

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica



STUDIO MEDIANTE CFD-DEM DEL FLUSSO DI MASSA NEL TILTING ROCKER DI UN ALTOFORNO

Relatore:

Prof. Carlo MAPELLI

Tutor Aziendale:

Ing. Michele ZAGARIA

Tesi di Laurea di

Carlo MINERVINI

Matr. 765887

Anno Accademico 2011-2012

A mio nipote Luca. Forza piccolo grande uomo.

Indice

Elenco del figure	v
Elenco delle tabelle	viii
Ringraziamenti	ix
Introduzione	xiii
1 Introduzione al processo di altoforno	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Cenni storici	3
1.3 Processo di produzione della ghisa	4
1.4 Descrizione del processo	6
1.5 L'impianto "altoforno"	8
1.5.1 Descrizione generale dell'impianto	8
1.5.2 Evoluzione della tecnologia d'altoforno	10
1.5.3 La generazione del gas e la permeabilità della carica . .	11
2 La carica ferrifera: agglomerato, pellets e minerali	16
2.1 Introduzione	16
2.2 Definizione della qualità della carica ferrifera	17
2.3 L'agglomerato	20
2.4 I pellets	22
2.5 I minerali	23

3	I combustibili per l’altoforno: coke, fossile e combustibili ausiliari	25
3.1	Introduzione	25
3.2	Il Coke	26
3.3	Iniezione di carbon fossile ed altri combustibili ausiliari	28
4	Reazioni caratteristiche e produttività dell’altoforno	34
4.1	Introduzione	34
4.2	La raceway	35
4.2.1	Velocità di produzione	35
4.2.2	Condizioni della raceway e temperatura di fiamma . . .	35
4.3	Carbonio ed ossidi di ferro	37
4.3.1	Riduzione diretta	39
4.3.2	Riduzione indiretta	40
4.4	Profilo di temperatura	42
4.5	Simmetria circonferenziale e riduzione diretta	44
5	Il sistema di caricamento dell’altoforno	47
5.1	Introduzione	47
5.2	“Two-bell” charging system	48
5.2.1	Ulteriori innovazioni	49
5.3	“Bell-less top” charging system	50
5.3.1	Assieme del sistema di caricamento BLT	54
6	Presentazione del problema	58
6.1	Introduzione	58
6.2	Cos’è OpenFOAM	59
6.2.1	Struttura di un caso di OpenFOAM	60
6.2.2	Post-processing: ParaView	61
6.3	Approccio al problema	63
7	Definizione del modello	64
7.1	Introduzione	64

7.2	Approccio CFD-DEM	65
7.2.1	Computational Fluid Dynamics	65
7.2.2	Discret Element Method	66
7.2.3	Coupling CFD-DEM	67
7.3	Formulazione matematica del moto di particelle tramite DEM	68
7.3.1	Formulazione della forza resistente	71
8	Sviluppo della geometria del sistema di caricamento	73
8.1	Introduzione	73
8.2	I componenti della bocca Paul Wurth	76
8.2.1	Definizione del dominio di calcolo	78
9	Post-processing e risultati finali	85
9.1	Introduzione	85
9.2	Risultati e modifiche del sistema	86
9.3	Validazione del modello	88
	Conclusioni	91
	Bibliografia	97

Elenco delle figure

1.1	Processi per la produzione dell'acciaio (IISI, 2003).	2
1.2	Sezione di altiforni congelati (da Omori, 1987).	4
1.3	Parti di un altoforno.	5
1.4	La forza motrice dell'altoforno. Il processo in controcorrente crea spazi vuoti nelle aree indicate causando la discesa della carica.	6
1.5	Profilo di temperatura in altoforno (esempio tipico).	8
1.6	Schema generale di un altoforno.	9
1.7	Parte alta di un altoforno	10
1.8	Definizioni di "inner volume" e "working volume"	11
1.9	L'altoforno come reattore in controcorrente	12
1.10	Flusso di gas in altoforno pieno solo di coke e in altoforno pieno di strati alterni di coke e ferriferi	13
2.1	Carica ferrifera.	17
2.2	Permeabilità al flusso del gas in funzione del grado di vuoto .	18
2.3	Principio del "tumbler test"	20
2.4	L'impianto di agglomerazione	21
2.5	L'impianto di pellettizzazione	24
3.1	Diminuzione del consumo di combustibili (Scheidig et al, 2003). 26	
3.2	L'impianto di cokefazione	28
3.3	Degradazione del coke durante la discesa	29
3.4	Esempio di impianto di PCI.	31

3.5	Gasificazione del fossile.	33
4.1	Reazione di Boudouard: la curva rappresenta l'equilibrio.	38
4.2	Sommario della riduzione degli ossidi di ferro.	41
4.3	Schema della relazione tra temperatura, composizione del gas ed ossidi di ferro (la linea indica l'equilibrio)	42
4.4	Riduzione in un altoforno congelato.	43
4.5	Composizione del gas e temperature in altiforni in marcia	43
4.6	Reazioni di riduzione e temperatura della carica.	44
4.7	Zona di fusione asimmetrica	45
5.1	Sistema di caricamento a doppia campana	48
5.2	Profili tipici della stock-line	50
5.3	Schema del sistema di caricamento Paul Wurth.	51
5.4	Profilo della ston-box	52
5.5	Sistema di caricamento Paul Wurth	53
5.6	Assieme sistema caricamento Paul Wurth vista 1	55
5.7	Assieme sistema caricamento Paul Wurth vista 2	56
5.8	Assieme sistema caricamento Paul Wurth vista 3	57
6.1	Struttura di base di OpenFOAM	60
6.2	Struttura generale di paraView	62
7.1	Accoppiamento CFD-DEM	67
7.2	Schematizzazione del modello di Voigt	68
8.1	Definizione dei vertici	75
8.2	Definizione dei blocchi	76
8.3	Componenti della bocca Paul Wurth	77
8.4	Geometria iniziale del sistema di caricamento	78
8.5	Geometria effettiva del sistema di caricamento	79
8.6	Dominio di calcolo	81
8.7	Configurazione iniziale del nastro di caricamento	82
8.8	Distribuzione granulometrica delle particelle di coke	83

8.9	Particolare del nastro trasportatore e cuffia	84
9.1	Particelle adagiate sul nastro	87
9.2	Geometria modificata e superficie di inlet	88
9.3	Velocità delle particelle al termine del nastro di caricamento .	89
9.4	Panoramica del modello realizzato durante le fasi di caricamento	90
9.5	Impatto tra il flusso di massa e la ston-box	91
9.6	Velocità del flusso di massa nel passaggio attraverso il tilting rocker	92
9.7	Andamento del flusso di materiale in presenza del deflettore .	93
9.8	Andamento reale del flusso durante le fasi di caricamento . . .	93

Elenco delle tabelle

3.1	Dati tipici per combustibili iniettabili. *Confrontato con coke con 87.5%C **Iniettando 10kg/tHM aggiuntivi	33
4.1	Effetti sulla temperatura di fiamma	37

Ringraziamenti

Questa tesi è il risultato del mio lavoro presso lo stabilimento ILVA SpA di Taranto. Prima di tutto vorrei ringraziare il Prof. Carlo Mapelli docente del Dipartimento di Ingegneria Meccanica presso il Politecnico di Milano, supervisore del mio lavoro, che ha permesso lo sviluppo di questa tesi di laurea presso il complesso siderurgico di Taranto, nonchè ha incentivato ed incoraggiato lo sviluppo della stessa tesi.

Desidero inoltre ringraziare l'Ing. Vincenzo Dimastromatteo, Capo Area Altiforni, ed il mio tutor aziendale Ing. Michele Zagaria, Capo Area PCA, per la loro continua supervisione e disponibilità. Un ulteriore ringraziamento desidero rivolgerlo all'Ing. Nicola Petronelli e al Sig. Franco Pignatelli per i loro preziosi e innumerevoli consigli, al Sig. Tommaso Patova, al Sig. Ettore Vozza e a tutti i componenti della palazzina Ghisa dello stabilimento ILVA di Taranto per avermi accolto e sostenuto durante tutto il periodo di stage.

Vorrei inoltre esprimere la mia sincera gratitudine ai miei compagni di corso Filippo, Damiano, Davide, Marco e Gigi per i numerosi consigli non solo durante il periodo di ricerca, ma nell'arco dei cinque anni trascorsi insieme.

Desidero poi ringraziare con affetto la mia famiglia, ed in particolare i miei genitori e mia sorella Federica, per il sostegno e per il grande aiuto che mi hanno dato lungo tutto il percorso di studi permettendomi di raggiungere questo importante traguardo.

Infine, un ringraziamento particolare voglio dedicarlo alla persona che è al mio fianco da ormai tre anni, per essermi vicina in ogni istante, sostenendomi nei momenti difficili e gioiando con me in quelli felici.

Sommario

Al fine di migliorare il processo di altoforno ed aumentare la produttività, a cavallo del XX secolo, si introdussero molteplici modifiche. Tra queste hanno sicuramente avuto una notevole importanza gli sviluppi e l'automazione dei sistemi di caricamento della carica ferrifera e di coke.

