



**Simularea elaborării unor aliaje feroase în cuptorul cu încălzire prin
arc electric la nivel industrial**

- ÎNDRUMAR PROIECT –

Elaborat:

Ș.I.dr.ing. Daniela -Lucia CHICET,

Asist.univ.dr.ing. Elena – Ionela CHERECHEȘ

Prof.univ.dr.ing. Nicanor CIMPOEȘU

Simularea elaborării unor aliaje feroase în cuptorul cu încălzire prin arc electric la nivel industrial

1. Introducere

1.1. Obiective

Proiectul propune parcurgerea principalelor etape de obținere a unei băi metalice cu o compoziție chimică specificată, prin simularea etapelor de elaborare a unei cantități de material metalic la nivel industrial (90 tone).

Scopul acestei simulări este de a alege sorturile potrivite de materia primă (din punct de vedere calitativ dar și cantitativ) și topi materia primă, pentru a atinge compoziția impusă a unei clase de oțeluri, în timpul alocat și cu temperatura de evacuare precizată. De asemenea, trebuie avut în vedere faptul că întreaga operațiune ar trebui să decurgă cu costuri minime prin eficientizarea tuturor etapelor de lucru.

*Declinare de responsabilitate

Acest document a fost pregătit ca un ghid de utilizare pentru rularea simulării elaborării în cuptorul cu arc electric (EAF – electric arc furnace), disponibil pe platforma <http://www.steeluniversity.org/>. Simularea interactivă a fost concepută ca un instrument educațional și de instruire atât pentru studenții din domeniul ingineriei materialelor, cât și pentru angajații din siderurgie. Informațiile conținute în acest document, cât și cele disponibile pe site-ul web asociat sunt furnizate cu bună-credință, dar nu asigură nicio garanție, reprezentare, declarație sau angajament cu privire la acestea, sau cu privire la orice informații din orice alt site web conectat prin alte link-uri (inclusiv orice garanție, reprezentare, declarație sau angajament conform căruia orice informație sau utilizarea oricăror astfel de informații fie în acest site web, fie în orice alt site web respectă legile locale sau naționale sau cerințele oricăror organisme de reglementare sau statutare). Utilizarea oricărei informații din acest document este în întregime la latitudinea utilizatorului. În niciun caz, World Steel Association sau partenerii lor nu vor fi răspunzători pentru orice costuri, pierderi, cheltuieli sau daune (directe sau indirecte, consecințe, speciale, economice sau financiare, inclusiv pierderi de profit), care ar putea fi cauzate de utilizarea informațiilor conținute în acest document. Nimic din conținutul prezentului document nu va fi considerat fie un sfat de natură tehnică sau financiară pentru a acționa sau nu în vreun fel.

1.3. Noțiuni introductive

Cuptorul cu arc electric (EAF) este astăzi cel mai utilizat agregat de elaborare implicat în reciclarea deșeurilor feroase. Există o mare varietate de materiale de acest tip, atât din punct de vedere al compoziției chimice (de la oțel carbon simplu până la oțel de scule înalt aliat), cât și al geometriei (de la șpan, tablă mărunțită și până la grinzi de dimensiuni mari). Prin topirea deșeurilor într-un astfel de agregat de elaborare, cu ajutorul electrozilor și a curentului electric, se poate produce un oțel nou și funcțional, recuperându-se aproximativ 60-75% din cantitatea introdusă. Astfel, în loc să se utilizeze numai materii prime de calitate superioară, elementele de bază din deșeurile feroase și elementele de aliere valoroase pot fi refolosite, ceea ce este benefic atât din punct de vedere economic, cât și din punct de vedere al protecției mediului înconjurător.

Căldura necesară pentru topirea resturilor de oțel este asigurată de arcurile electrice (de obicei trei), create între electrozi și resturile de fier vechi din cuptor. Puterea electrică a EAF-urilor uzuale se situează în intervalul de 50-120 MW, în funcție de dimensiunea cuptorului. Topirea deșeurilor are loc la un interval de temperatură de 1500-1550°C, în funcție de compoziția deșeurilor de oțel. După ce resturile metalice au fost topite, temperatura crește în mod normal, astfel încât să poată fi efectuate reacțiile de rafinare. Oxigenul (O) și carbonul (C) pot fi injectate în diferite faze ale etapei de elaborare a oțelului în stare topită și respectiv a zgurii. Cu toate acestea, reacțiile pot duce la formarea unor produse care sunt în detrimentul calității oțelului și care trebuie manipulate cu atenție. Pentru a realiza acest lucru, se formează o cantitate de zgură cu ajutorul agenților care formează zgură, cum ar fi varul, dolomitul și fluoritul. Zgura, având o densitate mai mică decât oțelul, plutește în mod normal pe suprafața oțelului lichid. Pe lângă absorbția impurităților din oțel, zgura protejează și oțelul de atmosferă. În plus, protejează pereții cuptorului de arcuri, sporind astfel eficiența electrică a utilajului. Prin urmare, este de o mare importanță menținerea unei calități înalte a zgurii și să i se ofere proprietăți de spumare. Odată ce resturile au fost topite și rafinate la compoziția chimică solicitată și la temperatura dorită, conținutul este introdus într-o oală pentru tratamentul secundar al băii metalice și pentru turnare. Turnarea se poate realiza fie printr-un orificiu, fie printr-o gaură poziționată în partea de jos a cuptorului.

La prima vedere, procesele de bază ale EAF par destul de simple - oferind pur și simplu suficientă energie electrică pentru a încălzi și a topi încărcătura de oțel. Cu toate acestea, întregul proces are loc în condiții de temperatură extremă, care complică întreținerea cuptorului și corectarea oricăror altor probleme care pot apărea. De exemplu, pentru a păstra căptușeala refractară în parametrii de funcționare panourile de răcire cu apă sunt încorporate în pereții cuptorului. Fără un control atent acestea se pot supraîncălzi și deteriora considerabil, prin urmare, temperatura procesului trebuie ajustată corespunzător. În timpul procesului, înaintarea electrozilor în încărcătură trebuie să fie echilibrată pentru a utiliza cât mai bine sursa de alimentare, fiind atent este controlată de un operator specializat. Electrozii trebuie manipulați cu atenție, datorită rezistenței lor mecanice limitate pentru evitarea deteriorării lor prin rupere, fapt ce crește costul de producție și durata de realizare a acesteia. Cea mai mare atenție trebuie acordată în momentul în care cuptorul este umplut cu o cantitate excesivă de resturi groiere, deoarece atunci există riscul cel mai ridicat de rupere a electrozilor. Aceștia se uzează progresiv în timpul încălzirii și topirii și trebuie luate măsuri pentru a evita „electrozii scurți”. Acestea sunt exemple ale unora dintre numeroasele evenimente care pot apărea în timpul procesului EAF. Cu toate acestea, în această simulare, unele aspecte au trebuit simplificate pentru a face simularea EAF atrăgătoare și interesantă.

2. Setările de simulare

Ecranul de setare pentru simularea *Elaborării în cuptorul cu arc electric* este compus din cinci etape:

- I. „User level” - selectarea nivelului utilizatorului
- II. „Steel Grade” – selectarea tipului de oțel ce va fi elaborat, după compoziția chimică

- III. „Please select your steel grade and compose your scrap selection” – selectarea tipurilor de materie primă ce vor fi utilizate pentru elaborare
- IV. „Scrap yard” – selectarea cantității de materie primă ce se va introduce în containerele de încărcare a cuptorului
- V. „Summary” – prezintă un rezumat al elementelor selectate anterior și permite rularea simulării.

În continuare sunt descrise funcționalitățile pentru fiecare etapă.

2.1. „User level” – nivelul utilizatorului

În primul pas trebuie ales dacă utilizatorul participă ca student universitar („university student”) sau ca operator în industrie („steel industry works technical”).

The screenshot shows the 'steeluniversity' Electric Arc Furnace Simulation interface. Under 'Simulation settings', the 'User Level' section is highlighted in red and labeled 'Step 1'. It contains two radio button options: 'University Student' (which is selected) and 'Steel Industry Works Technical'. A text box below explains that the 'University Student' level has less variation in initial tap compositions and required casting times, making it easier to repeat the simulation. Below the 'User Level' section, a list of steps is shown: 'Steel Grade' (Step 2), 'Please select your steel grade and compose your scrap selection.' (Step 3), 'Scrap Yard' (Step 4), and 'Summary' (Step 5). Each step is represented by a small icon and a text label.

Figura 1: Interfața pentru selecția nivelului utilizatorului

Nivelul de dificultate va fi diferit:

- pentru nivelul de student vor fi mai puține variații ale compoziției inițiale a încărcăturii și timpilor necesari pentru elaborare, astfel încât va fi mai ușor de repetat simularea, dacă este cazul. De asemenea, simularea nu conține căderi ale echipamentelor.
- pentru nivelul de operator în industrie vor fi introduse mai multe variații de compoziție și timpi de elaborare, astfel încât la fiecare reluare a simulării se vor face calcule diferite. De asemenea, sunt introduse defecțiuni ale echipamentelor în diferite etape de lucru, ceea ce crește dificultatea rezolvării acestei simulări.

2.2. „Steel Grade” – selectarea tipului de oțel ce va fi elaborat

În a doua etapă se va alege tipul de oțel care se dorește a fi produs, din punct de vedere al mărcii acestuia (compoziția chimică, procent de impurități). În această simulare ar putea fi produse patru mărci diferite de oțel:

- a) „General purpose construction beam steel” - oțel de construcție de uz general: elaborarea acestui tip de oțel are un grad mai scăzut de dificultate, necesită o prelucrare minimă și, prin urmare, este recomandat utilizatorilor începători. Dificultatea principală este de asigurare a nivelurilor corecte de adaosuri de aliaj.
- b) „TiNb ultra-low carbon steel for car bodies” - oțel cu procent foarte scăzut de carbon aliat cu Ti, Nb: acest oțel este utilizat de obicei pentru piesele caroseriilor auto, deoarece are un procent de carbon (C) mai mic de 0,0035% care favorizează și optimizează deformabilitatea acestora.

Figura 2: Selectarea tipului de oțel care se urmărește a fi realizat

- c) „Linepipe steel for gas distribution” - oțel pentru țevi de transport a gazelor: acest oțel este utilizat pentru distribuția gazelor naturale și a produselor petroliere. Este un tip de oțel dificil de elaborat, deoarece combinația între rezistența mecanică mare și rezistența ridicată la rupere necesită niveluri extrem de scăzute de impurități (S, P, H, O și N) și de incluziuni. Obținerea acestui tip de oțel este recomandată pentru utilizatorii mai experimentați.
- d) „Engineering steel” (e.g. AISI 4140) - oțel tehnic (de exemplu AISI 4140/ 1.7225/ 42CrMo4): acest oțel este un oțel aliat cu crom-molibden duritate superioară, ductilitate bună și rezistență bună la uzură după tratament termic. Conținutul de crom și molibden asigură duritate uniformă și rezistență ridicată, necesitând concomitent un conținut foarte scăzut de hidrogen.

În tabelul 1 este prezentată compoziția chimică pentru fiecare marcă de oțel. Compozițiile țintă pentru diferitele calități de oțel din această simulare corespund cerințelor necesare înainte de tratarea secundară și nu sunt echivalente cu compoziția finală a oțelului înainte de turnare.

După alegerea mărcii de oțel ce va fi elaborat, programul va încărca din baza de date adiacentă valorile tuturor elementelor chimice componente, care se vor regăsi pentru vizualizare în fereastra corespunzătoare din etapa următoare, așa cum se poate observa în figura 3.

Tabelul 1: Compoziții țintă pentru cele patru clase de oțel disponibile în programul de simulare¶

Marcă oțel Element chimic	Oțel de construcție de uz general		Oțel cu procent foarte scăzut de carbon aliat cu Ti, Nb		Oțeluri pentru țevi destinate transportului produselor petroliere		Oțel tehnic	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
C	0.100	0.120	0.05	0.01	0.040	0.080	0.300	0.430
Si	0.100	0.300		0.10	0.100	0.300		0.500
Mn	1.000	1.500	0.65	0.85	0.900	1.100	0.600	0.900
P		0.020		0.06		0.007		0.030
S		0.030		0.02		0.010		0.040
Cr		0.100		0.05		0.060		1.200
Mo		0.040		0.01		0.010		0.300
Ni		0.150		0.08		0.050		0.300
Cu		0.150		0.080		0.060		0.350
N		0.005		0.004		0.005		0.005
Nb		0.050		0.030		0.018		0.010
Ti		0.010		0.035		0.010		0.010

Linepipe Steel					
Element	Result		Min	Max	
C*	0.000	✗ ↺	0.04	0.06	
Si*	0.000	✗ ↺	0.1	0.3	
Mn*	0.000	✗ ↺	0.9	1.1	
P	0.000	✓	0	0.0065	
S*	0.000	✓	0	0.01	
Cr	0.000	✓	0	0.06	
Mo	0.000	✓	0	0.01	
Ni	0.000	✓	0	0.05	
Cu	0.000	✓	0	0.06	
N*	0.000	✓	0	0.0045	
Nb	0.000	✓	0	0.018	
Ti	0.000	✓	0	0.01	

Linepipe Steel
Construction Steel
Ultra-low Carbon Steel
Linepipe Steel
Engineering Steel

Figura 3. Compoziția chimică a oțelului

Notă: Prin urmare, principala prioritate a studentului este de a selecta materiile prime în funcție de conținutul lor de elemente chimice, care trebuie corelat cu compoziția chimică finală a oțelului ce va fi elaborat. Astfel, dacă alegem să

obținem un oțel cu un procent mic de carbon va trebui ca încărcătura să aibă un conținut relativ scăzut de carbon, deoarece aceasta va trebui eliminat în operațiunile ulterioare de fabricare a oțelului secundar.

