scrap. *J. Ind. Ecol.* 2022, 26, 1040–1050
72. Zgripcea, L., **Lupu, O.**, Putan V., Birtok Baneasa, C., Research for improving mechanical characteristics of high strength weld, International Conference on Applied Sciences ICAS May 2018 Banja Luka, Bosnia Herzegovina, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 477, 012008, 2018
73. Rohan, M., Cement and concrete industry integral part of the circular economy, *Roman. J. Mater.* 2016, 46, 253–258
74. Dworak, S., Fellner, J., Steel scrap generation in the EU-28 since 1946—Sources and composition, *Resour. Conserv. Recycl.* 2021, 173, 105692.
75. Zgripcea, L., **Lupu, O.**, Ardelean M., Putan, V., Researches Regarding Heterogeneous Welding between Carbon and Stainless Steel used in Fabrication of Cylinders' Rod for Magnesium Alloy Extruders, 7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 416, 2018, 012100
76. **Lupu, O.**, Zgripcea, L., Socalici, A., Popa E., Hărău, C., Pulverous ferrous waste processing by agglomeration, International Conference on Applied Sciences ICAS May 2018 Banja Luka, Bosnia Herzegovina, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 477, 012007
77. Budiul Berghian, A., **Lupu, O.**, Socalici, A., Birtok Baneasa, C., Harnessing the ferrous sludge resulting from steel industry in the context of the circular economy, *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B-Chemistry and Materials Science*, 83(4), 2021, pp. 241-250
78. Buzea, O., Îndrumător furnale, Partea I, Materii prime, Litografie Combinatul Siderurgic Galați, 1995
79. Constantin, N., Determinarea caracteristicilor metalurgice ale materialelor din amestecul de aglomerare utilizat la U.A.F.-SIDEX Galați, Contract nr. 9/1996 beneficiar ICEM SA București
80. S.S. Fichera, S. Arfö, Y.L. Huang, A. Matarazzo, A. Bertino, Circular Economy and Technological Innovation in Steel Industry, *Procedia Environmental Science, Engineering and Management* vol. 7, 2020, pp.9-17
81. **Lupu, O.**, “Posibilități de valorificare a deșeurilor feroase prăfoase prin peletizare”, Simpozion științific studentesc HD 47 STUD, 26-27 Mai, Hunedoara, 2017
82. **Lupu, O.** “Pulverous Ferrous Waste Processing By Pelletization”, *ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering*, 12(1), pp.39-42, 2019
83. Matino, I., Colla, V., Branca, T.A., Romaniello, L., Optimization of by-products reuse in the steel industry: Valorization of secondary resources with a particular attention on their pelletization. *Waste Biomass Valoriz.* 2017, 8, 2569–2581

84. Serban, S., Kiss, I., Identifying possibilities for superior recovery by pelletization of industry related small and powdery iron containing waste. *Acta Polytechnica Hung.* 2021, 18, 79-104
85. Bistriian, D.A., *Numerical Methods*, PIM Publishing House: Iasi, Romania, 2017
86. Bistriian, D.A., *Mathematical Models, and Numerical Algorithms for Stability Investigation of Swirling Hydrodynamic Systems*, Doctoral dissertation, Edition: Series 14, Nr.2, Politehnica Publishing House, Romania, 2011
87. Conslik, J., *Optimal Response Surface Design in Monte Carlo Sampling Experiments*, *Ann. Econ. Soc. Meas.* 1974, 3, 463–473
88. Bistriian, D.A., *Parabolized Navier–Stokes model for study the interaction between roughness structures and concentrated vortices*, *Phys. Fluids* 2013, 25, 104103
89. Myers, R., Montgomery, D., Anderson-Cook, C.M., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2009
90. Miller, S., *The Method of Least Squares; From the book The Probability Lifesaver: All the Tools You Need to Understand Chance*, Princeton University Press: Princeton, USA, 2017
91. Nocedal, J., Wright, S. *Numerical Optimization*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2006
92. Boyd, S., Vandenberghe, L., *Convex Optimization*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004
93. Banzhaf, W., Nordon, P., Keller, R.E., Francone, F.D., *Genetic Programming-An Introduction*; Morgan Kaufmann Publishers: San Francisco, CA, USA, 1998
94. *European Semester Thematic Factsheet Public Procurement*. Available online: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/file_import/european-semester_thematic-factsheet_resource-efficiency_ro.pdf (accessed on 26 May 2022)
95. <https://www.tmk-group.com>
96. http://www.tmk-artrom.eu/tmkartrom_steel_mill