Questo lavoro di tesi riguarda difatti le fasi di carica di un altoforno, ponendo l'attenzione sul percorso che il flusso di massa realizza prima di essere scaricato alla bocca dell'altoforno.

In particolare si è analizzato il più moderno tra gli apparati di caricamento che il mercato offre, ovvero il “Bell-less top charging system”, ideato da Paul Wurth nel 1972.

Si è dunque realizzato un modello del sistema di caricamento in questione, con l'ausilio di OpenFOAM, un innovativo software che comprende un'infinità di risolutori attinenti a studi di tipo ingegneristico.

La validazione del modello è stata effettuata confrontando i risultati delle simulazioni, con le reali fasi di carica, apprese durante diverse ispezioni presso l'altoforno n.4 dello stabilimento ILVA di Taranto.

Parole chiave: Altoforno, CFD-DEM, Bell-less top charging system, OpenFOAM, Acciaio, Ghisa

Abstract

In order to improve the blast furnace process and increase productivity, in the XX century, many changes were introduced. Among these were certainly very important the developments and automation of charging systems to charge coke and iron.

This thesis work infact refers to the steps of a blast furnace charge, focusing on the path that the mass flow realizes before being downloaded to the throat of the blast furnace.

During the study the most modern charging system was analyzed, that is “Bell-less top charging system”, designed by Paul Wurth in 1972.

Then a model of this charging system has been created through OpenFOAM, an innovative software that includes an infinity of solvers about engineering research works.

The validation of the model has been performed by comparing simulations results with the real charging phases, learned during several inspections at the blast furnace n.4 on Ilva in Taranto.

Key words: Blast furnace, CFD-DEM, Bell-less top charging system, OpenFOAM, Steel, Cast iron

Introduzione

La produzione dell'acciaio, mediante l'utilizzo di ghisa d'altoforno, è senza dubbio quella maggiormente utilizzata per l'elevata efficienza del processo d'altoforno.

La funzionalità principale dell'altoforno è quella di rimuovere l'ossigeno dai minerali di ferro (ossidi metallici come ematite, magnetite e wustite) ottenendo come prodotto finale la ghisa, che andrà ulteriormente trattata al fine di ottenere acciaio.

Nel processo di produzione dell'acciaio, detto anche ciclo integrale, l'altoforno rappresenta sicuramente uno dei sottosistemi più importanti sia per il consumo totale di agenti riducenti, necessari ad asportare l'ossigeno dai minerali, sia per la qualità della ghisa prodotta e quindi della qualità dell'acciaio.

La produzione della ghisa nel processo d'altoforno prevede l'utilizzo di tre materiali, che costituiscono la carica dell'altoforno, ovvero minerali di ferro, carbone e fondente. I minerali sono necessari per fornire il ferro nella ghisa. Il carbone, dopo un trattamento definito carbonizzazione, viene trasformato in coke mentre i minerali di ferro ed il calcare vengono sottoposti ad un processo di sinterizzazione.

La carica viene inserita nella parte superiore dell'altoforno mediante un complesso sistema di caricamento. Durante il corso degli anni il sistema di caricamento ha subito, in seguito alla diretta correlazione con l'efficienza dell'altoforno, numerosi mutamenti, fino a raggiungere quello che è lo standard per tutti gli altiforni moderni, ovvero il "Bell-less top charging system" ideato

da Paul Wurth nel 1972.

Dopo una breve ma doverosa introduzione sul processo d'altoforno, sui costituenti la carica e sulle reazioni che avvengono all'interno di un altoforno si è passati alla descrizione del sistema di caricamento che equipaggia i quattro altiforni dello stabilimento ILVA di Taranto.

Successivamente si è descritto il processo di identificazione del modello dell'apparato di caricamento, dal punto di vista geometrico e fisico, simulando un ciclo di carica; infine si sono presentati i risultati ottenuti raffrontandoli all'applicazione reale.

Capitolo 1

Introduzione al processo di altoforno

Alcuni nascono mediocri, altri
ottengono la mediocrità, e ad altri
la mediocrità è imposta dall'alto.

JOSEPH HELLER

1.1 Introduzione

Per la produzione di prodotti siderurgici sono perseguibili due diverse tipologie di processo: quello che passa per la produzione della ghisa in altoforno e successivamente di acciaio mediante il processo ad ossigeno; quella di produzione diretta dell'acciaio in forni ad arco elettrico. Entrambi i processi differiscono sia per il tipo di prodotto finale, sia per le materie prime usate.

L'acciaio prodotto mediante il processo d'altoforno viene usato tipicamente per i prodotti piani, mentre quello elettrico è impiegato per la produzione di prodotti lunghi. Il primo usa coke e fossile come combustibile, agglomerato e pellet come materiali ferrosi, mentre il secondo usa energia elettrica per fondere il rottame.

Entrambe le tipologie di processo durante gli ultimi decenni si sono evolute, nonostante i forni ad arco elettrico siano in forte sviluppo, ad oggi la maggior produzione di acciaio viene ancora ottenuta mediante il processo d'altoforno (vedi figura 1.1).

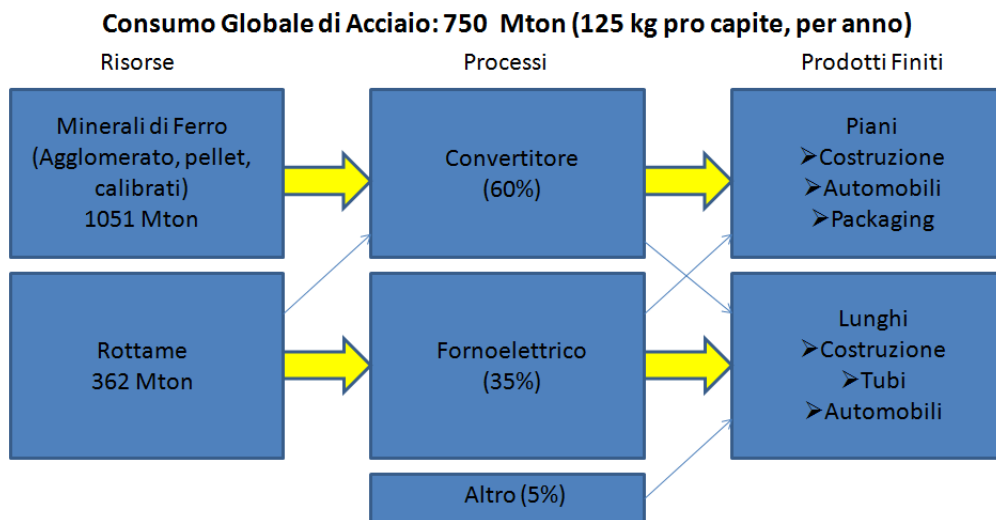


Figura 1.1: Processi per la produzione dell'acciaio (IISI, 2003).

L'altoforno produce ghisa fusa, che successivamente viene trasportata in acciaieria. Qui avviene la trasformazione della ghisa in acciaio mediante l'asportazione di carbonio, zolfo, silicio, manganese e fosforo.

Per ottenere delle buone prestazioni dall'acciaieria è necessario che la qualità della ghisa sia entro dei limiti ben definiti, tipicamente silicio tra 0.3% e 0.7%, manganese tra 0.2 e 0.4%, fosforo intorno allo 0.06% e temperatura ghisa più alta possibile.

Nel processo d'altoforno, minerali di ferro e combustibili (coke e fossile) sono trasformati in ghisa e loppa. Ghisa e loppa non si miscelano, ma si separano l'una dall'altra per le differenti densità (la loppa meno densa galleggia sopra la ghisa più densa). La ghisa è separata dalla loppa durante lo spillaggio dall'altoforno.

1.2 Cenni storici

Il processo di produzione della ghisa trova le sue origini lungo le sponde del Mar Mediterraneo, per diffondersi successivamente nel resto dell'Europa e del Mondo.

Il precursore degli altiforni moderni, noto come Stukofen, fu sviluppato in Germania in seguito alla vertiginosa crescita della richiesta di acciaio. Il forno Stukofen si sviluppava su un'altezza di circa 4.5 m e la sua produttività media era pari all'incirca a 100-150 ton/anno.

A partire dal 1880 si introdussero notevoli cambiamenti, ai quali fecero seguito un incremento del numero e della dimensione dei forni, un aumento della produttività e dell'efficienza del forno stesso. I cambiamenti di maggiore entità sono elencati di seguito:

- sostituzione del carbone di legna con il coke;
- preriscaldamento dell'aria insufflata;
- utilizzo del gas di scarico come combustibile ausiliario.

Tuttavia il periodo di maggior evoluzione, si osservò a cavallo della seconda metà del XX secolo, in seguito allo sviluppo del processo negli USA e all'evoluzione della scienza in generale, in particolare in ambito chimico-fisico e metallurgico. In quegli anni infatti si raggiunse una configurazione standard molto vicina a quella dei più importanti impianti moderni. Si raggiunse una produttività media di 2000 ton/giorno in seguito a numerosi sviluppi, quali:

- utilizzo di coke e minerali di ferro di qualità opportuna;
- iniezione, tamite le tubiere, di gas naturale e altri combustibili ausiliari;
- maggiori volumi dei forni;
- temperature elevate;
- arricchimento del vento caldo con ossigeno;

- sistemi di caricamento migliorati e automatizzati.