2.3. „Please select your steel grade and compose your scrap selection” – selectarea sorturilor metalice

În această etapă trebuie selectate materiile prime (sorturile) care se vor încălca în cuptorul cu încălzire cu arc electric pentru obținerea oțelului ales. „Baza de șarjare” a programului de simulare conține 10 tipuri de materie primă compuse din deșeuri de oțel de diferite proveniențe, a căror compoziție chimică este precizată în tabelul 2, împreună cu densitatea în vrac, forma sub care se regăsesc și costul pe tonă. Compoziția chimică a fiecărui sort poate fi vizualizată prin simpla suprapunere a cursorului peste câmpul sortului respectiv.

În figura 4 este prezentată o captură de ecran specifică acestei etape. Se observă că sorturile sunt denumite în conformitate cu standardele SUA, deoarece nu există un standard internațional pentru clasificarea deșeurilor de fier vechi.

Cu ajutorul acestor informații, studenții vor putea face combinații diverse de 1, 2, 3 sau mai multe sorturi, în diferite procente masice sau volumice, astfel încât să se apropie cât mai mult de compoziția țintă a mărcii de oțel selectată. În fereastra din dreapta se vor putea observa în timp real estimările legate de comparația între compoziția încărcăturii selectate și cea țintă, pentru fiecare element chimic prezent în încărcătura, marcată astfel:

- pentru depășirea procentului țintă, săgeata ascendentă marchează faptul că vor trebui eliminate câteva procente din elementul chimic respectiv:  
- pentru încadrarea sub procentului țintă, săgeata descendentă marchează faptul că vor trebui adăugate câteva procente din elementul chimic respectiv:  
- pentru încadrarea în procentul țintă: 

Ar putea fi dificil sau imposibil să se potrivească exact compoziția chimică. O potrivire apropiată este, de asemenea, acceptabilă și orice elemente lipsă pot fi adăugate mai târziu, în etapele ulterioare ale procesului în simulare.

Tabel 2. Sorturi metalice din resturi de materiale

Sorturi	Compoziția chimică wt %	Densitatea în vrac kg/m ³	Forma*	Costuri/tonă
„No1 Heavy” Materii feroase grele (No1)	0.025 %C, 0.017 %Si, 0.025 %P, 0.033 %S, 0.2 %Cr, 0.15 %Ni, 0.03 %Mo +Fe bal.	0.85	CS	\$160
„No2 Heavy” Materii feroase grele (No2)	0.03 %C, 0.022 %Si, 0.028 %P, 0.035 %S, 0.26 %Cr, 0.18 %Ni, 0.03 %Mo +Fe bal.	0.75	CS	\$140
„Internal low Alloyed” Fier vechi mediu aliat	0.17 %C, 0.04 %Si, 0.31 %Mn, 0.013 %P, 0.0014 %S, 0.26 %Cr, 0.4 %Ni, 0.001 %Nb, 0.015 %Ti, 0.005 %V, 0.14 %Mo +Fe bal.	3.00	CS	\$240

Tabel 2. Sorturi metalice din resturi de materiale

Sorturi	Compoziția chimică wt %	Densitatea în vrac kg/m ³	Forma*	Costuri/tonă
„Plate and Structural” Oțel din plăci și structuri	0.25 %C, 0.25 %Si, 1.0 %Mn, 0.025 %P, 0.025 %S, 0.15 %Cr, 0.05 %Mo, 0.15 %Ni, 0.22 %Sn +Fe bal.	2.0	CS	\$290
„No1 Bundles” Pachete No1	0.027 %C, 0.012 %Si, 0.12 %Mn, 0.01 %P, 0.006 %S, 0.032 %Cr, 0.02 %Ni, 0.001 %Ti, +Fe bal.	1.2	FS	\$180
„No2 Bundles” Pachete No2	0.04 %C, 0.016 %Si, 0.12 %Mn, 0.014 %P, 0.008 %S, 0.04 %Cr, 0.03 %Ni, 0.0014 %Ti, +Fe bal.	1.1	FS	\$170
„Direct Reduced Iron” Oțel redus direct (DRI)	2.4 %C, 0.1 %P, 0.01 %S, 0.02 %Ti, 0.03 %Nb, 0.02 % +Fe bal.	1.65	FS	\$220
„Shredded” Oțel tocat	0.03 %C, 0.015 %Si, 0.02 %P, 0.03 %S, 0.12 %Cr, 0.1 %Ni, 0.02 %Mo +Fe bal.	1.5	VFS	\$200
„Turnings” Deșeu șpan	0.03 %P, 0.113 %S, 0.698 %Cr, 0.538 %Mo, 0.157 %Pb +Fe bal.	1.0	VFS	\$110
„EAF Dust” Praf de la cuptorul cu arc electric	0.91 %Si, 4.44 %Mn, 0.019%P, 0.001 %S, 20.03 %Cr, 11.2 %Ni 0.14 %Ca, 0.003 %Ti +Fe bal.	0.9	PW	\$120

CS = Deșeuri grosiere (bucăți mari), FS = Deșeuri fine (bucăți mici), VFS = Deșeuri foarte fine, PW = Pulbere

User Level

Step 1

Steel Grade

Step 2

Please select your steel grade and compose your scrap selection.

Step 3

Raw Material	Unit cost	Mass	Volume	Cost
No1 Heavy	\$160/t	0	0m ³	\$0
No2 Heavy	\$140/t	0	0m ³	\$0
Internal Low Alloyed	\$240/t	0	0m ³	\$0
Plate and Structural	\$290/t	0	0m ³	\$0
No1 Bundles	\$180/t	0	0m ³	\$0
No2 Bundles	\$170/t	0	0m ³	\$0
Direct Reduced Iron	\$220/t	0	0m ³	\$0
Shredded	\$200/t	0	0m ³	\$0
Turnings	\$110/t	0	0m ³	\$0
EAF dust	\$-120/t	0	0m ³	\$0
Total		0t	0m³	\$0
Cost per metric tonne				\$0/t

Clear

Target steel grade:

Construction Steel

Element	Result	Min	Max
C*	0.000	0.1	0.12
Si*	0.000	0.1	0.3
Mn*	0.000	1	1.5
P	0.000	0	0.02
S*	0.000	0	0.03
Cr	0.000	0	0.1
Mo	0.000	0	0.04
Ni	0.000	0	0.15
Cu	0.000	0	0.15
N*	0.000	0	0.005
Nb	0.000	0	0.05
Ti	0.000	0	0.01

(*) Indicates elements that are (partially) removable in the subsequent secondary steelmaking simulation.

Scrap Yard

Step 4

Summary

Step 5

Figura 4. Compoziția chimică a oțelului

Notă: în simulare, compoziția reală variază cu $\pm 5\%$ din procentul fiecărui element din material pentru a reproduce incertitudinea în compoziția chimică a resturilor utilizate în realizate. De exemplu, dacă conținutul mediu de carbon al unui anumit sort este declarat de 0,1%, conținutul său real va fi în intervalul 0,095 și 0,105%. Aceasta înseamnă că compoziția reală a băii metalice rezultată va diferi ușor de compoziția calculată.

Masa țintă a unei șarje este de aproximativ 100 de tone de oțel. Când se selectează sorturile se recomandă menținerea în limitele de masă și volum stabilite, din cauza limitelor de capacitate ale cuptorului: *limita de încărcare* = 90 de tone (capacitatea rămasă de 10 tone ar putea fi necesară pentru adaosuri suplimentare pe tot parcursul procesului.); *limita de volum* = max. 100 m³. Limita reală depinde foarte mult de densitatea în vrac a diferitelor sorturi utilizate și, de asemenea, de modul în care acestea sunt distribuite în containerele de încărcare.

Din Tabelul 2 se poate observa că sorturile metalice variază ca densitate în vrac, ceea ce trebuie, de asemenea, luat în considerare. Materialele, cum ar fi sortul „Internal low Alloyed” sunt compactate mai bine și au o densitate mai mare, deci va fi necesar un volum mai mic pentru orice masă dată. Alte materiale, cum ar fi „No1 Heavy” (deșeuri grosiere în bucăți mari), sunt mai puțin compacte și au astfel o densitate mai mică, deci vor contribui la încărcătură printr-un volum mai mare.

Notă: Când selectați materialele, vi se prezintă costul mixului dvs. curent. Cu toate acestea, costul real va depinde numai de cât de mult este încărcat în coșuri în etapa următoare. Amintiți-vă că nu există doar o modalitate corectă de a îndeplini obiectivele simulării și de a reuși să obțineți oțelul pe care ați ales să îl produceți. Traseele de proces sunt numeroase, oferind o gamă largă de oportunități de a vă găsi traseul individual către țintele finale ale simulării.

Când ați terminat de selectat materiile prime, sunteți gata să începeți încărcarea deșeurilor în coșurile de la Șantierul de fier vechi. Se poate analiza următorul exemplu.

Exemplu: În cazul prezentat în figura 5, utilizatorul a decis să fabrice oțelul pentru țevi („linepipe steel”). Tabelul afișează fracțiile calculate ale fiecărui element din încărcătura solidă selectată, împreună cu valorile țintă ale fiecărui element. Tabelul din partea dreaptă indică limita minimă și maximă a compoziției chimice pentru acest oțel și încadrarea între aceste limite cu ajutorul simbolurilor prezentate anterior.

Raw Material	Unit cost	Mass	Volume	Cost	Target steel grade: Linepipe Steel
No1 Heavy	\$160/t	10	12m ³	\$ 1600	
No2 Heavy	\$140/t	0	0m ³	\$ 0	
Internal Low Alloyed	\$240/t	0	0m ³	\$ 0	
Plate and Structural	\$290/t	0	0m ³	\$ 0	
No1 Bundles	\$180/t	45	38m ³	\$ 8100	
No2 Bundles	\$170/t	30	25m ³	\$ 5100	
Direct Reduced Iron	\$220/t	0	0m ³	\$ 0	
Shredded	\$200/t	5	3m ³	\$ 1000	
Turnings	\$110/t	0	0m ³	\$ 0	
EAF dust	\$-120/t	0	0m ³	\$ 0	
Total		90t	78m ³	\$ 15800	
Cost per metric tonne				\$ 176 /t	

Element	Result	Min	Max
C*	0.031	0.04	0.06
Si*	0.014	0.1	0.3
Mn*	0.100	0.9	1.1
P	0.014	0	0.0065
S*	0.011	0	0.01
Cr	0.058	0	0.06
Mo	0.004	0	0.01
Ni	0.042	0	0.05
Cu	0.048	0	0.06
N*	0.000	0	0.0045
Nb	0.000	0	0.018
Ti	0.001	0	0.01

(*) Indicates elements that are (partially) removable in the subsequent secondary steelmaking simulation.

Figura 5. Ecran pentru selectarea materiei prime și a cantităților sorturilor alese

Se observă că au fost selectate patru sorturi diferite, cu volume diferite pentru fiecare: 10 tone „No1 Heavy”, 45 tone „No1 Bundles”, 30 tone „No2 Bundles” și 5 tone „Shredded”. Se observă că masa totală a încărcăturii a fost de 90 tone, care este masa maximă permisă, iar volumul total de 78m³. Din tabelul comparativ reiese faptul că procente de Si și Mn sunt sub limita valorilor țintă minime, astfel încât aceste două valori vor fi adăugate în timpul elaborării. În schimb, conținutul de fosfor este prea mare, deci va fi necesară defosforarea băii metalice pentru a atinge compoziția țintă.

2.4. „Scrap yard” – selectarea cantității de materie primă ce se va introduce în containerele de încărcare a cuptorului

În a patra etapă, a cărei interfață este prezentată în figura 6, se va distribui materia primă selectată în containere diferite, în ordinea și cantitatea considerată după caz. După ce au fost alese sorturile de fier vechi

existente în baza de șarjare, următoarea sarcină este ca acestea să fie distribuite în containerele disponibile (două sau trei, în funcție de decizia fiecăruia și de volumul materialelor selectate). Conținutul fiecărui container va fi topit pe rând, pentru a fi utilizată cât mai bine capacitatea cuptorului.