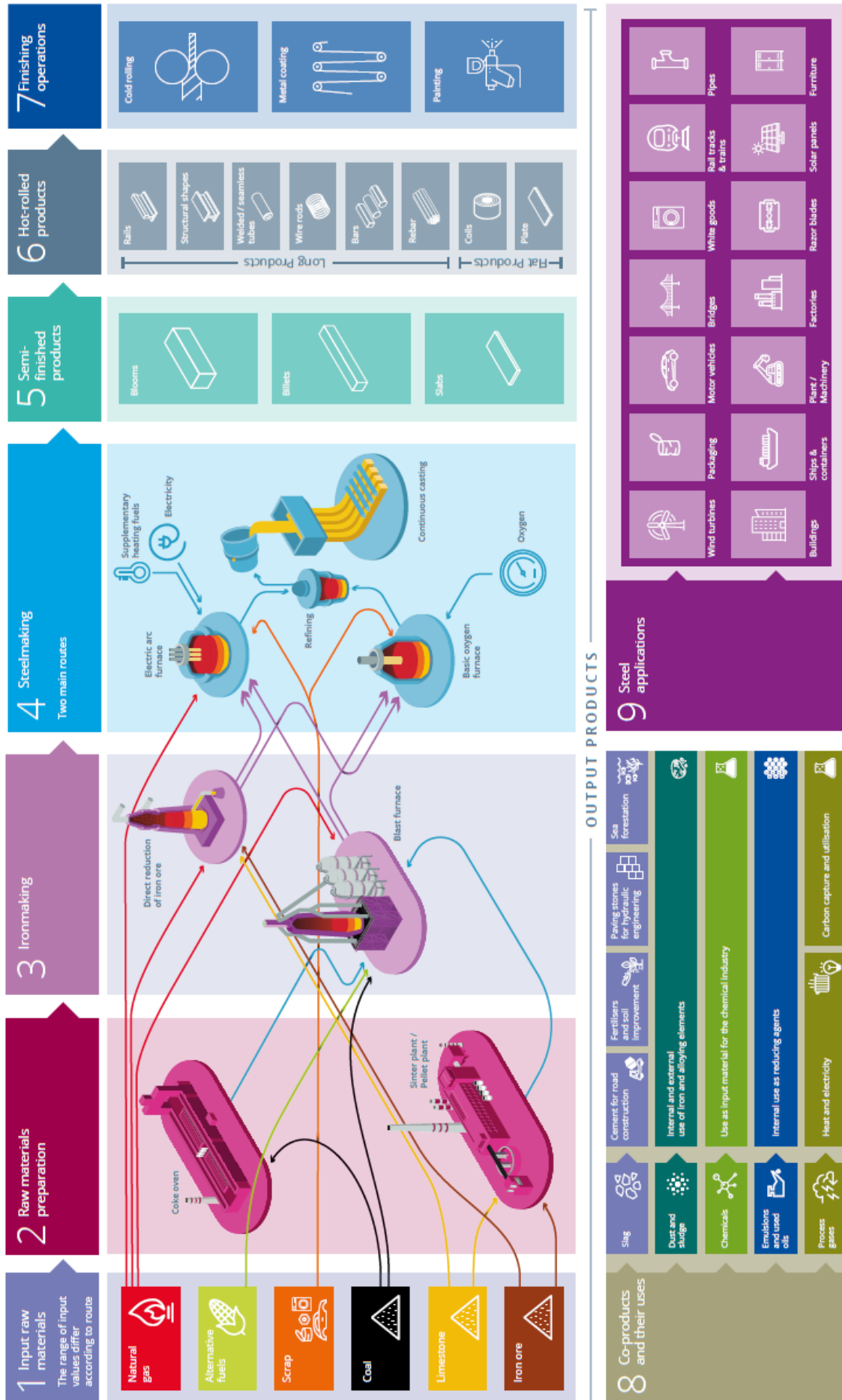
Anexa 1

Bilanțurile calitative al intrărilor și ieșirilor specifice procesării oțelului





Fluxurile tehnologice de procesare a oțelului



Anexa 2
Aspecte din cadrul experimentărilor în fază de laborator



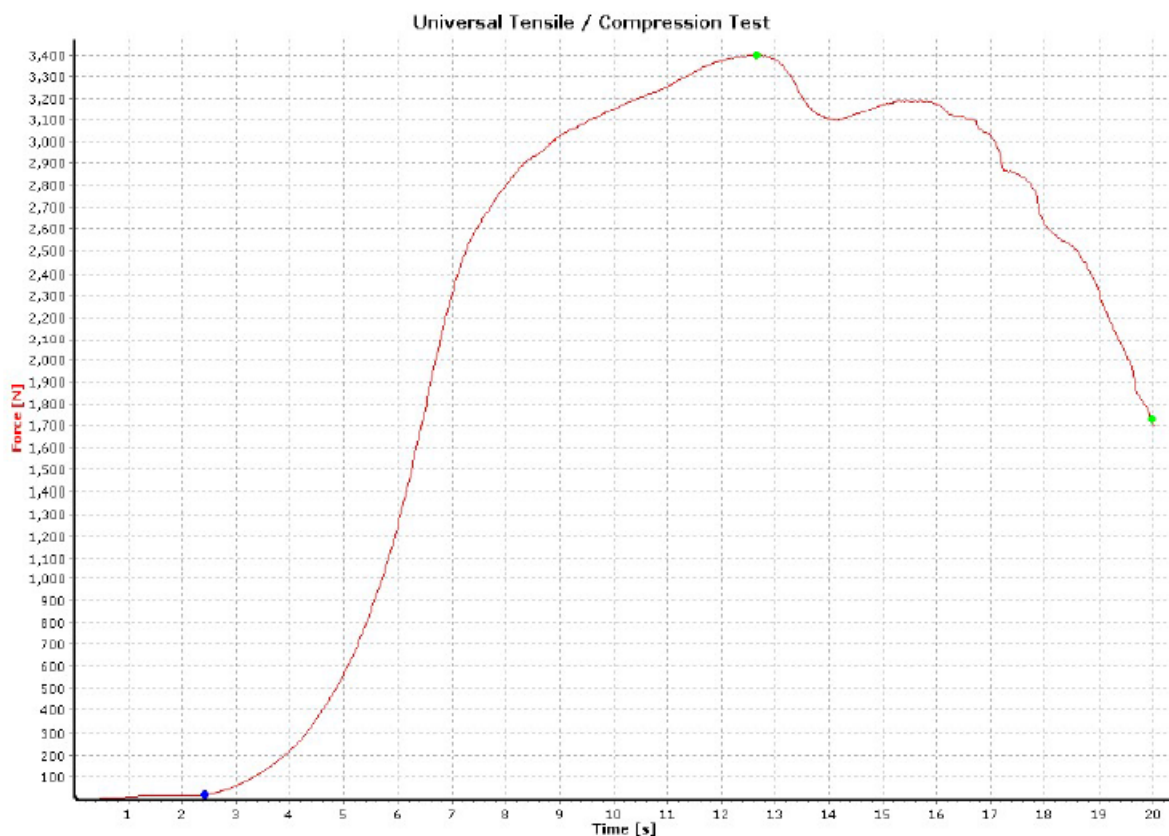


Anexa 3

Incercări compresiune brichete (subcapitolul 5.2.1)

Test parameters

Test Universal Tensile / Compression Test
 UTM type Machine
 Load cell 50 kN
 Extensometer XHead
 Clamping device no
 Test area Lower test area
 Sample dimensions D = 45 mm; h = 35 mm; m = 145 g
 Length data Le = 50 mm; Lc = 100 mm; L0 = 10 mm
 Test rates V0 = 5 mm/min; V1 = 10 mm/min
 Rate switch points F0 = 20 N
 Test end criterions Time = 30 s; Xhead = 10 mm; Force = 6 kN; dF = 50 %