1.3 Processo di produzione della ghisa

Minerali e coke sono caricati in strati separati alla bocca dell'altoforno. Da studi su altiforni sottoposti a “quenching” è apparso chiaro che gli strati di minerali e di coke si mantengono inalterati finché la temperatura è così alta da portare al rammollimento dei minerali ed alla fusione.

Gli altiforni sottoposti a quenching vengono congelati durante la normale marcia mediante acqua e azoto. Un esempio di altoforno spento è raffigurato in figura 4.4. Gli altiforni congelati mostrano chiaramente la struttura degli strati di coke e minerali.

Ulteriori analisi hanno fornito informazioni sul riscaldamento e la fusione dei minerali, così come sull'avanzamento delle reazioni chimiche.

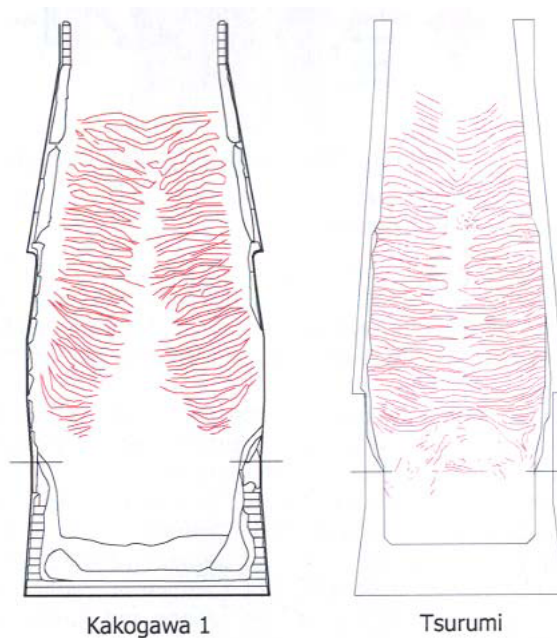


Figura 1.2: Sezione di altiforni congelati (da Omori, 1987).

Il contenuto di un altoforno in marcia è mostrato in figura 1.3. Dall'alto in basso si distinguono:

1. strati alternati di coke e di minerale;
2. una zona dove il minerale inizia a rammollire e fondere, detta appunto "zona di rammollimento";
3. una zona con solo coke, mentre ghisa e loppa sono liquide; questa zona si definisce "di coke attivo" o "zona di sgocciolamento";
4. la zona dell'uomo morto, cioè il cono di coke nel crogiolo.

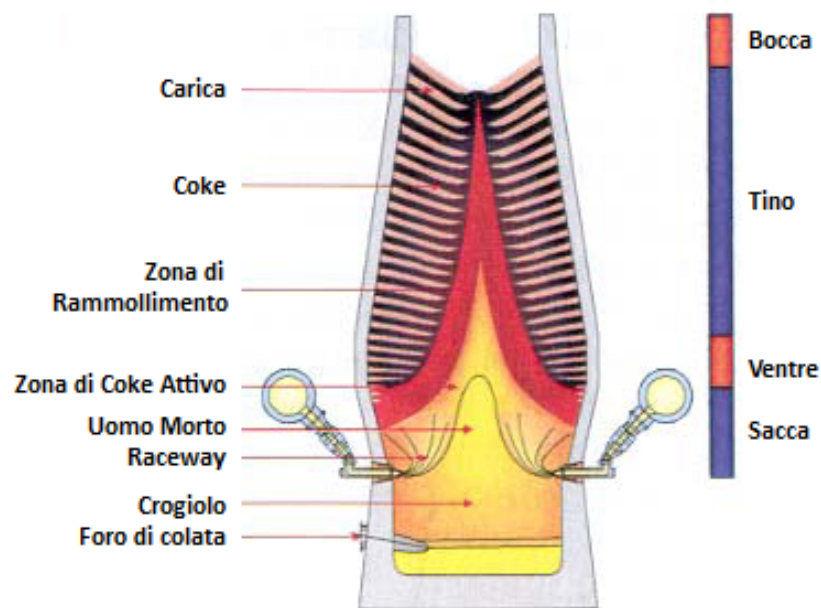


Figura 1.3: Parti di un altoforno.

L'altoforno ha una tipica forma conica. Dal punto di vista strutturale, si può suddividere nelle seguenti zone, dall'alto verso il basso:

1. bocca, dove si trova la superficie della carica;

2. tino;
3. ventre;
4. sacca;
5. crogiolo.

1.4 Descrizione del processo

La forza motrice dell'altoforno è illustrata in figura 1.4. Il processo d'altoforno può essere descritto nel seguente modo:

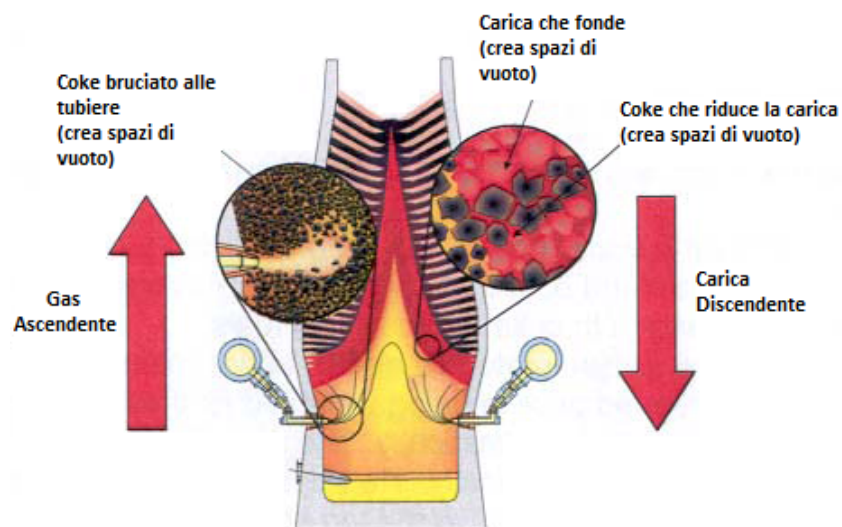


Figura 1.4: La forza motrice dell'altoforno. Il processo in controcorrente crea spazi vuoti nelle aree indicate causando la discesa della carica.

1. l'altoforno è caricato con strati alternati di coke e minerali di ferro;
2. il vento caldo (aria più arricchimento di ossigeno) è insufflato nell'altoforno attraverso le tubiere. Una tubiera è una apparecchiatura troncoconica di rame, raffreddata al suo interno con acqua, mediante la quale

- viene soffiato il vento caldo (fino a 1200°C). In funzione della grandezza dell'altoforno il numero di tubiere può variare da 12 a 40;
3. il vento caldo brucia i combustibili (cioè il coke ed i combustibili ausiliari iniettati attraverso le tubiere); nella combustione l'ossigeno del vento è trasformato in monossido di carbonio (CO) mentre il gas prodotto ha un'alta temperatura di fiamma (2000°C - 2300°C). La combustione consuma il coke davanti alle tubiere, creando spazi vuoti;
 4. il gas caldo sale attraverso l'altoforno, e durante la salita:
 - fonde i minerali di ferro della carica, creando spazi vuoti;
 - riscalda ed essicca i materiali nel tino;
 - rimuove l'ossigeno della carica, mediante una serie di reazioni chimiche di riduzione;
 5. i minerali di ferro fondendo producono ghisa e loppa che sgocciolano verso il crogiolo: da qui, vengono spillate attraverso il foro di colata. Nella zona di fusione ghisa e loppa fondendo creano spazio vuoto.

L'altoforno può essere considerato come uno scambiatore in controcorrente di massa e calore: il calore è trasferito dal gas alla carica, la massa (ossigeno) è trasferita dalla carica al gas.

Il gas trasferisce calore alla carica e simultaneamente l'ossigeno si trasferisce dalla carica al gas. La caratteristica di essere un processo in controcorrente lo rende molto efficiente.

Un tipico esempio di profilo della temperatura nell'altoforno è mostrato in figura 1.5, nella quale è evidente che la zona di fusione è situata tra le isoterme di 1100°C e 1450°C .

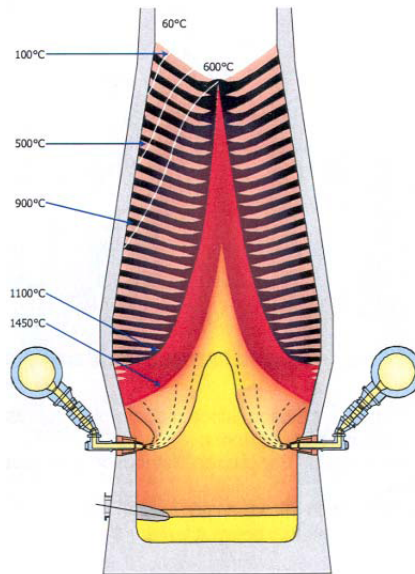


Figura 1.5: Profilo di temperatura in altoforno (esempio tipico).