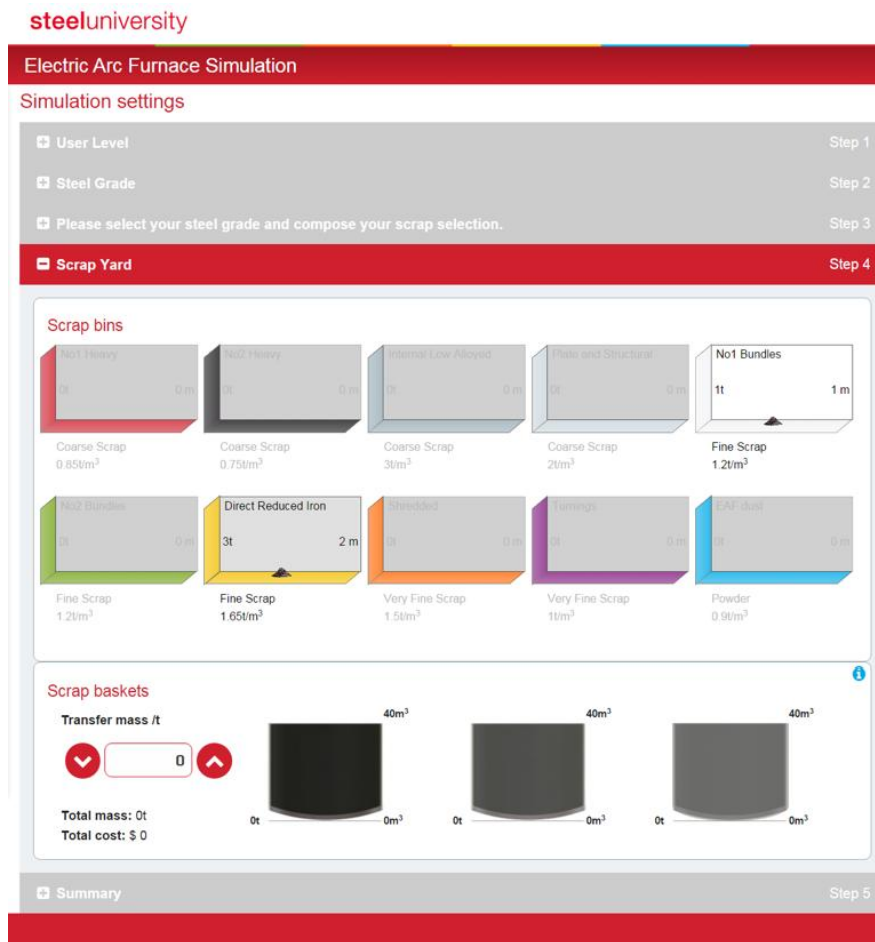


Figura 6. Baza de șarjare și încărcarea containerelor de transport

Limita de volum pentru primul container de încărcare este setată la limita de volum a cuptorului, notat cu A în figura 7 (în simulare volumul cuptorului este de 40 m^3). Deoarece densitatea oțelului lichid este mult mai mare decât densitatea în vrac a materiei prime solide, volumul conținutului primului container va scădea considerabil după topire și va lăsa mai mult spațiu pentru oțelul provenit din al doilea și al treilea container. Deoarece o parte din volumul vetrei cuptorului va fi ocupată deja de baia metalică corespunzătoare materialului din primul container, limitele de volum ale celui de-al doilea și al treilea container sunt, prin urmare, definite de capacitatea netă a cuptorului, adică $[A - A' = B]$.

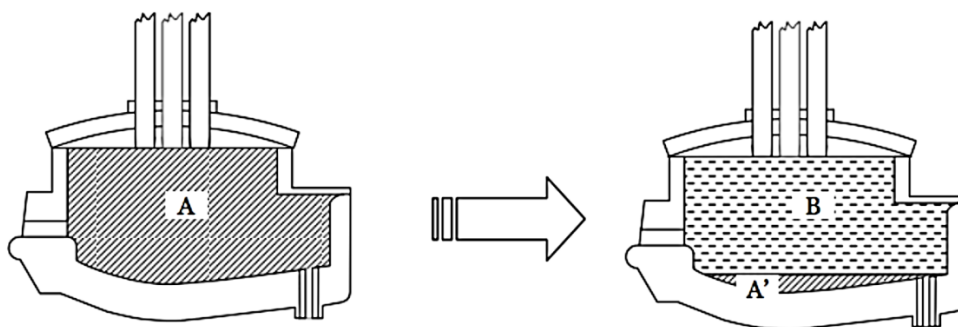


Figura 7. Pe măsură ce volumul de A scade în timpul topirii, volumul va fi ocupat de încărcătura B

Notă: Evitați supraîncărcarea oricărui container cu materie primă grosieră, deoarece aceasta crește riscul ruperii electrozului.

O recomandare este ca nu mai mult de 30% din masa totală din fiecare container să fie format din resturi grosiere. Dacă este necesar, materialul se va distribui în cele trei coșuri.

O încărcare optimă a materiei prime în containerele de transport este prezentată schematizat în figura 8. Se recomandă ca în partea inferioară să fie așezat un material mai afânat („light fluffy scrap” – fig. 8c), în partea din mijloc un material grosier („coarse scrap” – fig.8.a), în părțile laterale se încarcă materiale pentru formarea zgurii („slag formers” – fig.8b), iar deasupra se încarcă materialele cu dimensiunile cele mai mici („fine scrap” – fig.8d).

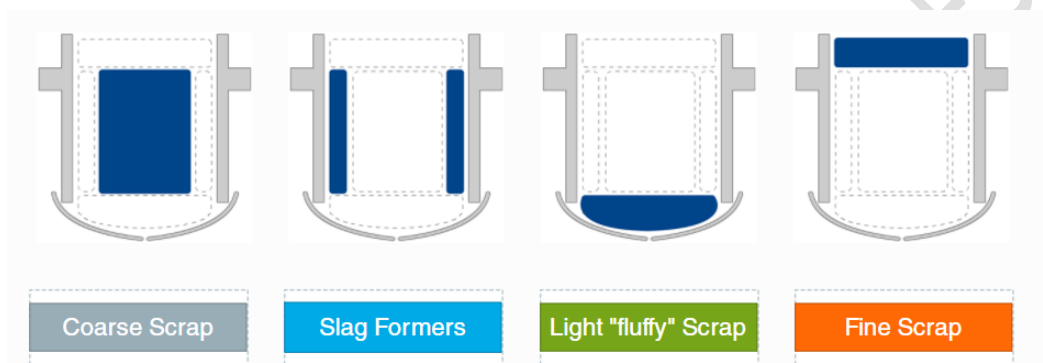


Figura 8. Reprezentarea schematizată a modului optim de încărcare din punct de vedere al dimensiunii materiei prime.

Încărcarea containerelor de transfer cu materie primă se realizează prin următorii pași:

1. selectați (cu click stânga) un container cu materie primă din cele alese în etapa anterioară;
2. în mod implicit, materialul va fi încărcat în primul container de transfer;
3. folosiți comanda „transferare masă” („*transfer mass*”) pentru a mări sau micșora cantitatea de materie primă de transferat; un semn de avertizare se va afișa dacă încercați să umpleți prea mult un container;
4. selectați (cu click stânga) un alt container cu materie primă pentru a încărca o cantitate din alt material (*observație: o dată ce unul dintre containerele de transfer a fost încărcat, nu vă mai puteți întoarce și modifica materialele adăugate anterior în acesta*);
5. selectați (cu click stânga) al doilea container de transfer pentru a începe încărcarea acestuia (*observație: după ce schimbați containerele de încărcare, nu vă mai puteți întoarce și modifica conținutul unuia anterior*);
6. continuați în același mod și pentru containerul de încărcare 3, dacă a mai rămas material ce poate fi încărcat.

Exemplu: pentru încărcarea cuptorului în această simulare sunt disponibile trei tipuri de containere de transfer a materiei prime în cuptor, fiecare cu un volum inițial de 40m^3 . Continuând exemplul prezentat anterior în subcapitolul 2.3, în figura 9 sunt prezentate cele trei tipuri de materie primă selectată în cantitățile respective (vezi figura 5), pentru producerea oțelului pentru țevi („*linepipe steel*”). Primul container este de culoare neagră pentru început, indicând că este selectat pentru a fi încărcat.



Figura 9. Exemplu al selecției primului container de transfer în ecranul „Scrap Yard”

În figura 10 este prezentată noua stare a primului container după ce în acesta au fost încărcate 20 de tone de materie primă: 5 tone de materie primă mărunțită fin și 15 tone de materie primă grosieră. se observă la al doilea și al treilea container linii albe în partea superioară a acestora, care le limitează capacitatea. Acest aspect este datorat faptului că o parte din volumul cuptorului va fi ocupată de materialul topit al primului coș. Limitele de volum ale containerelor 2 și 3 sunt definite de capacitatea cuptorului și cantitatea de oțel topit produsă cu încărcăturile anterioare.

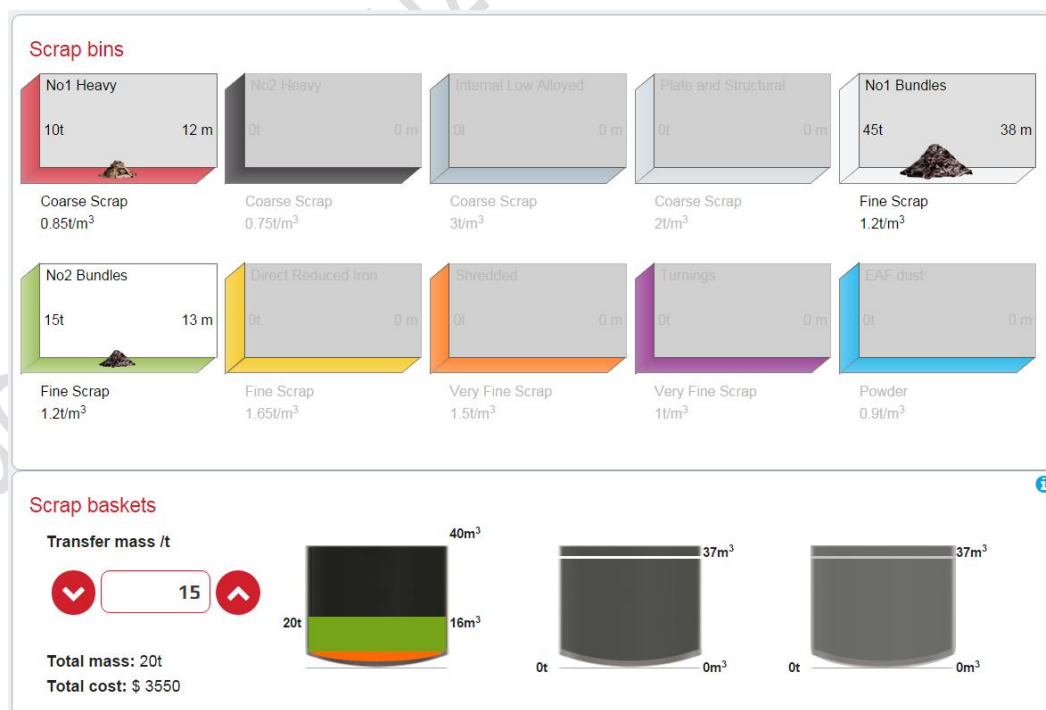


Figura 10. Exemplu al încărcării primului container de transfer în ecranul „Scrap Yard”

În figura 11, utilizatorul lucrează la încărcarea celui de-al doilea container, în care vor fi introduse 25 de tone de materie primă reciclată. În același mod se continuă cu al treilea container.