Test results

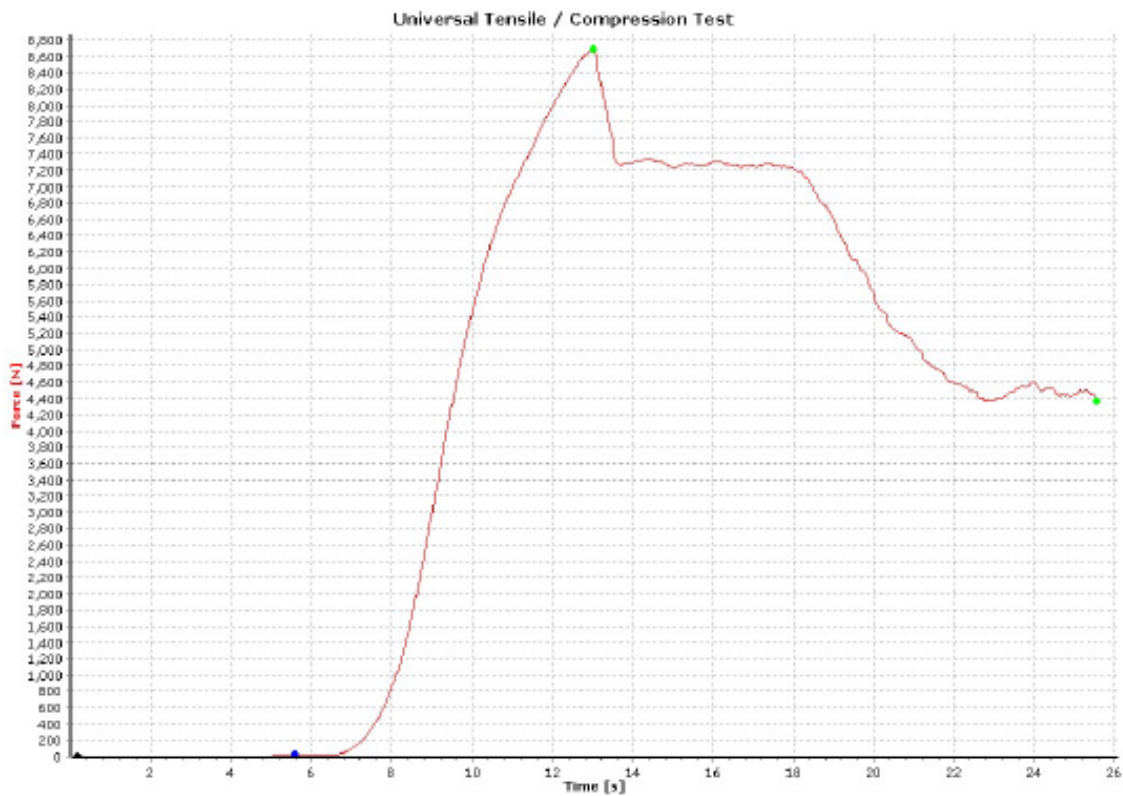
	OK	Date	Time	Comm.1	Comm.2	FH N	RH N/mm ²	AH %	dLH mm	AB %	dLB mm
1	x	22.06.20	02:13			3400.35	2.14	3.43	1.71	5.88	2.93

	A11 N	FB N	RB N/mm ²
1	0.10	1727.30	1.09

Incercări compresiune brichete durificate la rece (R3)

Test parameters

Test Universal Tensile / Compression Test
 UTM type Machine
 Load cell 50 kN
 Extensometer XHead
 Clamping device no
 Test area Lower test area
 Sample dimensions D = 45 mm; h = 35 mm; m = 241 g
 Length data Le = 50 mm; Lc = 100 mm; L0 = 10 mm
 Test rates V0 = 5 mm/min; V1 = 10 mm/min
 Rate switch points F0 = 20 N
 Test end criterions Time = 30 s; Xhead = 10 mm; Force = 20 kN; dF = 50 %



Test results

	OK	Date	Time	Comm.1	Comm.2	FH N	RH N/mm ²	AH %	dLH mm	AB %	dLB mm
1	x	22.06.20	02:29			8695.80	5.47	2.50	1.24	6.72	3.33

	A11 N	FB N	RB N/mm ²
1	0.10	4367.35	2.75

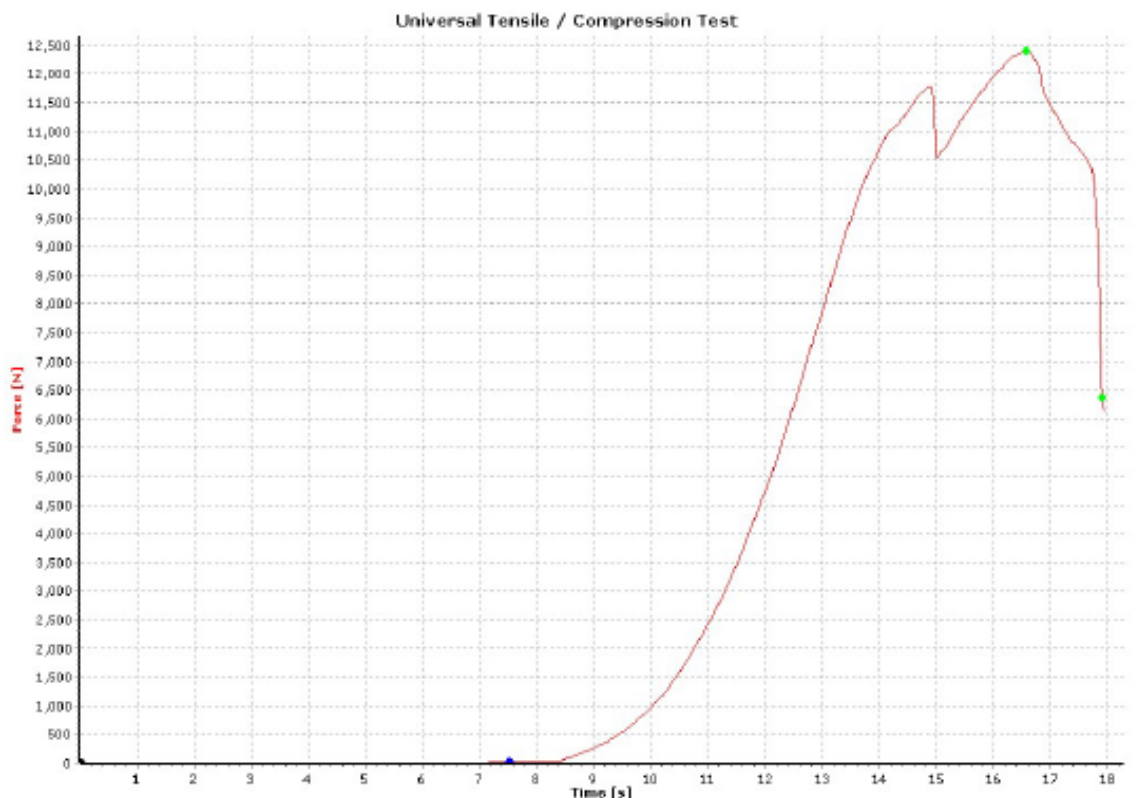
Incercări compresiune brichete durificate la cald (R4)