1.5 L'impianto "altoforno"

1.5.1 Descrizione generale dell'impianto

Uno schema dei principali impianti ausiliari di un altoforno è mostrato in figura 1.6. Si distinguono:

1. *cowpers* o *hot stoves*; il vento caldo (1000°C - 1200°C) è prodotto nei *cowpers* ed attraverso il collettore vento caldo, le maniche a vento ed infine le tubiere, è insufflato in altoforno; il vento caldo brucia il coke ed i combustibili ausiliari;
2. *stock house*; i ferriferi ed il coke vengono insilati in una *stock house*. I materiali di carica, prima di essere scaricati in altoforno, vengono vagliati e pesati automaticamente (le correzioni per l'umidità del coke sono effettuate anche automaticamente). Attraverso carrelli e/o nastri trasportatori, i ferriferi ed il coke sono portati alla bocca dell'altoforno e da qui sono scaricati nella bocca;

3. *depurazione gas*; il gas di bocca lascia l'altoforno attraverso gli uptake ed il downcomer. Il gas di bocca ricco di fini è depurato mediante un sistema a tubo di venturi ed un sistema di lavaggio ad umido;
4. *campo di colata*; la ghisa e la loppa raccolte nel crogiolo sono colate e separate nel campo di colata e successivamente raccolte nei carri siluro;
5. *granulazione loppa*; la loppa è granulata, cioè spenta con acqua corrente. La loppa granulata è usata principalmente nell'industria del cemento.

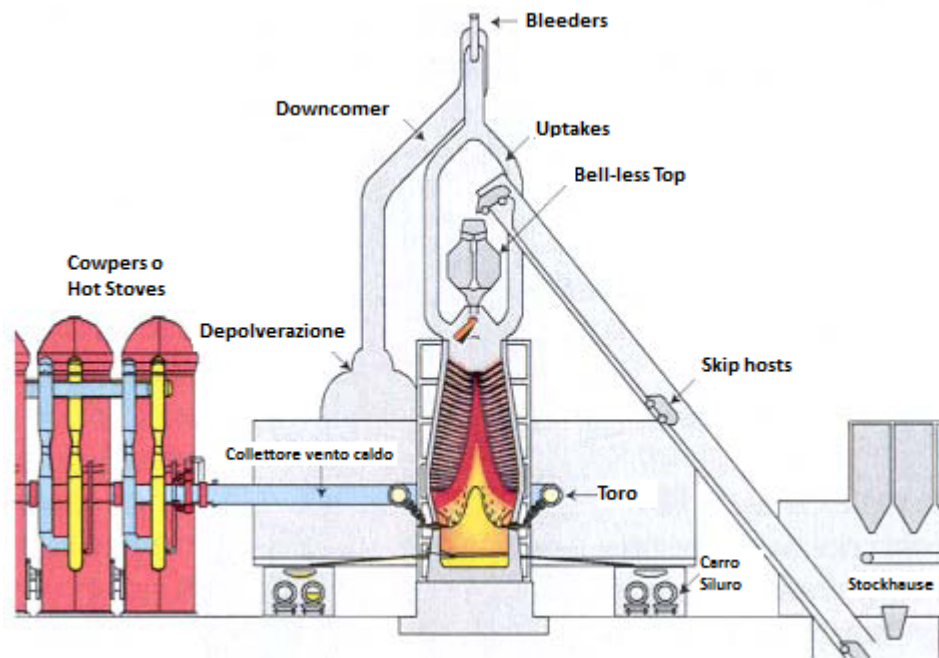


Figura 1.6: Schema generale di un altoforno.

La bocca dell'altoforno è chiusa dall'ambiente esterno sia per aspetti ambientali sia per mantenere un'alta pressione alla bocca. L'alta pressione è necessaria per due differenti motivi:

1. per ragioni di sicurezza, lavorando ad alte pressioni eventuali perdite sono facilmente localizzabili;

2. aumentare il tempo di permanenza del gas all'interno dell'altoforno.

Vi sono due sistemi differenti di caricamento dell'altoforno (Figura 1.7):

1. il sistema a due campane;
2. la bocca Paul Wurth.

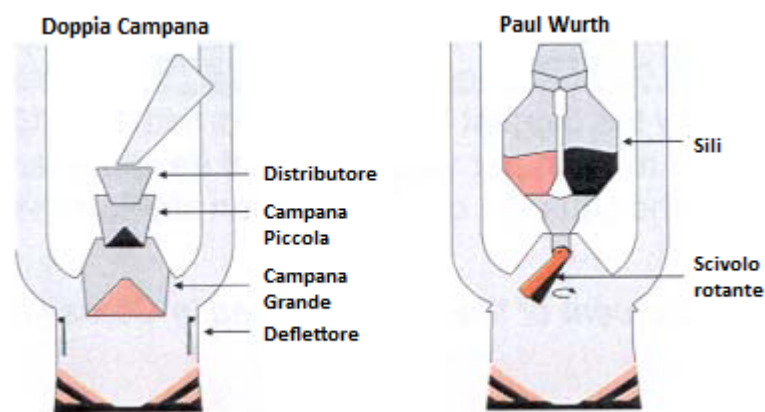


Figura 1.7: Parte alta di un altoforno

1.5.2 Evoluzione della tecnologia d'altoforno

Gli altiforni si sono evoluti considerevolmente in grandezza durante il XX secolo. Agli inizi del secolo scorso, gli altiforni avevano un diametro di 4-5 metri e producevano circa 100000 tonnellate di ghisa l'anno. Alla fine del secolo scorso, gli altiforni più grandi avevano 14 o 15 metri di diametro, con una produzione da 3 a 4 milioni di tonnellate di ghisa l'anno.

La grandezza di un altoforno è spesso espressa come diametro del crogiolo, o come "working volume" o come "inner volume". Il "working volume" è il volume dell'altoforno a disposizione del processo, cioè il volume dello spazio tra tubiere e livello di carica. Le definizioni di "working volume" ed "inner volume" sono mostrate in figura 1.8.

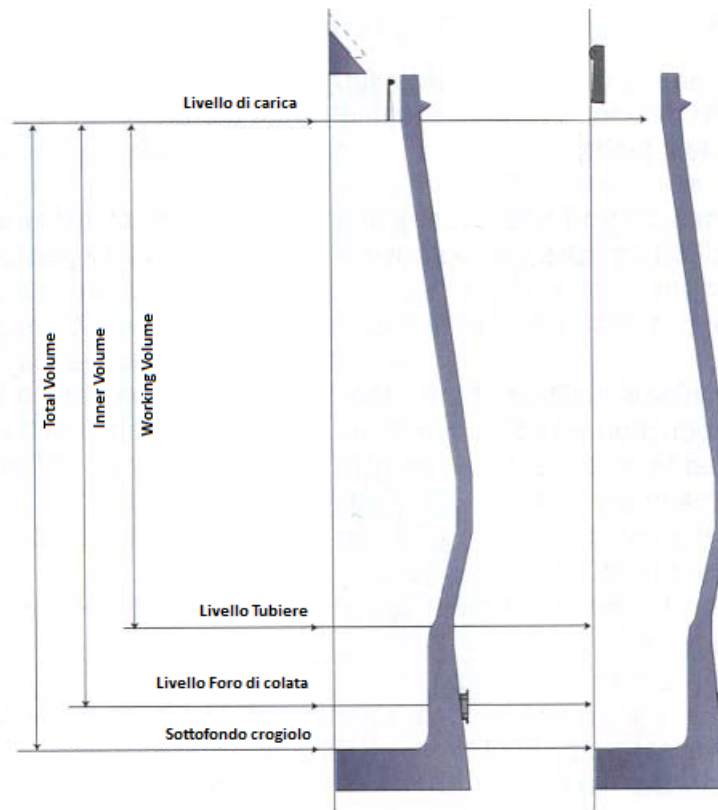


Figura 1.8: Definizioni di "inner volume" e "working volume"

1.5.3 La generazione del gas e la permeabilità della carica

L'altoforno è un reattore in controcorrente. La forza motrice è il vento caldo che brucia il coke alle tubiere. La carica consiste di strati alterni di ferriferi (agglomerato, pellets, minerali) e coke. La carica è immessa nella bocca dell'altoforno umida e fredda, mentre alle tubiere il vento caldo brucia il coke. In funzione dell'altezza dell'altoforno (circa 22-25 metri dalle tubiere alla stock-line), la temperatura del gas scende dalla temperatura di fiamma di 2200°C alla temperatura del gas di bocca, pari a 100-150°C.