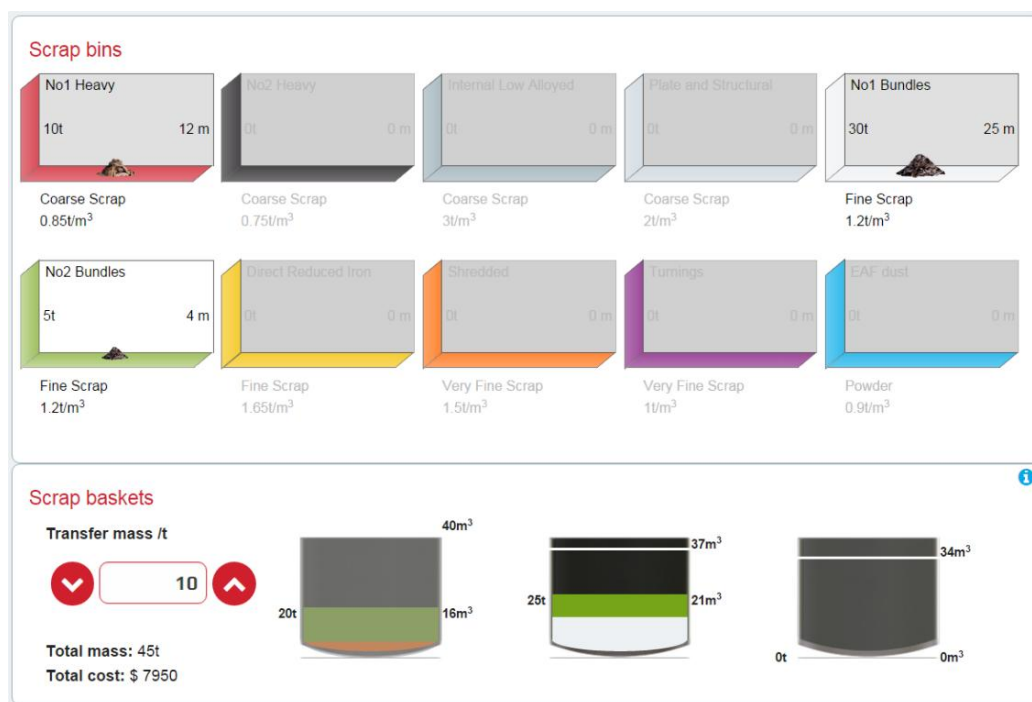


Figura 11. Exemplu al încărcării celui de-al doilea container de transfer în ecranul „Scrap Yard”

2.5. „Summary” – Rezumat

Înainte de a începe exploatarea cuptorului, putem arunca o privire asupra materialelor selectate și compoziției chimice a amestecului de materiale din încărcătura solidă, precum și asupra estimării prețurilor pe tonă. În cazul în care totul este conform calculului nostru, putem începe etapa de elaborare făcând click stânga pe „Start Simulation” - Start Simulare.

Exemplu: în figura 12 se observă că sunt trei containere de încărcare disponibile, materiile prime selectate pentru fabricarea oțelului pentru țevi („linepipe steel”) sunt pregătite pentru încărcare, compoziția chimică totală are nevoie de corecții prin adiție de C, Si, Mn și P, iar prețul estimat pe tonă (în această etapă) este de 217 dolari.

Electric Arc Furnace Simulation

Simulation settings

☒ User Level Step 1

☒ Steel Grade Step 2

☐ Please select your steel grade and compose your scrap selection. Step 3

☐ Scrap Yard Step 4

☒ Summary Step 5

Total

Basket #1

Basket #2

Basket #3

Raw Material	Unit cost	Mass	Volume	Cost
No1 Heavy	\$160/t	0t	0m ³	\$ 0
No2 Heavy	\$140/t	0t	0m ³	\$ 0
Internal Low Alloyed	\$240/t	0t	0m ³	\$ 0
Plate and Structural	\$290/t	0t	0m ³	\$ 0
No1 Bundles	\$180/t	15t	13m ³	\$ 2700
No2 Bundles	\$170/t	25t	21m ³	\$ 4250
Direct Reduced Iron	\$220/t	0t	0m ³	\$ 0
Shredded	\$200/t	5t	3m ³	\$ 1000
Turnings	\$110/t	0t	0m ³	\$ 0
EAf dust	\$-120/t	0t	0m ³	\$ 0
Total		45t	37m³	\$ 7950
Cost per metric tonne				\$ 217/t

Element	Result	Min	Max
C*	0.035	0.04	0.06
Si*	0.015	0.1	0.3
Mn*	0.107	0.9	1.1
P	0.013	0	0.0065
S*	0.010	0	0.01
Cr	0.046	0	0.06
Mo	0.002	0	0.01
Ni	0.034	0	0.05
Cu	0.040	0	0.06
N*	0.000	0	0.0045
Nb	0.000	0	0.018
Ti	0.001	0	0.01

START SIMULATION

Figura 12. Exemplu al datelor selectate pentru elaborarea oțelului pentru țevi, în ecranul „Summary”

3. „Furnace operation” - Operarea cuptorului

În această etapă se va desfășura topirea, corecția compoziției chimice a băii metalice și evacuarea acesteia. După cum s-a menționat în introducere, zgura va juca un rol important în proces. Prin urmare, în această etapă trebuie adăugați și agenți de formare a zgurii.

Există un panou de control care glisează din partea dreaptă a ferestrei de lucru, în care utilizatorul poate selecta mai multe elemente de lucru, prezentate în figura 13:

1. Viteza de simulare („simulation rate”): poate fi selectată între 1 și 32, unde 1 reprezintă viteza reală de lucru, care poate fi mărită de până la 32 de ori. Timpul din cadranul din dreapta sus (2) afișează timpul scurs de la începutul simulării în HH:MM:SS.
3. Încărcarea cuptorului („load basket”): acoperișul cuptorului se deschide sau se închide de pe panoul de control (butonul „Roof”). Rețineți că electrozii trebuie să fie complet retrași (ridicați) înainte ca acoperișul să

poată fi deschis. Containerele de transfer a materiei prime sunt mutate până deasupra cuptorului cu macaraua, prin selectarea butoanelor 1, 2 sau 3 din bara „Load basket” (4).

5. Electrozii pot fi coborâți sau ridicați colectiv folosind săgețile sus sau jos de pe panoul „Tap settings” (5). De asemenea, este necesară deplasarea electrozilor individuali în sus sau în jos, de ex. pentru a permite echilibrarea efectului uzurii asupra poziției vârfului electrodului. Deplasarea în sus sau în jos se realizează apăsând săgețile de pe panoul de control, fiecărui electrod corespunzându-i numerele #1, #2 și #3.

6. Selectarea puterii instalației („Power Tap”): puterea relativă din panoul de control arată puterea utilizată în timp real de fiecare electrod și este pornită prin selectarea butonului (7). Poate fi folosită pentru a observa când s-au topit toată încărcătura solidă și mai important, cât de multă putere este transferată efectiv de la electrozi la încărcătură sau la oțelul lichid. Puterea totală curentă este afișată în MW în partea de sus a ecranului (8). Puterea poate fi modificată de la 0 la 4 pentru a seta nivelul de putere corespunzător.

9. Panouri de răcire cu apă: temperatura panourilor de răcire cu apă prezintă temperatura apei în sistemul de răcire. Cuptorul se va opri dacă limitele de temperatură sunt depășite: culoarea se schimbă de la verde la portocaliu și roșu.

10. Panoul de lucru cu lăncile de injectare a carbonului și oxigenului conține mai multe butoane de manevrare a ușii pentru zgură (11 – „slag door”), a lăncii (12 – „lance”), a fluxurilor de materiale (13 – „flow”), a cantității de carbon injectată (14 – „carbon”) și a cantității de oxigen insuflată (15 – „oxygen”).

Alte elemente de lucru de pe interfață: 16 – informații suplimentare referitoare la comenzile ce pot fi efectuate; 17 – butonul de prelevare a probei pentru testarea compoziției chimice a băii metalice („take a sample”); 18 – butonul pentru fereastra de selectare a materialelor de adaos sau de aliere („make additions”); 19 – efectuarea evacuării din cuptor a băii metalice („start tapping”); 20 – rezumatul tuturor comenzilor din derularea simulării („event log”); 21 – rezultatul ultimei analize chimice efectuată („chemical analysis”); 22 – temperatura băii metalice în °C; 23 – reprezentarea vizuală a simulării procesului.

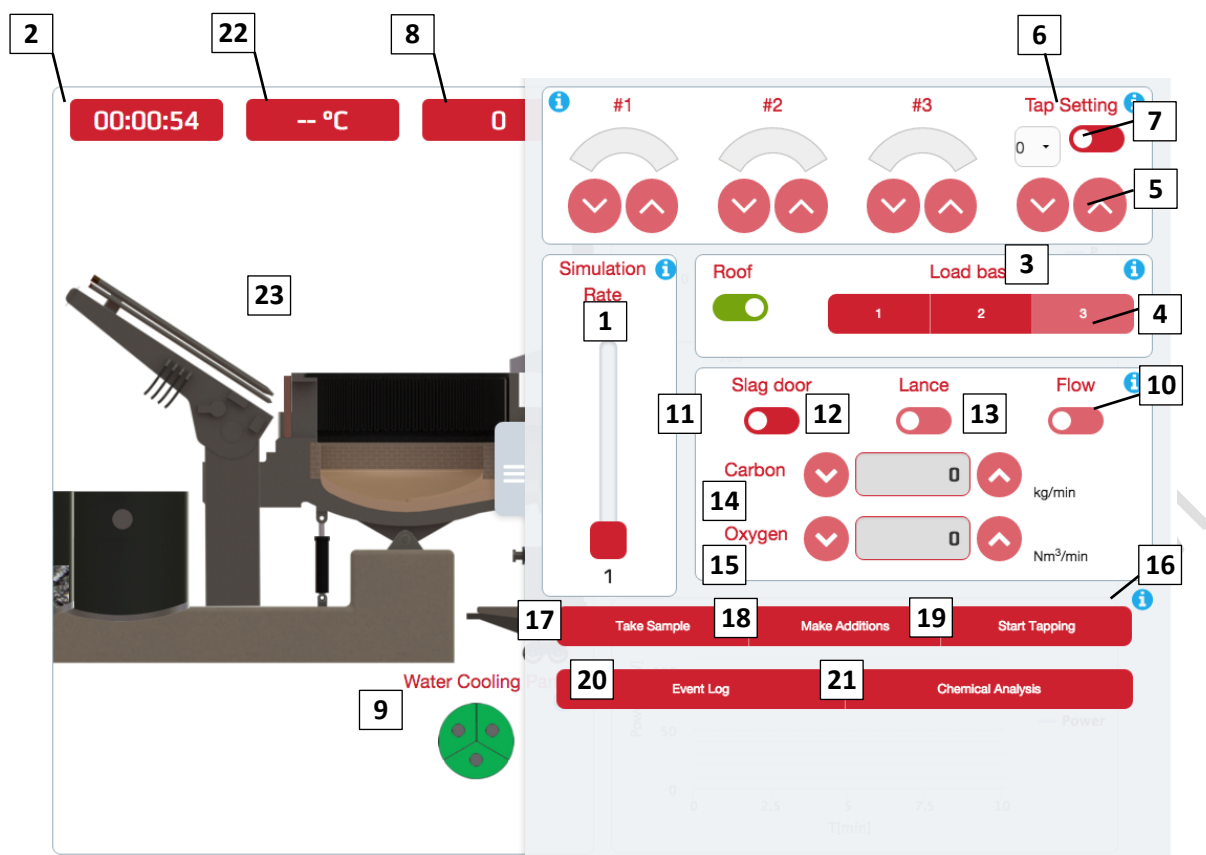


Figura 13. Panoul de comandă pentru operarea cuptorului

3.1. „Simulation rate” - Viteza de simulare

Simularea poate fi rulată la o gamă de viteze diferite între $\times 1$ și $\times 32$. Aceasta poate fi modificată oricând în timpul simulării prin mișcarea butonului roșu vizibil în figura 14. Creșterea vitezei de simulare poate fi convenabilă în anumite etape ale simulării, pentru reducerea timpului total necesar parcurgerii tuturor etapelor. Cu toate acestea, anumite operațiuni necesită o monitorizare atentă și, prin urmare, se recomandă să utilizați această opțiune cu prudență.

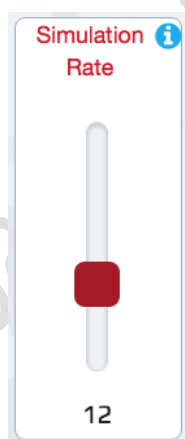


Figura 14. Butonul de control al vitezei de simulare

3.2. „Loading the Furnace” - Încărcarea cuptorului

Pentru a încărca materia primă în cuptor, acoperișul („roof”) va fi deschis pentru a permite activarea butoanelor folosite pentru descărcarea fiecăruia dintre cele trei containere de transfer în cuptor („load basket”), acestea fiind prezentate în figura 15. După ce faceți clic pe butonul 1, 2 sau 3, macaraua ridică containerul și îl transferă automat în cuptor. Odată ce containerul este deasupra cuptorului, trapa inferioară se deschide și

lasă conținutul acestuia să cadă în cuptor. Containerul este îndepărtat automat și acoperișul poate fi închis. Aceeași procedură este utilizată pentru a descărca și celelalte containere.



Figura 15. Butoanele de control ale containerelor de încărcare a cuptorului

3.3. „Electrodes” - Electrozi

Puterea electrică este distribuită între cei trei electrozi, care vor topi deșeurile prin crearea unui arc electric între ele și deșeuri, așa cum se poate observa în figura 16. Electrozii sunt consumați în timpul procesului cu o uzură progresivă în funcție de viteza individuală în timpul funcționării. Unele ajustări ale pozițiilor electrodului trebuie făcute pentru a vă asigura că toți trei sunt în contact cu materialul, astfel încât energia să fie transferată eficient. Pe lângă informațiile din partea de sus a ecranului, există și o reprezentare vizuală a temperaturii suprafeței electrozilor și a încărcăturii. Culoarea acestora se va schimba de la gri la roșu odată cu creșterea temperaturii. Pe de altă parte, electrozii sunt încălziți rapid și, prin urmare, se va schimba și culoarea ce reprezintă temperatura suprafeței în diferite zone ale electrodului.