Anexa 4

Incerări compresiune brichete (subcapitolul 5.2.3)

Test parameters

Test	Universal Tensile / Compression Test
UTM type	Machine
Load cell	50 kN
Extensometer	XHead
Clamping device	no
Test area	Lower test area
Sample dimensions	D = 45 mm; h = 35 mm; m = 160 g
Length data	Le = 50 mm; Lc = 100 mm; L0 = 10 mm
Test rates	V0 = 5 mm/min; V1 = 10 mm/min
Rate switch points	F0 = 20 N
Test end criterions	Time = 30 s; Xhead = 10 mm; Force = 20 kN; dF = 50 %



Test results

	OK	Date	Time	Comm.1	Comm.2	FH N	RH N/mm ²	AH %	dLH mm	AB %	dLB mm
1	x	22.06.20	02:22			12405.95	7.80	3.05	1.51	3.50	1.73

	A11 N	FB N	RB N/mm ²
1	0.10	6371.75	4.01

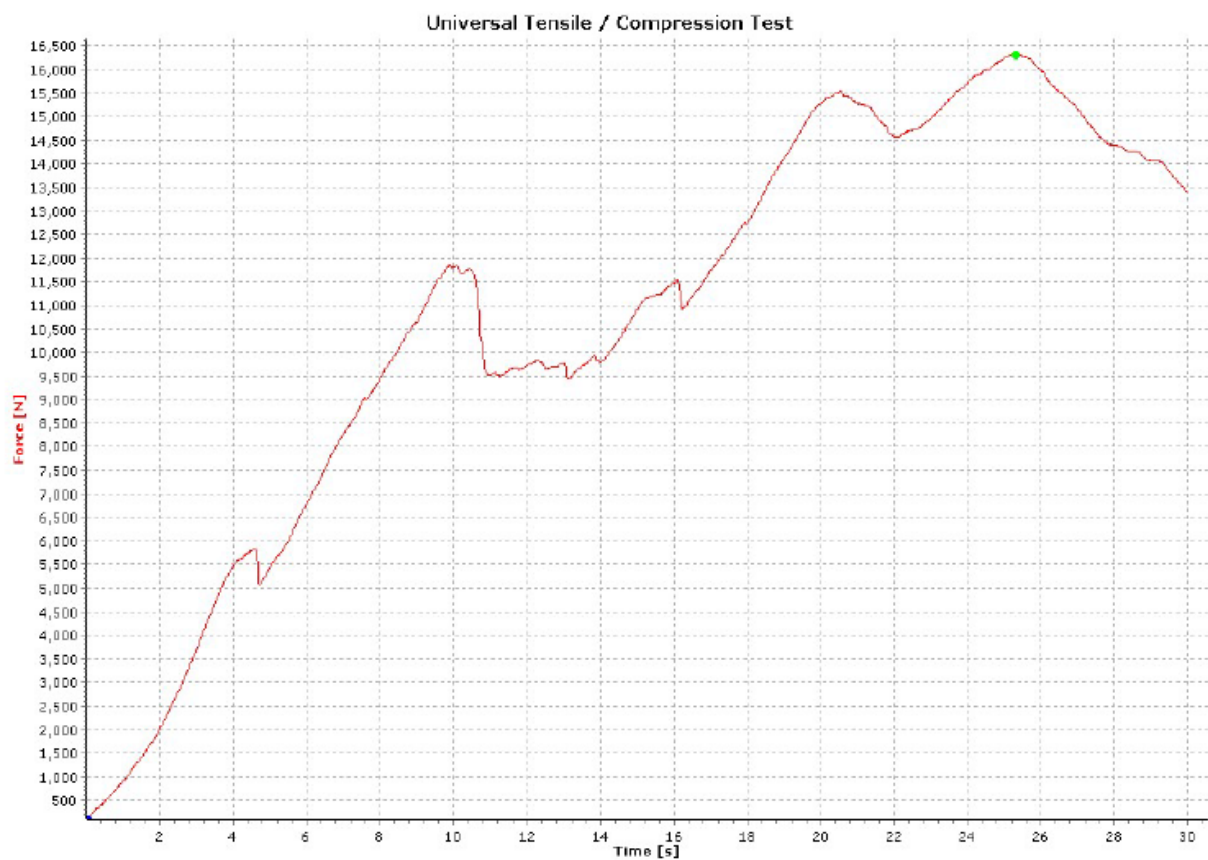
Incerări compresiune brichete cu zgură

Anexa 5

Inercări compresiune brichete (subcapitolul 5.2.4)

Test parameters

Test	Universal Tensile / Compression Test
UTM type	Machine
Load cell	50 kN
Extensometer	XHead
Clamping device	no
Test area	Lower test area
Sample dimensions	D = 45 mm; h = 45 mm; m = 327 g
Length data	Le = 50 mm; Lc = 100 mm; LO = 10 mm
Test rates	V0 = 5 mm/min; V1 = 10 mm/min
Rate switch points	F0 = 20 N
Test end criterions	Time = 30 s; Xhead = 10 mm; Force = 30 kN; dF = 50 %