Il processo ha inizio con il vento caldo attraverso le tubiere, che brucia il coke ed il fossile nella raceway. La combustione del coke crea gas caldo in

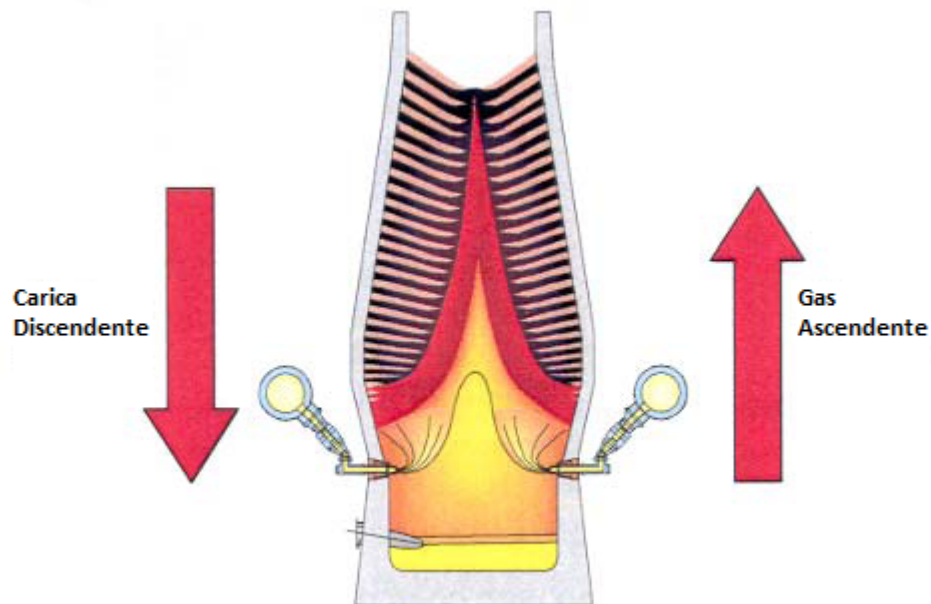


Figura 1.9: L'altoforno come reattore in controcorrente

grado di sciogliere la carica ferrifera.

Il coke che brucia e la fusione della carica ferrifera creano spazio all'interno dell'altoforno, riempito immediatamente da materiale (coke e ferriferi) "fresco".

La produzione di un altoforno è direttamente correlata con la quantità di coke bruciato davanti alle tubiere, poiché una quantità fissa di ferriferi è caricata per ogni tonnellata di coke.

A regime, la ghisa è prodotta nel momento in cui il coke viene bruciato, generando un'enorme quantità di calore nella raceway. Il calore porta ad elevate temperature di fiamma, generalmente tra i 2000 ed i 2300°C. Dato che questa temperatura è più alta della temperatura di fusione della ghisa e della loppa, il calore del gas caldo può essere usato per sciogliere la carica.

Il gas caldo sale attraverso gli strati di coke e ferriferi. Se ci fosse solo coke nell'altoforno, la composizione chimica del gas non cambierebbe ed il gas si raffredderebbe, a causa del contatto con gli strati di coke freddo nella

parte alta dell'altoforno. Una rappresentazione del passaggio del gas in un altoforno riempito di coke è riportata in figura 1.10.

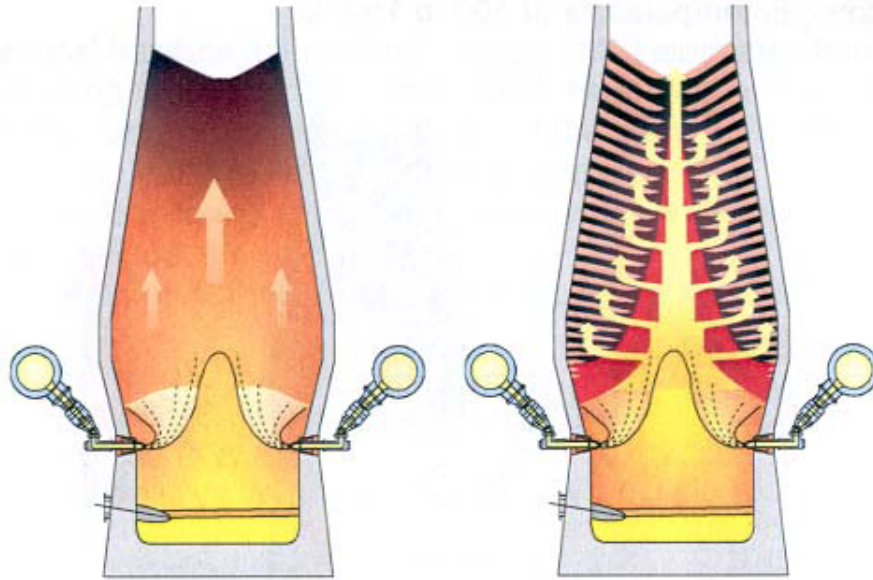


Figura 1.10: Flusso di gas in altoforno pieno solo di coke e in altoforno pieno di strati alterni di coke e ferriferi

Il flusso del gas ha una funzione di sostegno. Agli operatori d'altoforno più esperti, un altoforno riempito di solo coke potrebbe sembrare un concetto teorico, tuttavia, in alcune situazioni pratiche, come il blow-in (avviamento) di un nuovo altoforno o quando l'altoforno va tenuto fermo a lungo (banking), esso è riempito quasi completamente solo di coke.

In condizioni di marcia regolare l'altoforno è riempito con circa 35/45 strati alterni di coke e ferriferi. È importante notare che la permeabilità del coke è maggiore della permeabilità dei ferriferi, a causa delle maggiori dimensioni delle particelle di coke e del maggior grado di vuoto negli strati di coke.

Per esempio, la sezione media del coke in altoforno è in genere compresa tra 45 e 55 mm, mentre quella dell'agglomerato tra 14 e 20 mm e quella dei pellet tra 10 e 12 mm. Ne consegue che gli strati di ferriferi determinano la

resistenza al flusso di gas nell'altoforno, mentre gli strati di coke funzionano da distributori di gas.

Vediamo ora cosa succede quando il gas spostandosi dalla sacca verso l'alto gradualmente si raffredda. A temperature superiori a 1400°C , temperatura di fusione della loppa, il calore viene trasferito agli strati di coke e ferriferi e fonde questi ultimi. Lo stesso avviene a temperature superiori a 1100°C , ma i ferriferi non fondono completamente, bensì rammolliscono e si aggregano.

Nella zona di rammollimento e fusione, l'ossigeno rimanente è rimosso dalla carica. Tipicamente, per ogni atomo di ferro c'è mezzo atomo di ossigeno. L'ossigeno reagisce con il coke e genera altro monossido di carbonio. Questa è la cosiddetta reazione di "riduzione diretta", che avviene solo nella parte bassa dell'altoforno.

Il gas ora ha una temperatura di circa 1100°C ed è aumentato di massa. Dato che la riduzione diretta costa molta energia, l'efficienza di un altoforno dipende molto dalla quantità di ossigeno rimossa dai materiali ferrosi prima di raggiungere i 1100°C . Riassumendo:

- il calore trasferito dal gas alla carica, la fonde (se $T > 1400^{\circ}\text{C}$) o la rammollisce (se $1100^{\circ}\text{C} < T < 1400^{\circ}\text{C}$);
- l'ossigeno residuo nella carica è rimosso dal coke, generando ulteriore CO mediante la "reazione di riduzione diretta".

A costo di un ulteriore suo raffreddamento, il gas ha la capacità di rimuovere l'ossigeno dai materiali di carica, producendo anidride carbonica (CO_2). Maggiore è l'ossigeno rimosso, più efficiente risulta il processo. Al di sotto dei 1100°C , hanno luogo i seguenti fenomeni:

- il calore viene trasferito dal gas alla carica;
- la CO_2 viene generata dal CO riducendo l'ossigeno della carica mediante la reazione cosiddetta di "riduzione gassosa"; non c'è ulteriore generazione di gas; in letteratura questa reazione è detta di "riduzione indiretta".

- una reazione simile ha luogo con l'idrogeno; l'idrogeno può rimuovere l'ossigeno dalla carica formando acqua (H_2O).

Se seguiamo la carica ferrifera ed il coke nel loro cammino verso la parte bassa dell'altoforno, essi vengono gradatamente riscaldati. Dapprima evapora l'umidità, poi, verso i 500°C , iniziano le reazioni chimiche di rimozione dell'ossigeno.

Il primo passo è la riduzione della cosiddetta *ematite* (Fe_2O_3) a *magnetite* (Fe_3O_4). La reazione di riduzione genera energia, che contribuisce ad aumentare la temperatura della carica. Inoltre, la reazione di riduzione crea tensione nella struttura cristallina dei ferriferi, che può rompersi in particelle più piccole: questo fenomeno è chiamato "degradazione a bassa temperatura".

Più in basso nell'altoforno, la temperatura della carica sale gradatamente, finché i ferriferi iniziano a rammollire ed a fondere nella zona di fusione. Infine il ferro fuso e la loppa sono raccolti nel crogiolo.

Capitolo 2

La carica ferrifera: agglomerato, pellets e minerali

Due cose sono infinite: l'universo e la stupidità umana, ma riguardo l'universo ho ancora dei dubbi.

ALBERT EINSTEIN

2.1 Introduzione

Agli albori della produzione della ghisa, il XIX secolo, gli altiforni erano solitamente situati nei pressi delle miniere di minerali. In particolare nei numerosi altiforni attivi nelle principali aree industriali del tempo, quali Germania, Inghilterra e Stati Uniti, si utilizzavano minerali locali e carbone di legna (successivamente coke). Dopo l'avvento del motore a vapore nelle navi e nei trasporti, il centro delle attività industriali traslò dai luoghi di estrazione ai fiumi più grandi, come il fiume Reno; più tardi esso si spostò ancora dalle rive dei fiumi alle coste marine.