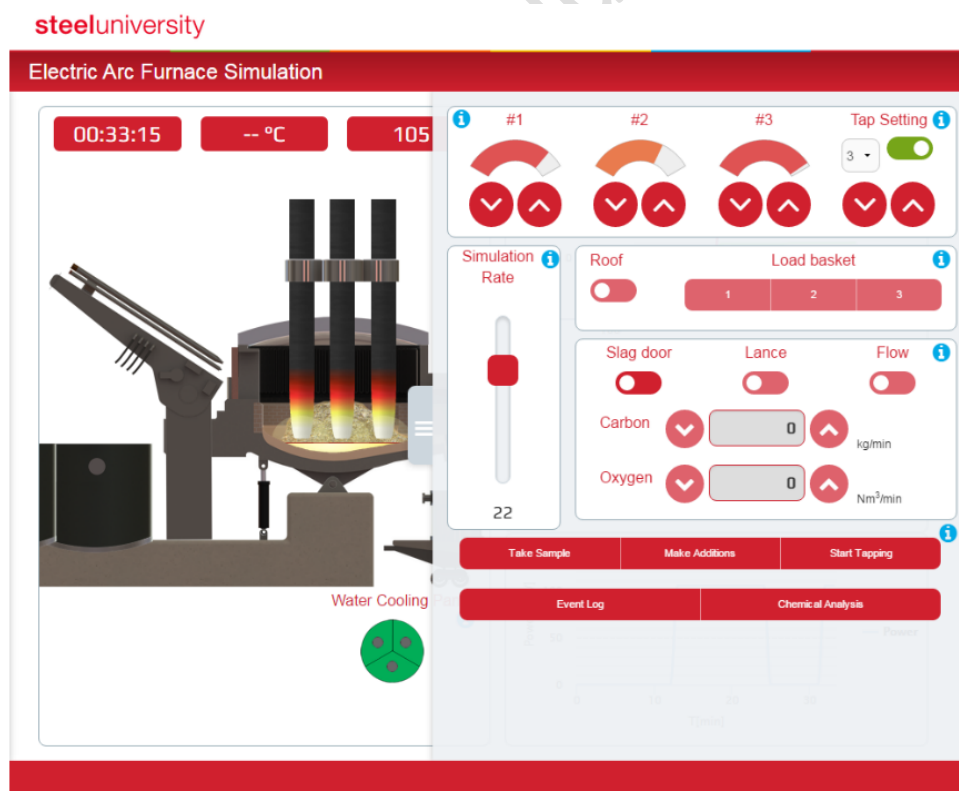


Figura 16. Reprezentarea vizuală a temperaturii electrozilor și încărcăturii

Electrozii sunt caracterizați de fragilitate ridicată și sunt consumabili, având un cost de 200 USD pe electrod. Rețineți că acest cost va fi adăugat la costul total numai în cazul unei spargeri a electrodului.

Notă: Dacă cantitatea de încărcătură grosieră din cuptor este mai mare sau egală cu 25%, asigurați-vă că veți coborâ electrozii cu o viteză mică. În acest fel, reduceți la minimum riscul de rupere a acestora.

3.4. „Power Tap Settings” - Setări ale puterii cuptorului

Există patru setări diferite pentru puterea electrică a cuptorului, prezentate în tabelul 3.

Tabel 3. Setări ale puterii cuptorului¶

Selectați nivelul	Nivel putere
0	0 MW
1	75 MW
2	90 MW
3	105 MW
4	120 MW

Fiecare dintre aceste niveluri poate fi selectat în timpul încălzirii și topirii, în funcție de necesarul de energie. Costul asociat cu puterea electrică este de 0,57 USD / kWh. De îndată ce topirea este finalizată, trebuie luat un eșantion de analiză a compoziției chimice a băii metalice. Rezultatul testului vă poate ajuta să luați decizii cu privire la următoarele acțiuni, de ex. adăugări de elemente chimice, insuflare de oxigen etc.

3.5. „Water Cooling Panels” - Panouri de răcire cu apă

Pe măsură ce temperatura din toată încărcătura crește progresiv, EAF este expus la condiții termice extreme. Pereții și vatra cuptorului prezintă un risc deosebit de mare de supraîncălzire și, prin urmare, sunt echipate cu panouri de răcire cu apă. Chiar și așa, performanța acestora poate deveni limitată la temperaturi prea ridicate. În timp ce selectăm operațiile / condițiile pentru atingerea caracteristicilor țintă ale tipului de oțel ales, este de asemenea important să fie create și condiții de lucru durabile pentru cuptor (adică să fie modificate nivelurile de putere).

În figura 17 este reprezentarea vizuală a panourilor de răcire, codurile de culori fiind următoarele:

- toate secțiunile sunt verzi, $T_{ap\grave{a}} < 75\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- o secțiune portocalie, $T_{ap\grave{a}} = 75 - 90\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- o secțiune roșie, $T_{ap\grave{a}} = 90 - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- toate secțiunile sunt roșii, $T_{ap\grave{a}} > 105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Notă: Alimentarea se va opri automat dacă temperatura apei atinge 110 °C. Nu veți putea porni alimentarea înainte ca temperatura să scadă la 80 °C.

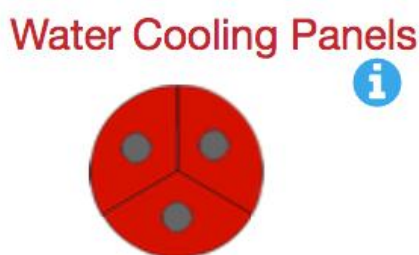


Figura 17. Reprezentarea vizuală a panourilor de răcire - supraîncălzirea panoului.

3.6. „Additions” – Materiale de corecție

De-a lungul întregului proces de topire și rafinare, pot fi adăugate materiale pentru a crește conținutul elementelor de aliere, a dezoxida oțelul, a desulfura oțelul sau a mări cantitatea de zgură. Lista completă a materialelor de adaos din baza de date a simulării este disponibilă în tabelul 4.

Tabelul 4. Lista materialelor de corecție ce pot fi folosite pentru elaborarea în EAF

Materiale de corecție	Compoziția chimică	Densitatea (bulk) tone m ⁻³	Forma	Preț \$/tonă
Aluminiu „Aluminum”	99.15 %Al, 0.82 %Fe, 0.03 %Cu	2.4	Pebbles	\$1400
Carbon	99.9 %C, 0.011 %S	1.0	Powder	\$280
Carbură de crom „Chrome-carbure”	7.82 %C, 0.23 %Si, 0.021 %P, 0.051 %S, 70.11 %Cr, 0.0092 %Ti	3.5	Pebbles	\$590
Carbură de crom cu procent scăzut de sulf Chrome-carbure (low S)	8.12 %C, 0.34 %Si, 0.017 %P, 0.024 %S, 69.92 %Cr	3.5	Pebbles	\$660
Fero-mangan cu procent ridicat de carbon „Ferro-Manganese, HC”	76.5 %Mn, 6.7 %C, 1.0 %Si, 0.03 %S, 0.3 %P + Fe bal.	4.0	Pebbles	\$350
Fero-mangan cu procent scăzut de carbon „Ferro-Manganese, LC”	81.5 %Mn, 0.85 %C, 0.5 %Si, 0.1 %S, 0.25 %P + Fe bal.	4.0	Pebbles	\$600
Fero molibden „Ferro-Molybdenum”	0.044 %C, 0.14 %Si, 0.044 %P, 0.092 %S, 62.02 %Mo + Fe bal.	6	Pebbles	\$16800
Fero-siliciu 75 „Ferro-Silicon75”	0.08 %C, 60.3 %Si, 0.014 %P, 0.002 %S, 1.23 %Al, 0.05 %Ti+ + Fe bal.	2.5	Pebbles	\$700
Fero-siliciu 75 cu puritate ridicată „Ferro-Silicon75 H Purity”	0.008 %C, 75.6 %Si, 0.003 %P, 0.024 %Al, 0.014 %Ti + Fe bal.	2.5	Pebbles	\$840
Fero-vanadiu „Ferro-Vanadium”	0.25 %C, 0.72 %Si, 0.031 %P, 0.081 %S, 1.23 %Al, 78.82 %V, + Fe bal.	3.5	Pebbles	\$8400
Prealiaj siliciu - carbon „Silico-Carbon”	30 %C, 70 %Si	1.5	Pebbles	\$610
Prealiaj siliciu - crom „Silico-Chromium”	1.82 %C, 25.33 %Si, 0.014 %P, 0.015 %S, 38.23 %Cr + Fe bal.	3.5	Pebbles	\$940
Dolomită	38.5 %MgO, 2% SiO ₂ ,	1	Powder	\$120

Materiale de corecție	Compoziția chimică	Densitatea (bulk) tone m ⁻³	Forma	Preț \$/tonă
„Dolomite”	0.005 %P, 0.15 %S CaO bal.			
Flourina „Fluorspar”	20 %CaO, 20 %MgO, 20 % SiO ₂ , 0.001 %P, 0.06 %S + CaF ₂ bal.	1	Powder	\$180
Oxid de fier „Iron Oxide”	0.3 %Al ₂ O ₃ , 0.5 %CaO, 0.1 %MgO, 0.001 %P FeO bal.	1.8	Powder	\$140
Oxid de calciu „Lime”	1.2%Al ₂ O ₃ , 1.8 %MgO, 2.1 %SiO ₂ 0.01 %P, 0.01 %S + CaO bal.	1	Powder	\$120

* Sort grosier – „Pebbles” ** Pulbere – „Powder”

Temperatura lichidului poate fi calculată utilizând o expresie disponibilă în literatura de specialitate:

$$T_{liq} = 1537 - (78\%C + 7.6\%Si + 4.9\%Mn + 34\%P + 30\%S + 5\%Cu + 3.1\%Ni + 1.3\%Cr)$$

Datorită afinității ridicate a oxigenului față de elemente precum aluminiu, siliciu, crom, carbon, fosfor și fier, în timpul elaborării se formează cu ușurință oxizi metalici care, datorită densității lor relativ mici, vor pluti formând faza de zgură. Toate aceste reacții sunt exoterme, furnizând căldură sistemului și, prin urmare, furnizează energie suplimentară topirii și încălzirii încărcăturii. Modelul termodinamic și cinetic din simulare presupune că reacția care asigură cel mai mic conținut de oxigen dizolvat va putea fi controlată prin injectarea de carbon și insuflarea de oxigen. Reacțiile ce urmează sunt extrem de exoterme și cu ajutorul informațiilor din tabelul 5 și a temperaturii de lucru estimate, puteți calcula cantitatea de energie de încălzire care va proveni din reacții, pe baza formulei: $\Delta G = A + BT$

Tabel 5. Reacții exoterme

Reaction	$A[Jmol^{-1}]$	$B[Jmol^{-1}K^{-1}]$
$2\text{Al} + 3\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3$	-1243950	395.79
$\text{C} + \text{O} = \text{CO}(g)$	-21790	-39.75
$2\text{Cr} + 3\text{O} = \text{Cr}_2\text{O}_3$	-823545	360.79
$\text{Fe} + \text{O} = \text{FeO}$	-121090	52.5
$\text{Si} + 2\text{O} = \text{SiO}_2$	-571935	225.28

Materialele de corecție sunt adăugate din mai multe motive, dintre care pot fi enumerate următoarele:

- pentru a regla compoziția finală a oțelului (a băii metalice);
- pentru a dezoxida oțelul prin reacția cu oxigenul și formarea de oxizi care vor fi absorbiți în zgură;

- pentru a regla compoziția zgurii (de exemplu: pentru a obține o zgură care este mai eficientă pentru desulfurare sau defosforare).