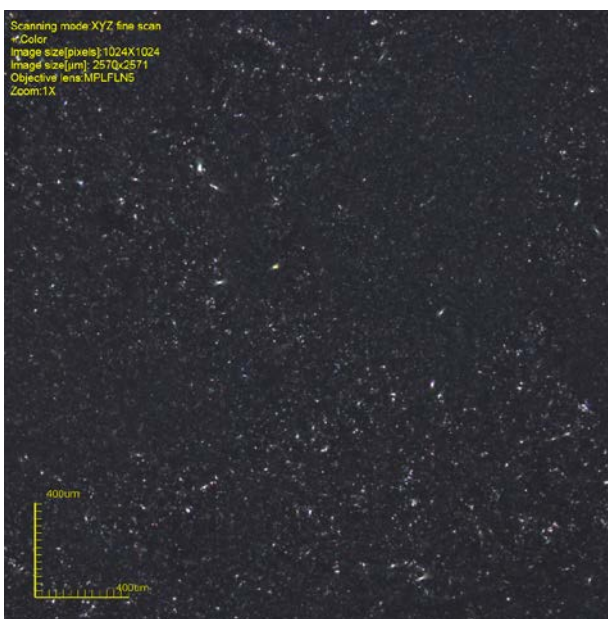
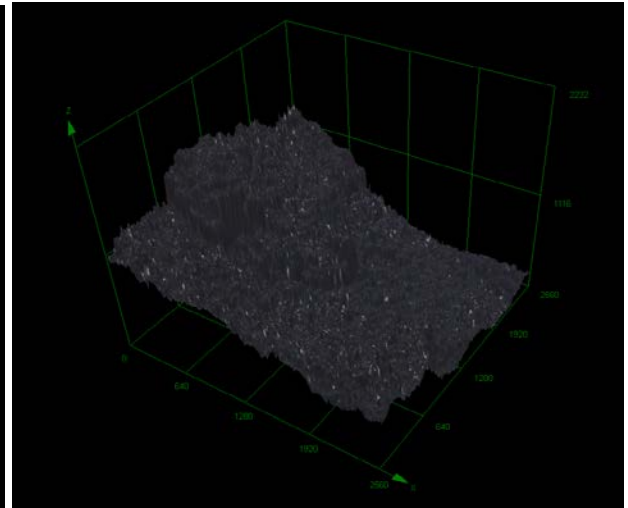
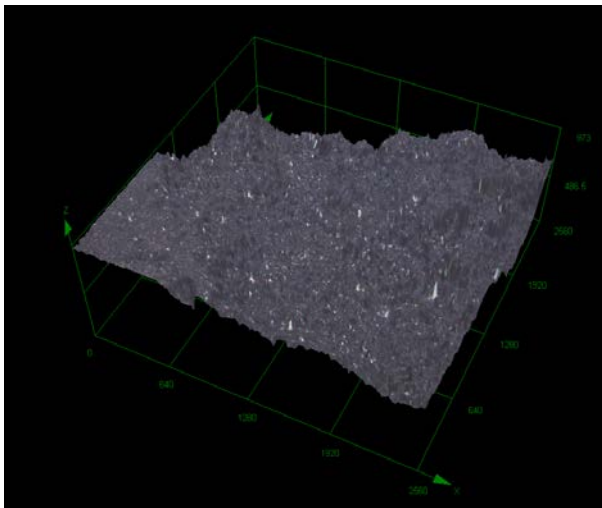
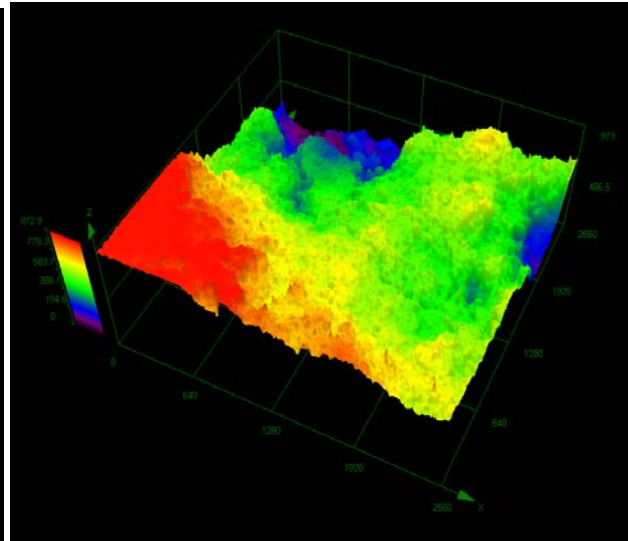
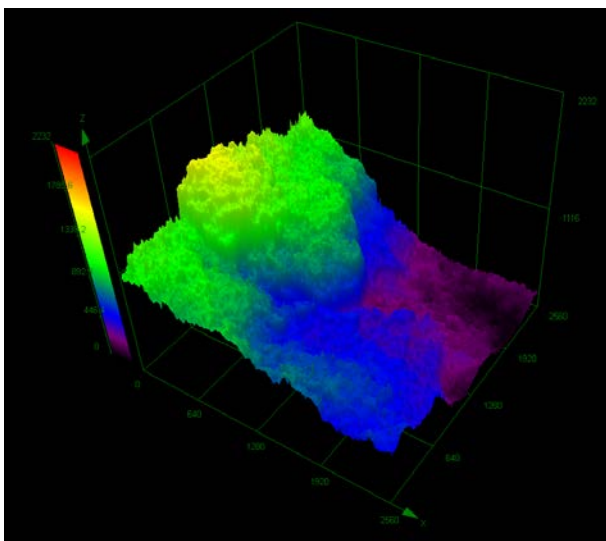
Test results

	OK	Date	Time	Comm.1	Comm.2	FH N	RH N/mm ²	AH %	dLH mm	AB %	dLB mm
1	x	22.06.20	02:36			16315.60	10.26	8.45	4.22	0.00	0.00