Come carica per l'altoforno non si può utilizzare direttamente il minerale proveniente dalle miniere, poiché questo risulta essere troppo fine e quindi impermeabile al gas. Ci si è, dunque, orientati verso un utilizzo di agglomerato, pellets e minerali calibrati. In particolare i pellets e l'agglomerato hanno origine da fini provenienti dalle miniere di ferro e normalmente, hanno subito un processo di arricchimento.

Una buona carica per altoforno è composta, per la maggior parte, da agglomerato e/o pellets. Letti di fusione con un maggior quantitativo di pellets sono comuni in Asia ed Europa, mentre quelli di agglomerato in America e Scandinavia.



Figura 2.1: Carica ferrifera.

2.2 Definizione della qualità della carica ferrifera

Le necessità qualitative per la carica di altoforno sono:

- la composizione chimica della carica: dopo la riduzione e la fusione, ghisa e loppa devono avere la composizione ottimale;
- le proprietà della carica devono essere tali da permettere la riduzione degli ossidi presenti.

La riducibilità è determinata dal contatto tra gas e particelle della carica, così come dalla diffusione del gas all'interno delle particelle stesse. La bontà della riduzione ottenuta in altoforno, è dovuta alla struttura degli strati della carica ferrifera, alla permeabilità di tali strati e al flusso di gas all'interno dell'altoforno.

In particolare la permeabilità, così come mostrato in figura 2.2, è funzione del grado di vuoto, che a sua volta dipende dal rapporto tra particelle di volume più grande (V_l) e più piccolo (V_s).

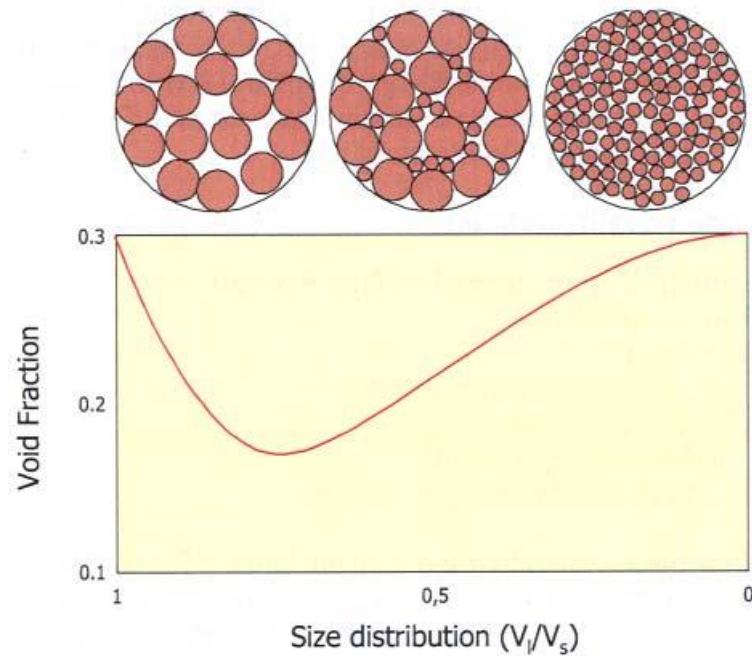


Figura 2.2: Permeabilità al flusso del gas in funzione del grado di vuoto

Nella zona del tino, la permeabilità della carica è determinata dalla quantità di fini, ovvero di particelle di diametro inferiore ai 5 mm. Al crescere della presenza di fini, la frazione di vuoto occupabile dai gas riducenti sarà inferiore, incidendo quindi sulla massa di gas che fluisce attraverso la carica. Vi sono due sorgenti di fini :

- fini caricati in altoforno;

- fini generati durante il processo nel tino.

In particolare quest'ultimi hanno origine durante la prima riduzione da ematite a magnetite; sono predisposti a questo fenomeno, detto di "riduzione-degradazione", soprattutto agglomerati e minerali calibrati. Questo effetto aumenta quanto più lentamente il materiale si scalda e si riduce. In questo modo, al livello di carica, si forma un anello con alta concentrazione di fini, che oltre ad impedire il passaggio del flusso di gas, aumenta anche la riduzione-degradazione a causa del lento riscaldamento: si è al cospetto di un vero e proprio circolo vizioso.

Le principali proprietà della carica ferrifera sono:

- composizione chimica;
- curva granulometrica;
- proprietà tecnologiche:
 - resistenza a freddo;
 - riduzione-degradazione;
 - caratteristiche a rammollimento e fusione.

Soprattutto ai fine della permeabilità, è importante avere una quantità inferiore al 5% di fini in carica ed avere una curva granulometrica abbastanza stretta. Una buona indicazione della quantità di fini in carica, è fornita dalla misura della percentuale di fini dopo vagliatura alla stock house. Solitamente, si caratterizza il materiale con l'ausilio dei tamburi rotanti ("tumbler test"): un campione di materiale, come mostrato in figura 2.3, viene immerso in un tamburo rotante ad un numero di giri fissato; successivamente viene misurata la distribuzione granulometria del campione che verrà poi utilizzata come indicatore di qualità. Dal tumbler test si determina anche la resistenza a freddo.

Il test HOSIM, che è una vera e propria simulazione del comportamento in altoforno, viene invece utilizzato per stimare la riducibilità del campione e

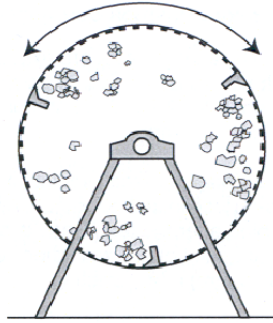


Figura 2.3: Principio del “tumbler test”

la riduzione-degrazione (RDI). Il test viene eseguito riscaldando un campione di materiale fino a 500°C riducendolo con gas contenente CO (a volte anche H_2). Dopo un certo tempo il campione viene fatto raffreddare e fatto ruotare nel tamburo rotante, ottenendo le informazioni desiderate osservando la granulometria del campione in questione.

2.3 L'agglomerato

L'agglomerato in un gran numero di paesi quali Corea, Giappone, Europa, Brasile è il materiale caricato in maggiore quantità in altoforno. Il processo di agglomerazione è utilizzato per fondere ed aggregare i fini dei materiali ferriferi. Dwight e Lloyd realizzarono, nel 1906, il primo impianto di agglomerazione continua. Una rappresentazione schematica è mostrata in figura 2.4.

Nella produzione di agglomerato vengono riutilizzati il polverino di altoforno della sacca a polvere, i fini di vagliatura di tutti i ferriferi, le scaglie di laminazione, etc. Attualmente le linee di agglomerazione di maggiore dimensione sono larghe 5 m ed hanno una lunghezza di 120 m , per un'area di effettiva agglomerazione pari a 400 m^2 . La produttività è tipicamente di $30-35\text{ t/m}^2/d$.

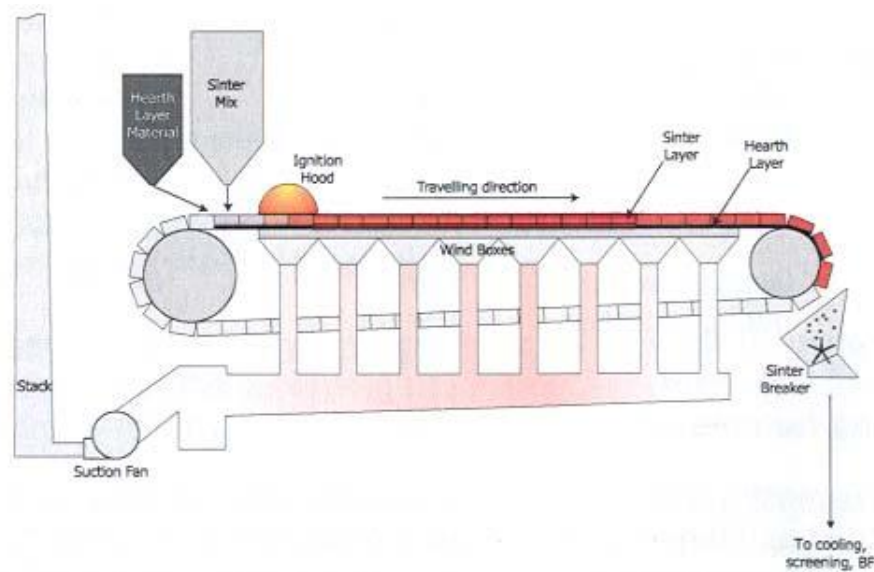


Figura 2.4: L'impianto di agglomerazione

Dopo l'arrivo dei minerali fini in stabilimento questi sono immagazzinati e miscelati in opportuni rapporti. La miscela può essere realizzata dosando i componenti su un nastro convogliatore a monte dell'impianto di agglomerazione, o alternativamente mediante il cosiddetto "cumolo": i componenti vengono depositati per strati orizzontali distinti (omogeneizzazione) per poi essere estratti verticalmente dando origine alla miscela desiderata.