În majoritatea cazurilor când materialele de corecție sunt adăugate în oțel, acestea conțin mai multe elemente chimice. Materialele de adaos care conțin un amestec de 2 sau mai multe componente sunt uneori numite aliaje principale. Când se utilizează acestea, trebuie luată în considerare cantitatea de element dorit din aliajul principal, precum și rata de recuperare a elementului respectiv (denumită și pierdere), relația de calcul a cantității necesare fiind prezentată mai jos. „Rata de recuperare (*recovery rate*)” este cantitatea fiecărui element chimic care crește de fapt conținutul total al aceluși element în baia metalică.

$$M_{additive} = \frac{100\% \cdot \Delta[\%Mn] \cdot M_{ladle}}{[\%Mn]_{master-alloys} \cdot R_{Mn-recovery-rate}}$$

Exemplu: 250 de tone de oțel conțin 0,12% Mn. Calculați cât de mult fero-mangan cu conținut ridicat de carbon (HC FeMn) trebuie adăugat pentru a obține o compoziție de 1,4% Mn. Feroaliajul utilizat conține 76,5% Mn, iar rata de recuperare uzuală pentru Mn este de 95%. Înlocuirea acestor valori în relația de calcul a materialului de adaos duce la următorul calcul:

$$M_{additive} = \frac{100\% \cdot (1.4 - 0.12)[\%Mn] \cdot 2500000[kg]}{76.5 [\%Mn] \cdot 95[\%]} = 4403.16[kg]$$

Din exemplul anterior, se calculează cantitatea de carbon adusă de adaosul de HC FeMn, care conține 6,7% C cu o rată de recuperare de 95%.

$$\Delta C = \frac{4403.16[kg] \cdot 6.7[\%C] \cdot 95[\%]}{100 [\%] \cdot 250000[kg]} = 0.105[C]$$

În mod evident, o astfel de creștere a carbonului ar putea fi critică în elaborarea anumitor tipuri de oțel cu procente scăzute și ultra-scăzute de carbon. În astfel de cazuri, ar fi necesar să se utilizeze aliajele mai scumpe de fero-mangan cu procente reduse de carbon sau cu puritate ridicată.

3.7. „Melting and Refining” - Topirea și rafinarea

3.7.1. Adaosuri de formare a zgurii

Proprietățile zgurii precum vâscozitatea, capacitatea de sulfurare sau capacitatea de preluare a fosforului, variază în funcție de compoziție și temperatură. Una dintre principalele sarcini ale acestei simulări este menținerea unor proporții adecvate de zgură prin adăugarea de agenți care intervin în formarea acesteia, cum ar fi varul (CaO), dolomita și / sau fluorul. Unii dintre oxizii metalici care ajung în zgură sunt acizi, astfel încât adăugarea de agenți bazici ajută la menținerea bazicității zgurii la un nivel adecvat (se recomandă o bazicitate cuprinsă între 1,5 – 2,5). Un nivel ridicat al bazicității zgurii (adică un raport ridicat CaO / SiO₂) este, de asemenea, benefică pentru îndepărtarea fosforului, dar trebuie să se acorde atenție să nu se satureze zgura cu CaO, deoarece acest lucru va duce la o creștere a vâscozității zgurii, ceea ce va face zgura mai puțin eficientă.

Notă: O bazicitate a zgurii cuprinsă între 1,2 și 2,5 ajută la obținerea unei zguri spumate și oferă, de asemenea, proprietăți bune pentru desulfurare.

$$Bazicitate = \% CaO / \% SiO_2$$

3.7.2. „Carbon and Oxygen Injection (help-lance)” - Injecție cu carbon și oxigen (cu lance)

După topirea materialelor (atingerea fazei lichide), mai mulți compuși și elemente încep să reacționeze unul cu celălalt. Pentru a atinge cantitățile de elemente chimice specificate de standardele de încadrare a mărcii respective de oțel, reacțiile pot fi facilitate prin injectarea de oxigen în fază lichidă printr-o lance, așa cum se poate observa în figura 18.

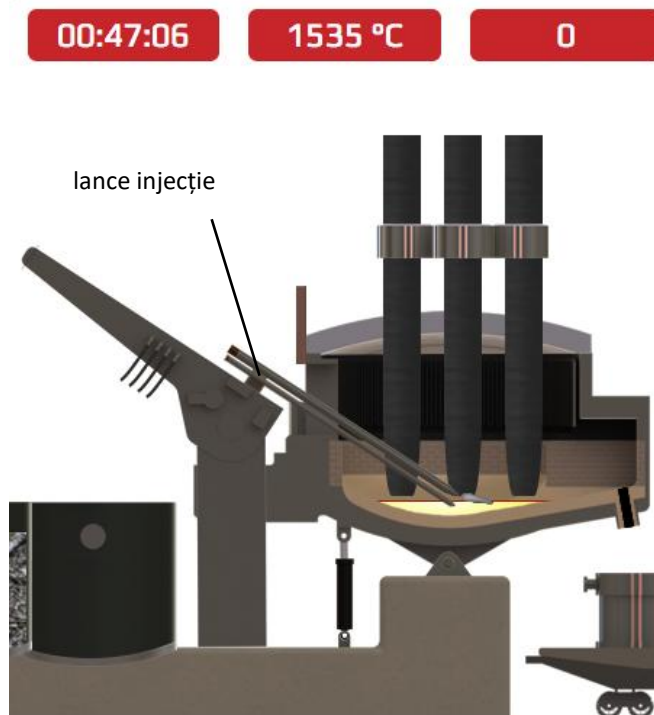


Figura 18: Etapa de injecție cu oxigen și carbon

Una dintre reacțiile de oxidare este cea de formare a monoxidului de carbon, CO (gazos), care este deosebit de important pentru formarea unei zguri spumate. Injecția carbonului în zgură prin lance creează bule de CO prin reacție cu oxidul de Fe. O zgură spumată protejează baia de oțel de reacția cu atmosfera și, de asemenea, crește eficiența electrică prin acoperirea arcului format de electrozi. Acest lucru asigură eficiență termică și permite cuptorului să funcționeze la tensiuni mai ridicate, fără a deteriora pereții și acoperișul cuptorului. Acoperirea arcului ajută, de asemenea, la prevenirea contactului azotului din atmosferă cu arc electric, deoarece în acest caz azotul poate disocia și intra în baia metalică. Injecția carbonului duce la scăderea cantității de oxid de fier din baia metalică, precum și la creșterea procentului de carbon din aceasta, conform ecuației de mai jos, în care $X_{FeO, zgură}$ reprezintă fracția molară a oxidului de fier din zgură.

$$x_{reacție} = 1 - 0,2 + \max \left(\min \left(0,4 \cdot (x_{FeO, zgură} - 0,3) \right) - 0,8 \right)$$

$$x_{dizolvare} = 1 - x_{reacție}$$

Insuflarea de oxigen formează inițial, doar oxizi de fier. Cantitatea acestor oxizi disponibilă în zgură este însă influențată de echilibrul dintre reacțiile prezentate în tabelul 5. Prin injectarea de oxigen sau carbon, cantitatea de oxid de fier și implicit de oxigen, pot fi controlate, permițând influențarea echilibrelor altor sisteme, chiar dacă vor fi derulate cu anumite întârzieri cauzate de cinetica acestor reacții.

În simulare, injecția de carbon și oxigen este realizată cu ajutorul unor butoane de comandă prezentate în figura 19, iar costurile asociate acestora sunt:

- debit posibil de carbon: 50-150 kg pe minut;
- cost: 0,28 USD pe kg;
- debit posibil de oxigen: 100-150 Nm³ pe minut;
- cost: 0,10 dolari pe Nm³.

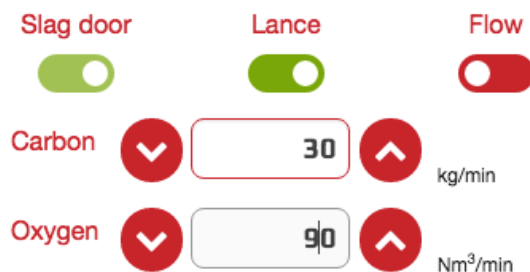


Figura 19: Butoane de comandă ale lancei de injecție cu oxigen și carbon

3.7.3. „Removal of Phosphorus and Sulfur” - Îndepărtarea fosforului și a sulfului

Din păcate, condițiile favorabile pentru îndepărtarea fosforului sunt opuse celor care asigură îndepărtarea sulfului. Prin urmare, chiar și după ce aceste elemente au fost transferate în faza de zgură, ele pot reveni în oțel. Remanența fosforului în zgură depinde de temperatură și de activitatea oxigenului în oțelul lichid și de bazicitatea și conținutul de FeO al zgurii. La temperaturi mai ridicate sau niveluri mai scăzute de FeO, fosforul va trece din zgură înapoi în oțelul lichid. Prin urmare, îndepărtarea fosforului se efectuează de obicei cât mai la începutul șarjei, atunci când temperatura este scăzută. Pentru a elimina sulful din baia metalică, este necesar să se utilizeze un agent chimic ce formează de sulfuri, cum ar fi un compus pe bază de calciu. Reacțiile de formare a sulfurilor sunt susținute de o atmosferă reducătoare, la un nivel scăzut de oxigen, o masă mare de zgură și temperatură ridicată. Toate acestea se obțin de obicei către finalul șarjei..

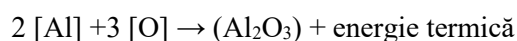
3.7.4. „Mixing Times” – timpii de omogenizare

Este important să fie cunoscut faptul că adaosurile de aliaj făcute nu duc la modificări instantanee ale compoziției băii metalice, ci necesită un interval de timp pentru a se dizolva. În cadrul acestei simulări trebuie să vă asigurați că ați lăsat un timp suficient pentru ca adaosurile de aliaj să se dizolve, respectând următoarele tendințe:

- pulberile și adaosurile de particule fine se dizolvă mai repede decât particulele grosiere;
- timpii de omogenizare vor crește pe măsură ce temperatura băii scade.

3.7.5. Deoxidation – „Dezoxidarea”

Alumiuniul este un agent de dezoxidare foarte puternic și controlează activitatea oxigenului din oțelul lichid pe baza următoarei reacții chimice:



pentru care constanta de echilibru este dată de:

$$K_{Al-O} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_0^3 \cdot a_{Al}^2}$$

unde:

$$\log K_{Al-O} = \frac{62780}{T[K]} - 20,5$$

Reorganizând ecuația în ceea ce privește activitatea oxigenului obținem:

$$a_O = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}}{a_0^3 \cdot K_{Al-O}}}$$

Relația dintre a_O și a_{Al} este reprezentată pentru trei temperaturi diferite, în figura 20. De aici se poate observa că dezoxidarea cu aluminiu este mai eficientă la temperaturi mai scăzute.

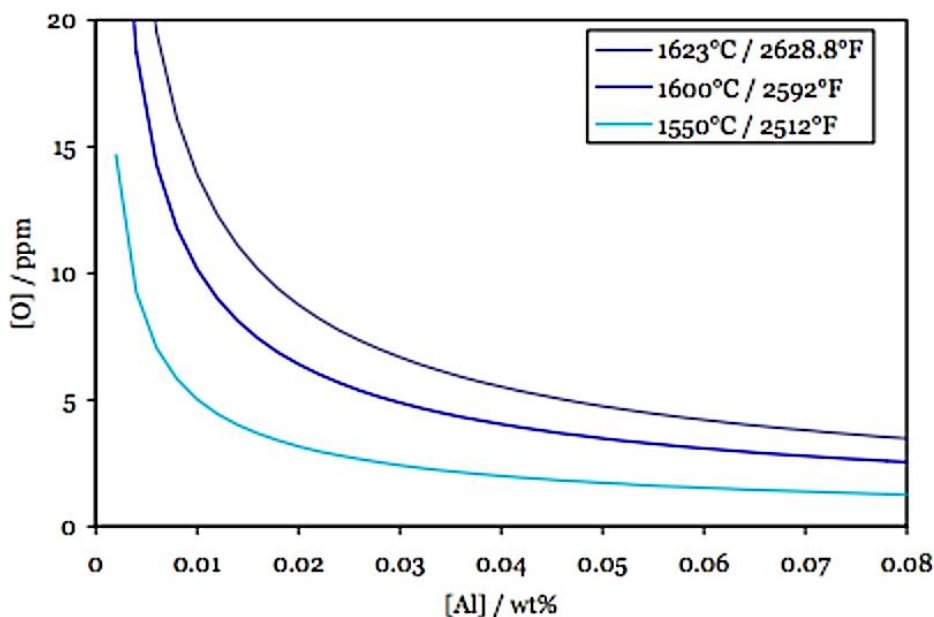


Figura 20. Curbele de echilibru Al-O la trei temperaturi diferite

Deși aluminiul este unul dintre cei mai puternici dezoxidanți, nu trebuie uitat faptul că procentul de oxigen dizolvat poate fi controlat cu ajutorul altor elemente. Prin urmare, este important să se calculeze constantele de echilibru pentru celelalte elemente, pentru a determina care element ce va reacționa cu oxigenul și va forma oxizi în timp ce oxizii celorlalte elemente vor fi reduse.

- calculați activitatea oxigenului pe baza echilibrului termodinamic al reacției pentru elementele Al, C, Cr, Fe și Si, cu relația: $x \cdot Me + y \cdot O \leftrightarrow Me \cdot O$
- identificați care este reacția care are ca rezultat cea mai mică activitate a oxigenului.

** Calculul adaosurilor de Al

Să presupunem o compoziție inițială de 400 ppm oxigen și fără aluminiu, reprezentată de punctul A din figura 21.