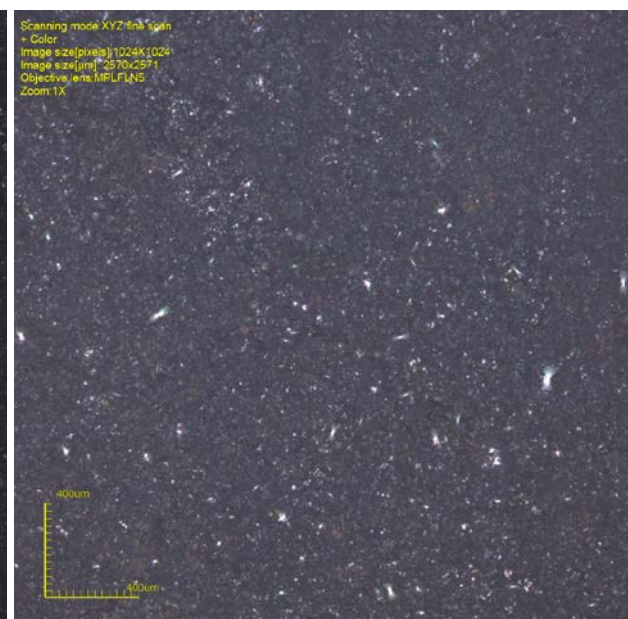
	A11 N	FB N	RB N/mm ²
1	0.10	0.00	4.36

Anexa 6

Analiza topografică și morfologică a brichetelor experimentale (subcapitolul 5.2.4)



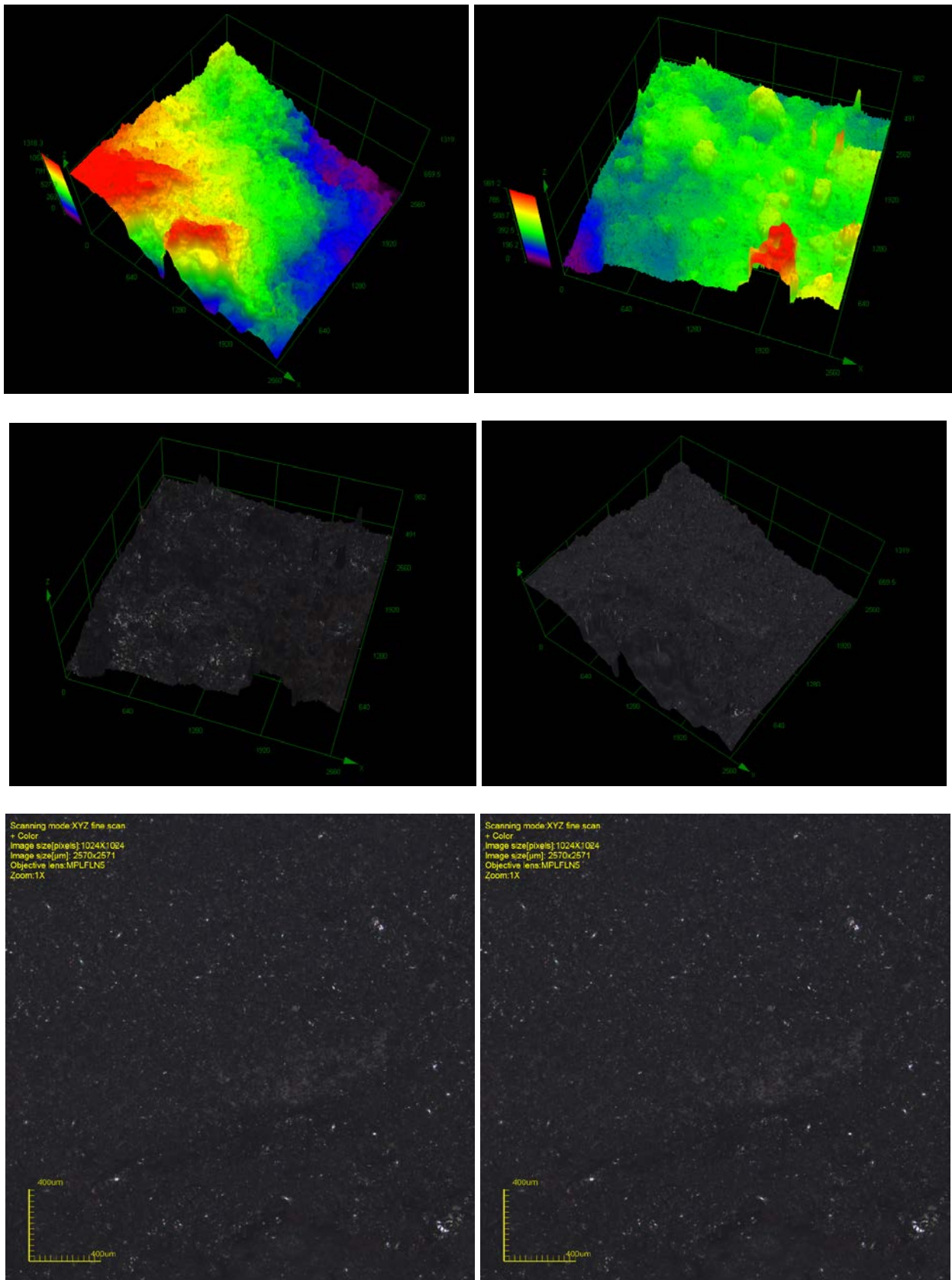
proba 1



proba 2

Harta 2D și imaginile 3D a brichetei

Anexa 7
Analiza topografică și morfologică a aglomeratului experimentale (subcapitolul 5.3.3)