Il mix di agglomerato contiene calce, minuti di ritorno e coketto; viene in seguito addizionata una piccola percentuale (5-7%) di acqua per promuovere un iniziale legame tra le particelle ferrose.

La miscela viene depositata in strati di 35–65 *mm* sul letto di agglomerazione. Il processo di agglomerazione ha inizio con l'accensione della parte superiore del letto; alcuni aspiratori risucchiano l'aria attraverso il letto ed i combustibili nel letto generano il calore necessario a fondere insieme le particelle ferrifere. In seguito l'agglomerato ottenuto è raccolto in un'apposita tramoggia, frantumato, raffreddato, vagliato nelle frazioni più appropriate e inviato alla stock house.

I principali fattori che influenzano la produttività, i costi e la regolarità di marcia di un impianto di agglomerazione sono:

- la scelta dell'appropriato mix. Molte aziende sviluppano un modello di bonus/malus che segue le percentuali dei componenti del mix (ad esempio il valore del contenuto in ferro è considerato un bonus mentre quello in fosforo un malus);
- la scelta della miscela comprende anche la distribuzione granulometrica dei materiali;
- la corretta composizione chimica. A basicità più alta corrisponde un aumento della produttività;
- l'impatto ambientale. Questo è di fondamentale importanza dal punto di vista dell'uso di materiali di riciclo ma anche dell'emissione di sostanze inquinanti in atmosfera.

L'agglomerato viene prodotto in tre qualità:

- agglomerato acido;
- agglomerato autofondente;
- agglomerato superfondente.

La qualità più utilizzata è l'autofondente.

2.4 I pellets

La produzione di pellets è, industrialmente, molto recente e deriva dalla necessità di riutilizzare le particelle ferrose molto fini provenienti dai processi di arricchimento dei minerali di ferro. La produzione di pellets avviene fondamentalmente in quattro passaggi:

1. formazione dei “green pellets”: viene realizzata una miscela di ferriferi molto fini, acqua e legante. Sulla superficie delle particelle ferrose è presente un piccolo strato di umidità che permette alle particelle stesse di formare dei “ponti” di interconnessione e rimanere coese. La miscela viene pre-pellettizzata a formare i green pellets in tamburi o dischi rotanti;
2. essiccamento: i green pellets opportunamente vagliati vengono caricati su una grata mobile e riscaldati fino a 300-350°C in modo da sostituire il legame di acqua con un legame di tipo chimico;
3. accensione: i pellets essiccati vengono ulteriormente riscaldati fino a 1250-1350°C così da far incollare tra di loro le particelle fini. Il calore necessario è fornito dai bruciatori;
4. raffreddamento: i pellets incandescenti vengono raffreddati in maniera opportuna così da prevenire la loro degradazione. Questo step del processo di produzione dei pellets è detto indurimento.

Per il trattamento termico dei pellets vi sono diversi tipi di impianto, tra i quali vanno citati l'impianto a letto mobile, forni a tino e forni a griglia. In figura 2.5 è rappresentato schematicamente un impianto di pellettizzazione:

I tre principale tipi di pellets prodotti sono:

- pellets acidi;
- pellets basici;
- pellets a base di olivina.

2.5 I minerali

I minerali sono materiali naturalmente ricchi di ossidi di ferro, utilizzati in altoforno direttamente così come arrivano dalle miniere. Le miniere in genere producono sia minerali che fini per agglomerato. Le più importanti miniere

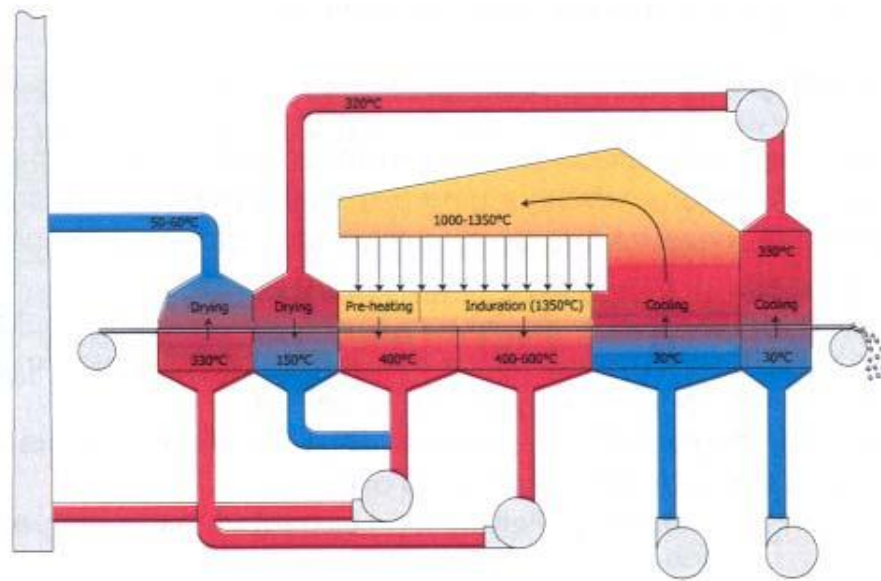


Figura 2.5: L'impianto di pellettizzazione

del globo sono localizzate in Australia (Hamersley e Mount Newman), in Sud America (Carajas e Robe River), e in Sud Africa (Sishen).

I minerali hanno un costo inferiore rispetto ai pellets e all'agglomerato ma proprietà metallurgiche inferiori. In generale rispetto ai pellets e all'agglomerato, i minerali:

- generano più fini durante il trasporto;
- hanno maggiore degradazione alla riduzione;
- presentano temperature di fusione inferiori.

Per altiforni ad elevata produttività ed alto tasso di iniezione di fossile, i minerali sono il peggior tipo di materiale di carica. Tuttavia dato che i minerali sono un materiale prettamente naturale, le proprietà variano da tipo a tipo; ne è un esempio l'altoforno di Siderar in Argentina che marcia con buoni risultati, ad alta produttività nonostante un elevato impiego di minerali (circa il 40%).

Capitolo 3

I combustibili per l'altoforno: coke, fossile e combustibili ausiliari

Ci sono soltanto due possibili conclusioni: se il risultato conferma le ipotesi, allora hai appena fatto una misura. Se il risultato è contrario alle ipotesi, allora hai fatto una scoperta.

ENRICO FERMI

3.1 Introduzione

L'altoforno è caricato con strati alterni di coke e ferriferi. All'interno dell'altoforno il coke forma uno scheletro attraverso il quale il gas si distribuisce e penetra negli strati di ferriferi. Dal XVIII secolo, il coke è la più importante fonte di carbonio per il processo di altoforno.

Dal 1960 viene utilizzata una quantità sempre crescente di combustibili ausiliari, come nafta, catrame, carbon fossile e gas naturale. I combustibili ausiliari vengono iniettati attraverso le tubiere. Inoltre per compensare la risultante diminuzione della temperatura di fiamma, spesso l'aria insufflata nell'altoforno viene arricchita di ossigeno.

Negli ultimi 50 anni, il consumo di coke nel processo di altoforno è notevolmente diminuito, grazie all'utilizzo dei combustibili ausiliari, al miglioramento della qualità della carica ferrifera, alle maggiori temperature del vento, all'aumento delle dimensioni degli altiforni ed al miglioramento del controllo sul processo (figura 3.1). Allo stato attuale il consumo di combustibile degli altiforni di grandi dimensioni è al di sotto dei 500 *kg* per tonnellata di ghisa.

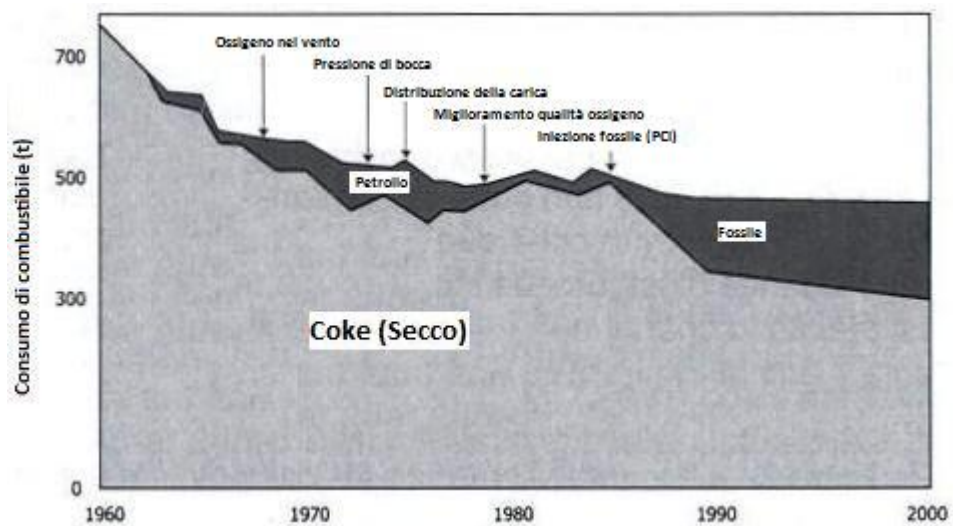


Figura 3.1: Diminuzione del consumo di combustibili (Scheidig et al, 2003).