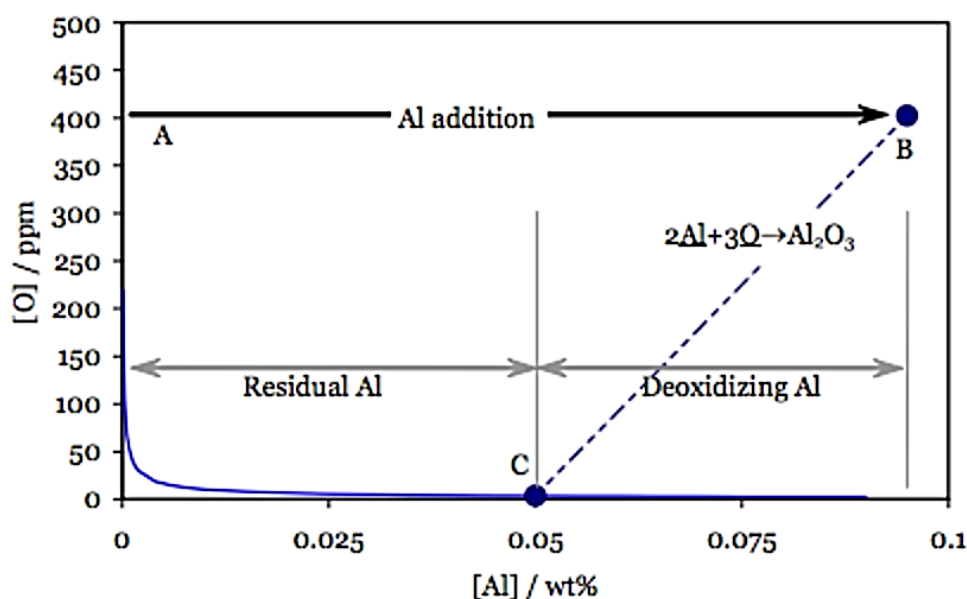


Figura 21. Calculul necesarului de adaos de Al raportat la activitatea oxigenului

Un adaos de aproximativ 0,095% aluminiu este reprezentat de punctul B. Deoarece acesta este cu mult peste curba de echilibru Al-O, aluminiul și oxigenul vor reacționa pentru a forma Al_2O_3 . Conform reacției stoechiometrice, 2 atomi de Al (= 54 unități de masă) reacționează cu 3 atomi de oxigen (= 48 unități de masă), urmând astfel linia descendentă până la punctul C - compoziția de echilibru la această temperatură. Procentul masic de aluminiu necesar pentru dezoxidare este deci:

$$\%Al_{\text{dezox}} \approx \frac{54}{48} [\%O]_{\text{inițial}}$$

La calcularea adaosului total de aluminiu necesar pentru dezoxidare, această valoare trebuie adăugată la compoziția țintă (sau reziduală) de aluminiu din compoziția chimică a oțelului respectiv.

Exemplu: O cantitate de 250 de tone de oțel, cu un conținut de oxigen de 450 ppm (0,045%) urmează să fie dezoxidată de Al la turnare. Presupunând o rată de recuperare a Al de 60% și un procent admis de Al în compoziția chimică a oțelului ce va fi elaborat de 0,04%, calculați cantitatea necesară de adaos de aliaj Al 98%.

Aluminiu pentru dezoxidare	$(54/48) \cdot 0.045[\%] = 0.051[\%]$
Procentul admis de Al în compoziția chimică a oțelului elaborat	0.040[%]
= Total aliaj de aluminiu necesar	0.091[%]

$$m_{\text{Al}} = \frac{100[\%] \cdot 0.091[\%] \cdot 250000[\text{kg}]}{98[\%] \cdot 60[\%]} = 386[\text{kg}]$$

3.7.6. „Foaming Slag” – Spumarea zgurii

Prin injectarea de carbon în baia de oțel și de oxigen în faza de zgură se formează bule de CO și se obține o zgură spumată. Are loc reacția $C + O \leftrightarrow CO(g)$, pentru care constanta de echilibru este dată de relația:

$$K_{C-O} = \frac{p_{CO}}{a_C \cdot a_O}$$
$$\log K_{C-O} = \frac{1168}{T[K]} + 2,07$$

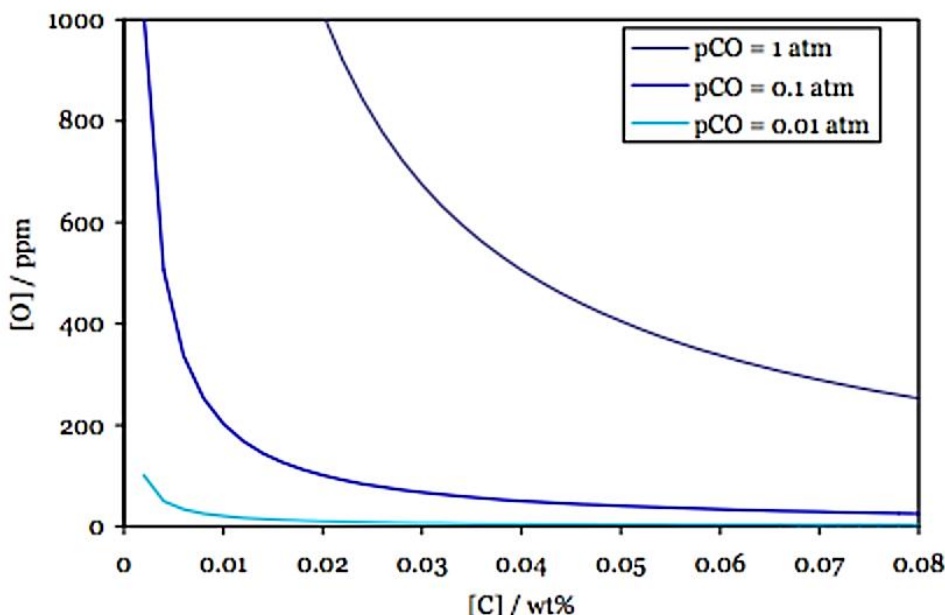


Figura 22. Concentrațiile de echilibru ale [C] și [O] la diferite presiuni.

Notă: Este foarte important să se mențină o bazicitate a zgurii între 1,2 și 2,5 care să asigure spumarea zgurii. Calculul bazicității se realizează folosind următoarea ecuație:

$$\text{Bazicitate} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$$

Alte restricții sunt legate de faptul că nu se poate folosi o cantitate prea mare de material solid (cel mult 5 tone) sau prea puțin lichid, cel puțin 50 tone.

3.7.7. „Desulfurization” - Desulfurarea

Anumite mărci de oțel, cum ar fi cele utilizate pentru producția de țevi pentru transportul gazelor, necesită procente foarte scăzute de sulf, astfel încât să asigure sudabilitate bună și deformabilitate. Desulfurarea este realizată prin transferul de sulf între baia metalică lichidă și zgură. Reacțiile care se produc sunt dependente de conținutul de aluminiu și sulf dizolvate în oțelul lichid, dar și de conținutul de oxid de aluminiu, oxid de calciu și sulfură de calciu din zgură. Reacția generală după care se desfășoară desulfurarea este următoarea:



În practică, desulfurarea realizată în cuptorul cu încălzire prin arc electric este realizată prin:

- adăugarea unei zguri desulfurizante sintetice pe bază de CaO la turnarea în oala de transfer;

- adăugarea de aluminiu într-un oțel cu o activitate foarte scăzută a oxigenului (în caz contrar fiind produsă o reacție preferențială a Al cu O).

CaO, dolomita sau flourina pot fi adăugate în orice moment al simulării. Se selectează butonul Adăugare de materiale de corecție - „Add addition”, pentru a accesa fereastra de dialog din care pot fi selectate materialele de adaos.

După selectarea butonului, cantitatea de material de corecție va fi specificată. Cu cât se adaugă mai multe materiale pentru obținerea zgurii, cu atât mai mult sulf poate fi îndepărtat, însă acest aspect trebuie corelat foarte bine cu costul zgurii, fiind o problemă de eficiență a procesului de producție.

Compoziția chimică a zgurii va trebui estimată, deoarece o analiză a compoziției chimice a zgurii va necesita un timp prea lung nefiind eficientă din acest punct de vedere. O analiză estimativă este totuși furnizată la finalul simulării, în fereastra Rezumat („Summary”). Este important să se încerce o menținere a unei valori ridicate a raportului $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$, deoarece o zgură cu o concentrație ridicată de CaO tinde să aibă un raport de distribuție a sulfului mai ridicată (L_S) și este mai eficientă pentru desulfurare, așa cum se poate observa în figura 26.

Teoretic, concentrația de „echilibru” a sulfului $[\%S]_{ech}$ a unui anumit tip de zgură este calculată cu relația:

$$[\%S]_{ech} = [\%S]_0 \frac{\frac{W_m}{L_S W_S}}{1 + \frac{W_m}{L_S W_S}}$$

unde: $[\%S]_0$ – concentrația inițială de sulf, în procente de masă (wt%);

W_S – masa zgurii, în kg;

W_m – masa metalului, în kg;

L_S – raportul de distribuție a sulfului, între zgură și oțel.

Valoarea L_S este determinată pe baza unei funcții complexe stabilită între compoziția zgurii, aluminiul dizolvat și conținutul de oxigen al oțelului elaborat și temperatură. Cu siguranță, în scopul minimizării cantității și costului materialelor pentru zgurificare utilizate, este necesară o valoare ridicată a L_S . În general, este necesar un conținut scăzut de oxigen dizolvat, la fel și o temperatură mai mare de 1600°C. Pentru a decide asupra compoziției țintă a zgurii, se utilizează o diagramă ternară în care sunt precizate valorile L_S (conform figurii 23). Ecuația descrisă poate fi rearanjată în ceea ce privește procentul de zgură necesar pentru a obține o concentrație de sulf specificată, cum ar fi condiționarea $[\%S]_{cerută} = [\%S]_{ech}$.

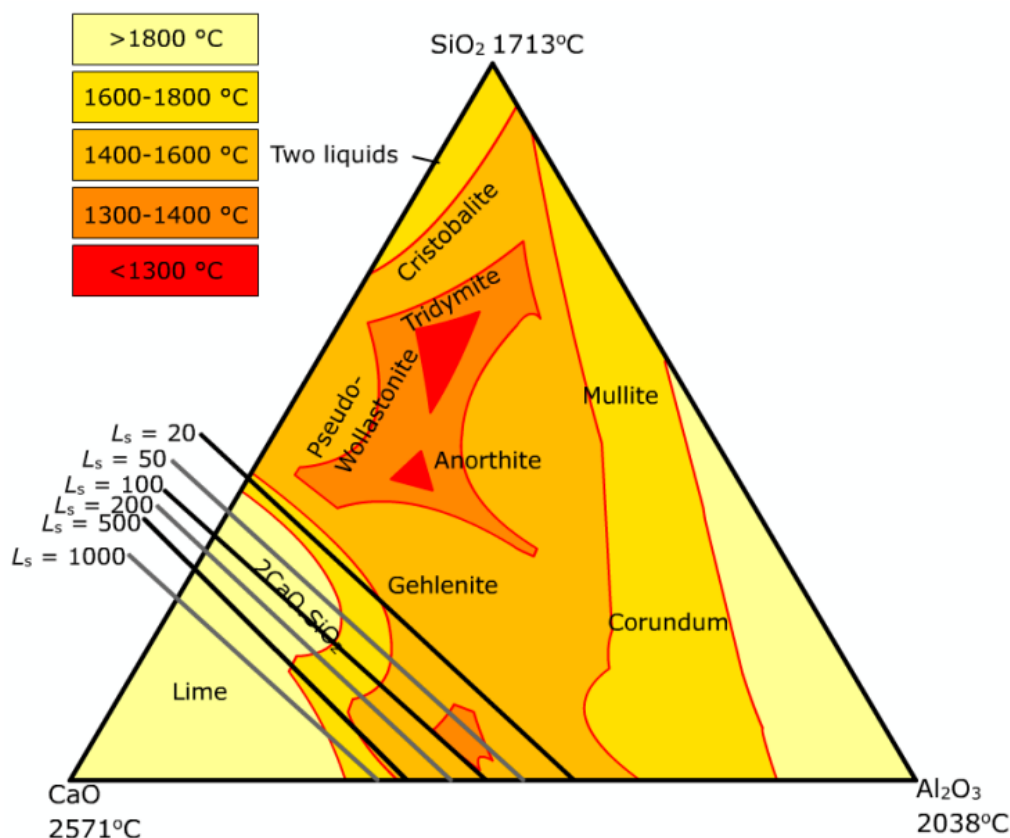


Figura 23. Valorile L_S pentru sistemul ternar $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ la 1600°C

3.8. „Tapping” - Turnarea

Turnarea începe atunci când butonul de comandă de sub corpul cuptorului este apăsat. Dacă se începe turnarea oțelului lichid în oală va încheia efectiv alimentarea cu energie electrică a cuptorului în timpul simulării. Când turnarea s-a finalizat, adică atunci când nu mai există oțel lichid în cuptor, simularea va trece automat la ecranul rezumat („summary”).