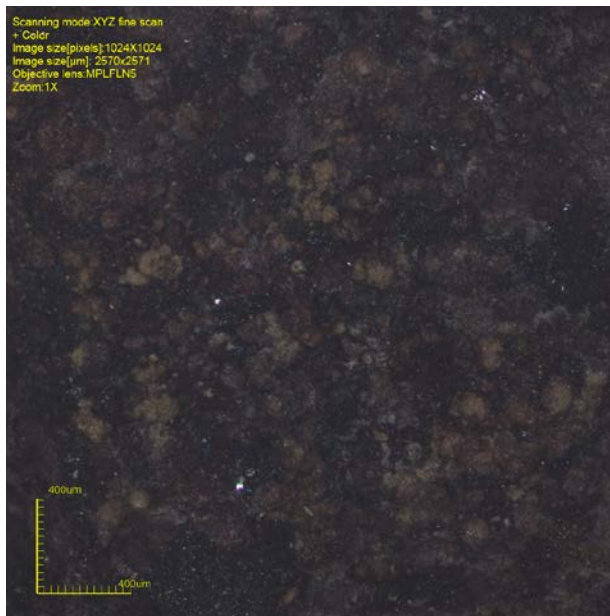
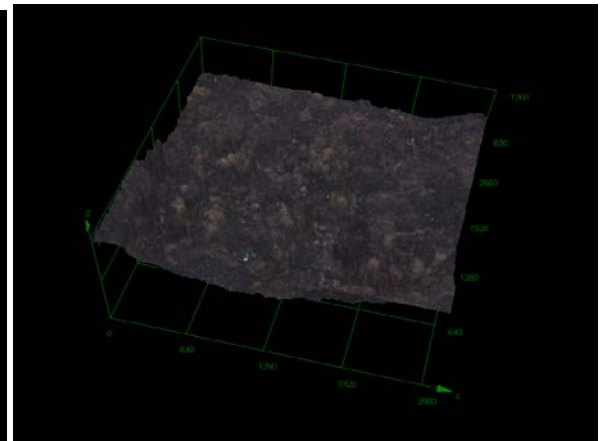
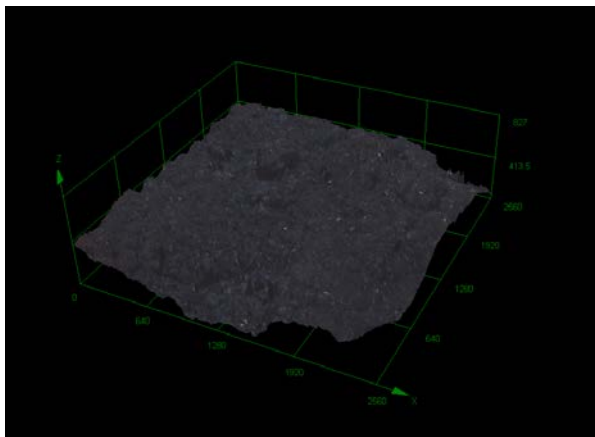
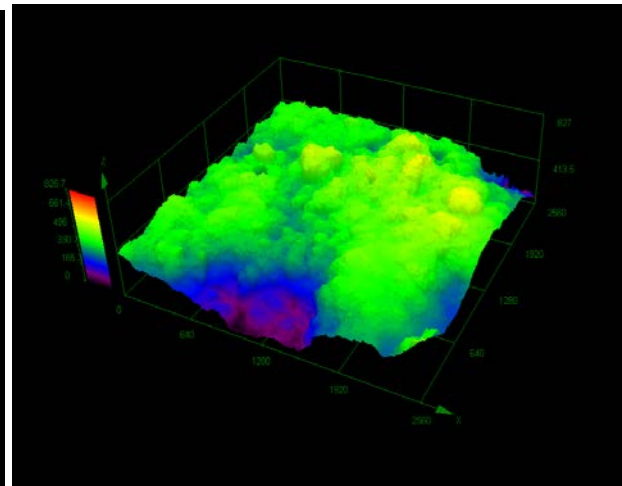
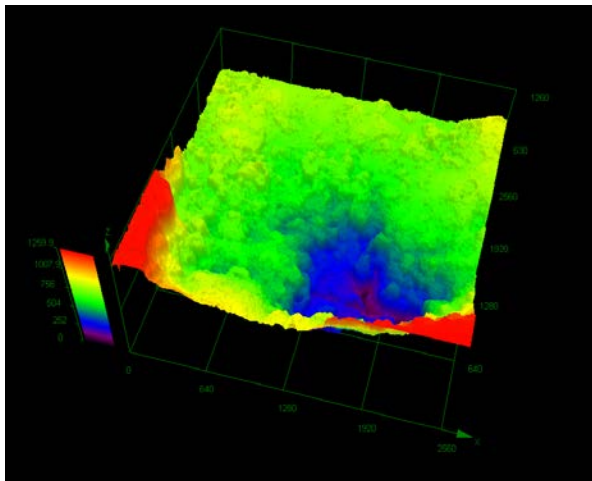
Proba 1

Harta 2D și imaginile 3D a aglomeratului

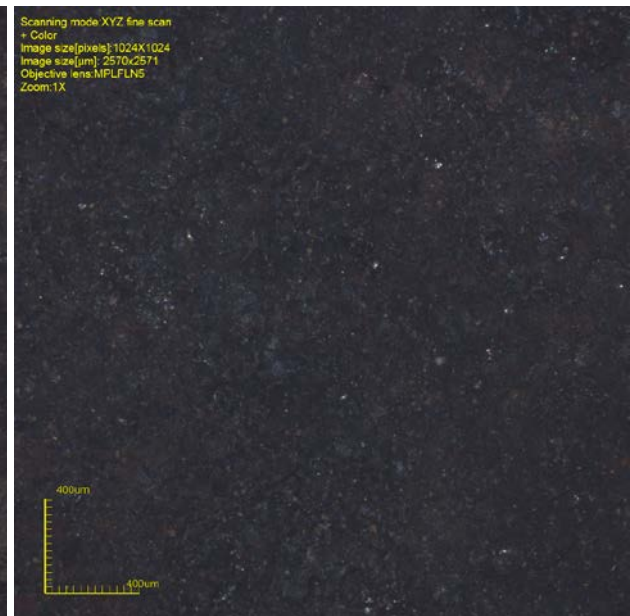
Proba 2

Anexa 8

Analiza topografică și morfologică a peletelor experimentale (subcapitolul 5.4)



Proba 1



Proba 2

Harta 2D și imaginile 3D a peletelor

Programarea de tip Box-Behnken a experimentelor în cazul a trei factori (subcapitol 6.1)

Nr. rețetă	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁	y ₂	y ₃
1.	20	28	40	2	3	1
2.	15	28	45	4	6	2
3.	22	25	40	3	5	2
4.	20	30	33	2	4	2
5.	20	28	40	3	6	3
6.	16	25	50	4	8	4
7.	18	25	42	2	5	3
8.	15	25	50	3	6	3
9.	20	25	40	4	7	3
10.	25	30	30	4	8	4
11.	15	22	50	4	9	5
12.	18	25	42	3	6	3
13.	15	25	50	4	8	4
14.	20	25	40	4	7	3
15.	25	40	30	2	5	3

Programarea de tip Box-Behnken a experimentelor în cazul a trei factori (subcapitol 6.2)

Nr. rețetă N	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁	y ₂	y ₃
1.	20	70	5	6	12	6
2.	20	0	5	4	10	5
3.	100	35	0	9	15	6
4.	60	35	5	6	13	7
5.	100	35	10	9	16	7
6.	60	0	10	5	12	7
7.	60	35	5	7	14	7
8.	100	0	5	7	15	8
9.	60	0	0	6	13	7
10.	60	35	5	8	16	8
11.	60	70	10	7	15	8
12.	60	70	0	5	10	5
13.	20	35	10	4	9	5
14.	100	70	5	9	18	9
15.	20	35	0	5	11	6

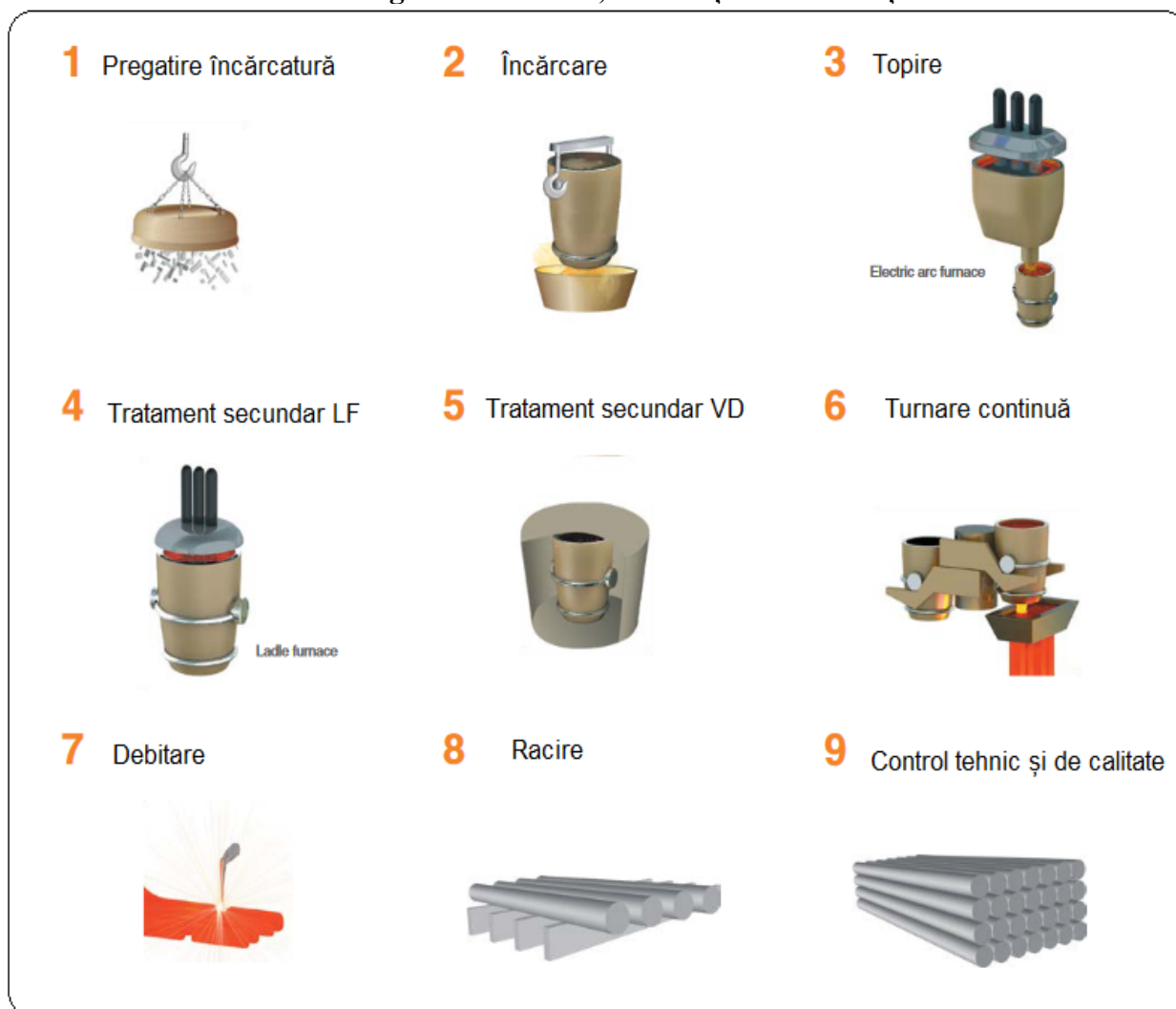
Programarea de tip Box-Behnken a experimentelor în cazul a trei factori (subcapitol 6.3)

Nr. rețetă N	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁	y ₂	y ₃
1.	45	40	7.5	6	10	4
2.	45	40	7.5	5	11	6
3.	60	40	10.0	7	12	5
4.	30	60	7.5	4	8	4
5.	30	40	10.0	3	7	4
6.	45	60	5.0	5	9	4
7.	60	40	5.0	8	15	7
8.	45	40	7.5	6	12	6
9.	45	20	10.0	5	11	6
10.	60	60	7.5	6	13	7
11.	45	20	5.0	4	9	5
12.	30	40	5.0	3	7	4
13.	30	20	7.5	2	5	3
14.	60	20	7.5	6	13	7
15.	45	60	10.0	5	11	6

Anexa 10

Aspecte tehnologice din timpul experimentărilor industriale, efectuate în uzina siderurgică TMK Reșița, în contextul verificării datelor experimentale

Flux tehnologic de elaborare, tratare și turnare a oțelului



Compoziția chimică a oțelului marca 4140, [%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Alte el.
0,38-0,43	0,15-0,30	0,75-1,00	max 0,035	max 0,035	0,8-1,1	0,15-0,25

Compoziția chimică a oțelului marca 4130, [%]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Alte el.
0,28-0,33	0,15-0,35	0,40-0,60	max 0,40	max 0,40	0,8-1,1	0,15-0,25



Bricheta sortiment E3P - șlam feros