4. „Summary of Results” - Rezumatul rezultatelor

Ecranul Rezumat „Summary” este compus din trei părți principale:

1. „Settings summary” - Rezumatul setărilor
2. „Cost breakdown” - Defalcarea a costurilor
3. „Additional information” - Informații suplimentare

În continuare sunt explicate conținutul fiecăruia dintre acestea.

4.1. „Settings summary” – Rezumatul setărilor

În această fereastră, exemplificată în figura 24, pot fi găsite informații specifice referitoare la materia primă utilizată. Informațiile sunt disponibile pentru fiecare container de încărcare („basket”), respectiv pentru toată cantitatea de materie primă selectată („total”). Ecranul conține două tabele. În tabelul din stânga putem vedea detaliile conținutului containerelor. Sunt specificate variabile precum masa („mass”), volumul („volume”), costul reperelor („cost”) și costul total pe tonă („cost per metric tonne”). Tabelul din dreapta

prezintă compoziția chimică a încărcăturii care trebuie topită. Aceste valori sunt apoi modificate în urma centralizării materialelor încărcate în cele trei containere. În acest ecran puteți găsi, de asemenea, informații despre nivelul utilizatorului și marca de oțel selectată la început.

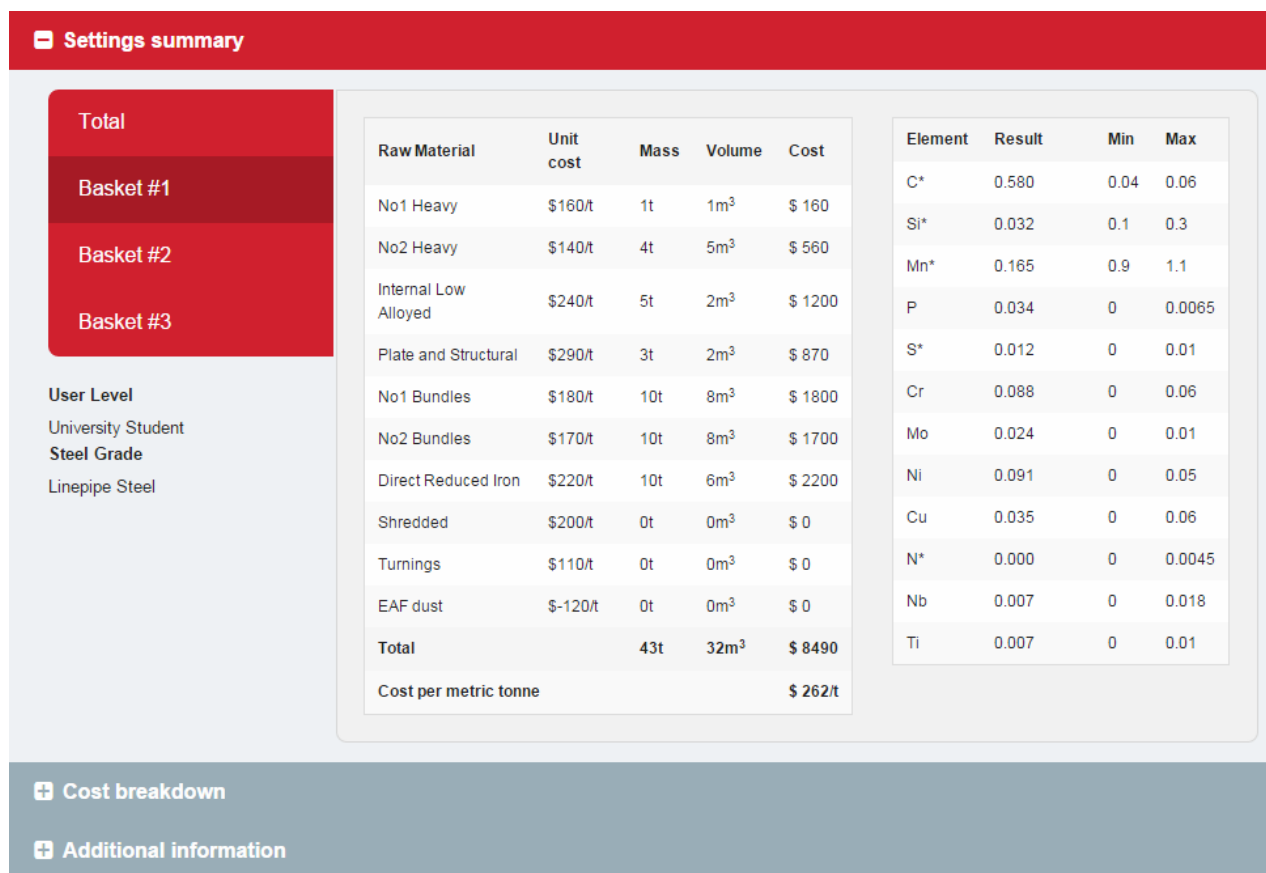


Figura 24. Exemplificare a ferestrei „Rezumatul setărilor”

4.2. „Cost breakdown” – Calcul de cost

În această fereastră (figura 25) sunt furnizate informații specifice despre principalele costuri de producție, durata de funcționare, temperatura de turnare, masa de oțel turnat, energia electrică, puterea consumată, materia primă utilizată, adaosuri de materiale și alte consumabile. De asemenea, se obține costul total de producție și costul pe tona de material elaborat. Dacă se selectează prin click stânga butonul compoziției băii metalice, se obțin informații detaliate despre compoziția finală a oțelului rezultat și încadrarea acestuia în cerințele standardului mărcii de oțel aleasă pentru elaborare.

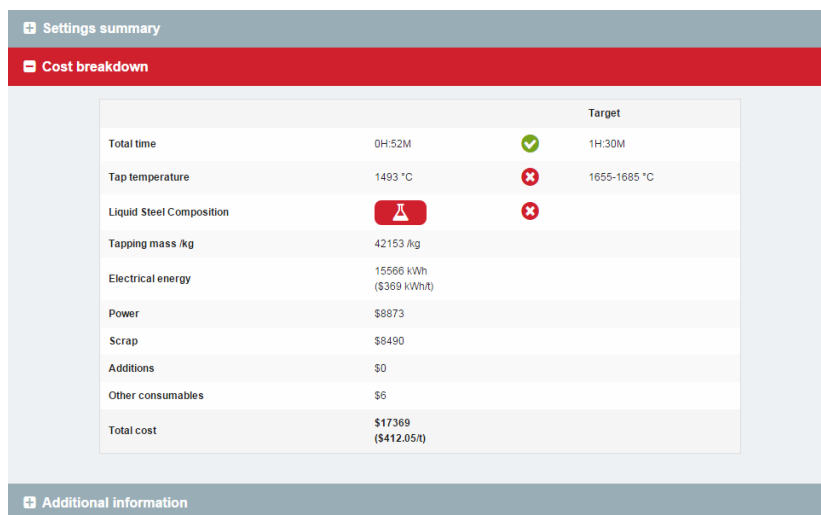


Figura 25. Exemplificare a ferestrei „Calcul de cost”

4.3. „Additional information” - Informații suplimentare

În ultima secțiune a Rezumatului rezultatelor, cea de Informații suplimentare (vezi figura 26), pot fi accesate date despre evoluția compoziției chimice a oțelului și a zgurii, în timpul elaborării șarjei.

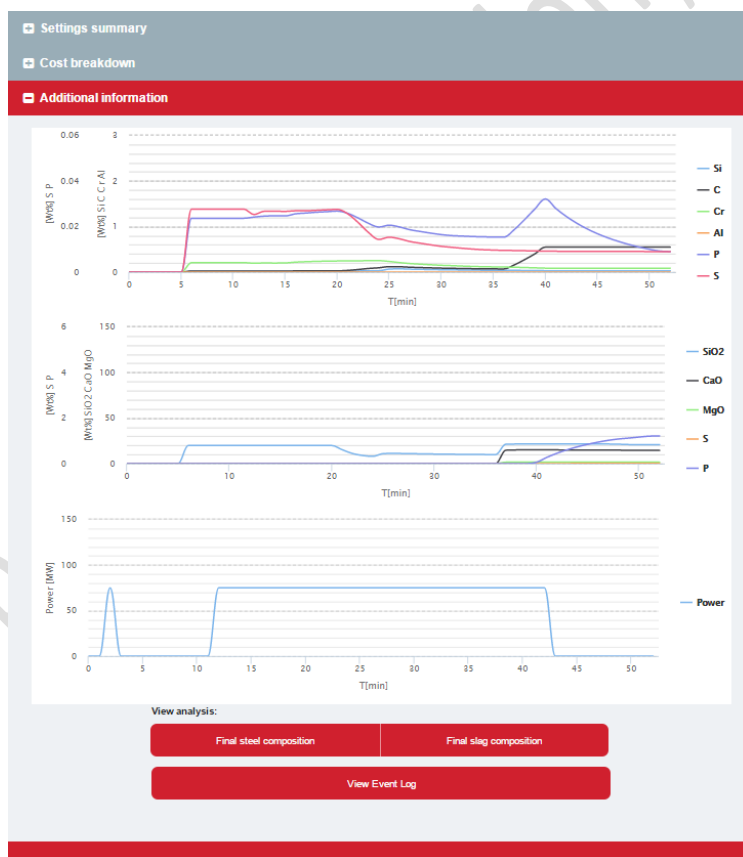


Figura 26. Exemplificare a ferestrei „Informații suplimentare”

Poate fi astfel analizat consumul de energie în timpul ciclului de producție. În cele din urmă, în partea de jos a ecranului, putem accesa compoziția finală a oțelului („Final steel composition”) și a zgurii („Final slag composition”) și putem accesa o înregistrare a evenimentelor dezvoltate în timpul elaborării șarjei („View event log”), prezentate în figurile 27 - 29.

Final steel composition / wt%

Element	Current		Min	Max
C	0.30698	✓	0.3000	0.4300
Si	0.12437	✓		0.5000
Mn	0.63177	✓	0.6000	0.9000
P	0.01468	✓		0.0300
S	0.02596	✓		0.0400
Cr	0.42027	✓		1.2000
Mo	0.06708	✓		0.3000
Ni	0.29476	✓		0.3000
Nb	0.00190	✓		0.0100
Cu	0.21862	✓		0.3500
Ti	0.00444	✓		0.0100
Al	0.00624			
V	0.00229			

Figura 27. Exemplificare a ferestrei „Compoziția finală a oțelului”

Final slag composition

Element	Current		Min	Max
Al ₂ O ₃	3.6394			
CaO	33.2719			
Cr ₂ O ₃	1.5171			
FeO	38.7658	✓	10	50
MgO	2.0257	✗	8	12
MnO	4.4539			
SiO ₂	16.1026			
P	0.1833			
S	0.0298			
Basicity	2.0662	✓	1.5	2.5

Figura 28. Exemplificare a ferestrei „Compoziția finală a zgurii”

Event Log

00:00:00 : Selected user level:: University Student
 00:00:00 : Selected steel grade:: Engineering Steel
 00:02:59 : Scrap basket added with: Internal Low Alloyed: 20t; No2 Heavy: 21t; Plate and Structural: 1t
 00:06:31 : Power set to: 105 MW
 00:19:18 : Power set to: 0 MW
 00:19:18 : Power has been turned off.
 00:20:48 : Scrap basket added with: No1 Bundles: 17t; No2 Bundles: 2t; Direct Reduced Iron: 5t; No1 Heavy: 1t; Turnings: 2t
 00:22:21 : Power set to: 105 MW
 00:30:53 : Power set to: 0 MW
 00:30:53 : Power has been turned off.
 00:32:28 : Scrap basket added with: Shredded: 15t; EAF dust: 6t
 00:35:34 : Power set to: 105 MW
 00:42:53 : Power set to: 90 MW
 00:57:20 : Power set to: 0 MW
 00:57:20 : Power has been turned off.
 00:58:02 : Tapping start
 00:59:48 : Tapping complete

Figura 27. Exemplificare a ferestrei „Derulare evenimente”

Bibliografie:

1. The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume, AISE Steel Foundation, Pittsburgh, 1998, ISBN 0-930767-02-0.
2. E, Turkdogan: Fundamentals of Steelmaking, The Institute of Materials, London, 1996, ISBN 1-86125-004-5.
3. M, Andersson & T.Sjövist: Processmetallurgins grunder, Stockholm 2002, pp.180-197.
4. S, Poliakova: Development of an Electric Arc Furnace Simulation, M.Sc. Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Materials Science and Engineering, Stockholm, 2005.
5. EAF Technology: State of the Art and Future Trends, International Iron and Steel Institute, Brussels, 2000, ISBN 2-930069-39-2