3.2 Il Coke

Le principali funzioni del coke sono:

1. il coke bruciando genera monossido di carbonio (CO) fornendo il calore richiesto per la fusione della carica; il CO (generato dal coke) ed il

carbonio (del coke) vengono utilizzati per rimuovere l'ossigeno dalla carica ferriera;

2. il coke fornisce delle vie preferenziali mediante le quali il gas può fluire e diffondersi nella carica ferriera. Il coke rimane solido e permeabile fino a temperature molto alte (superiori a 2000°); è di grande importanza nel crogiolo, nella zona di rammollimento e di fusione; nella zona al di sotto della zona di fusione è l'unico materiale solido. Il peso dell'intero contenuto dell'altoforno si sostiene sullo scheletro di coke, pertanto il letto di coke deve essere permeabile in modo che la ghisa e la loppa possano drenare fino ai fori di colata;
3. il coke fornisce il carbonio utilizzato per la carbonizzazione della ghisa.

Il coke è prodotto da una miscela di fossile. Il fossile viene riscaldato in ambiente anaerobico, per diverse ore (dalle 16 alle 24 ore), ad elevate temperature (circa 1200°C). All'aumentare della temperatura si giunge alla carbonizzazione del fossile, ovvero l'espulsione della frazione volatile presente nel fossile e successiva formazione del cristallo solido di carbonio. Il coke incandescente subisce quindi il trattamento di quenching, ovvero viene raffreddato ad acqua.

Le proprietà fondamentali del coke sono elencate di seguito:

- composizione chimica: gli elementi che maggiormente influenzano l'uso di coke nell'altoforno sono il contenuto di ceneri e di umidità presenti nel coke stesso. Entrambi dovrebbero essere presenti in percentuale relativamente bassa. Il contenuto di ceneri è circa l'8-11%; la quantità di umidità è variabile ed è un'ovvia conseguenza del quenching. Hanno invece un'influenza minore elementi come zolfo e alcalini (Na e K);
- dimensioni e curva granulometrica;
- resistenza alla frammentazione dovuta al trasporto e a stress meccanici in genere: si utilizzano i parametri I40 ed M40;

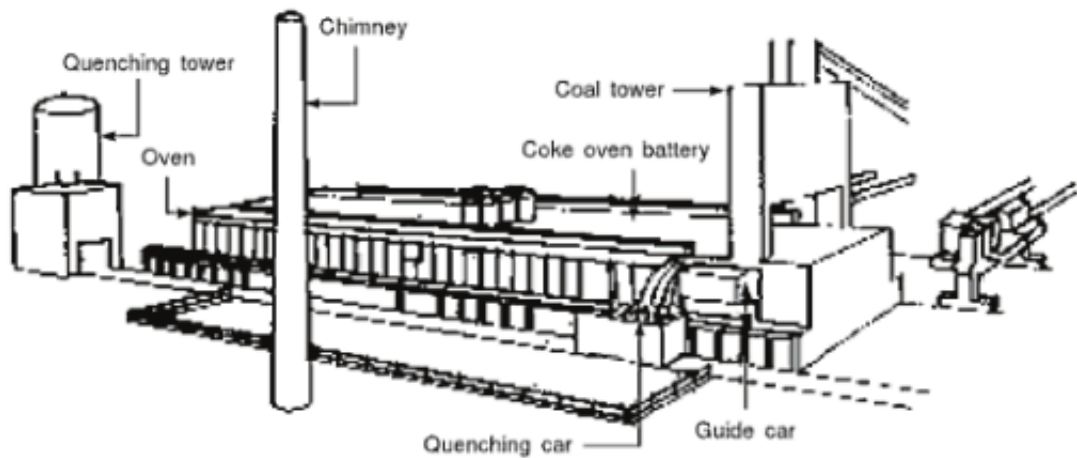


Figura 3.2: L'impianto di cokefazione

- reattività: il coke può reagire con la CO_2 , che attacca il cristallo di coke aumentandone il consumo medio;
- uniformità della qualità nel tempo: specialmente dimensioni e curva granulometrica poiché influenzano la permeabilità al flusso di gas.

La qualità del coke è influenzata principalmente dalla miscela di fossile utilizzata in partenza, dal tempo di cottura, dallo stato dell'impianto e dal quenching.

Il coke introdotto nell'altoforno, subisce un attacco chimico-meccanico durante la discesa dalla stock-line al crogiolo. La sua dimensione media diminuisce gradualmente durante la discesa come mostrato in un tipico esempio di degradazione del coke in figura 3.3.

3.3 Iniezione di carbon fossile ed altri combustibili ausiliari

La produzione di ghisa è la fase energeticamente più dispendiosa durante il processo di produzione dell'acciaio. Questo consumo di energia deve essere

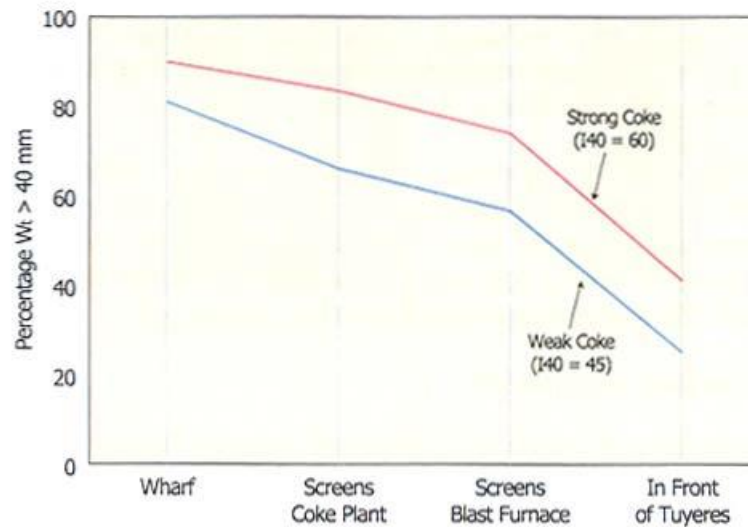


Figura 3.3: Degradazione del coke durante la discesa

collegato con i costi operativi di tutto l'impianto e le emissioni di gas serra in atmosfera.

Per questo motivo gli sforzi sono stati focalizzati preliminarmente sull'ottimizzazione del processo di produzione con conseguente diminuzione del consumo di combustibile in altoforno.

L'utilizzo di combustibili ausiliari, introdotti attraverso le tubiere, può diminuire il costo della ghisa. I combustibili ausiliari sono soprattutto fossile e gas naturale, ma possono essere utilizzati anche nafta, catrame ed altri materiali; il bilancio economico dipende molto dalle situazioni locali.

L'iniezione di fossile (ovvero PCI, Pulverized Coal Injection) ha trovato un'ampia applicazione. Fino ai primi anni '80 era più comune l'iniezione di nafta, ma l'aumento del costo del petrolio, dei suoi derivati e la variazione del prezzo del carbon fossile, ha spinto le industrie siderurgiche di tutto il mondo ad usare il PCI. Si noti che la preparazione del fossile implica un costo di investimento piuttosto alto, perciò è economicamente vantaggioso solo per stabilimenti con alte produzione di ghisa (maggiore di 4 milioni di tonnellate l'anno).

I principali vantaggi dell'utilizzo del carbon fossile in altoforno sono:

1. diminuzione del consumo di coke: il costo del coke è notevolmente più alto di quello del carbon fossile; inoltre l'impiego di un iniettante permette di predisporre una marcia dell'altoforno a temperatura maggiore del vento, il che porta ad un'ulteriore diminuzione nei consumi di coke;
2. aumento della produttività;

L'iniezione di fossile fu applicata nell'altoforno Amanda di ARMCO (in Ashland, Kentucky) negli anni '60. Inizialmente i livelli di iniezione di carbon fossile erano assestati su $60 - 100 \text{ kg/tHM}$. Attualmente, lo standard industriale ha portato ad un consumo di coke di 300 kg/tHM , con livelli di iniezione di 200 kg/tHM di fossile.

L'impianto di base per l'iniezione del fossile richiede i seguenti sottosistemi:

- mulini per la macinazione del carbone: il carbone deve essere macinato in particelle molto piccole; anche se è possibile utilizzare grani di dimensioni fino a $1 - 2 \text{ mm}$, in genere il fossile viene polverizzato finché il 60% risulta di dimensioni inferiori ai $75 \mu\text{m}$;
- apparecchiature per l'essiccamento del carbon fossile: il carbon fossile contiene considerevoli quantità di umidità (dal 8% a più del 10%); poiché l'iniezione di particelle umide aumenta il consumo di combustibile, è necessario rimuovere l'umidità quanto più è possibile;
- apparecchiature di trasporto del carbon fossile: se il fossile è troppo piccolo, il trasporto pneumatico diviene problematico; può determinare la formazione di incrostazioni sulle pareti dei tubi e persino portare al loro danneggiamento, con perdita di fossile dalle condotte;
- apparecchiature per l'iniezione in altoforno: il fossile deve essere uniformemente iniettato in tutte le tubiere; la simmetria circonferenziale dell'iniezione dovrebbe essere sempre garantita soprattutto se il consumo di coke è basso e la produttività è alta.

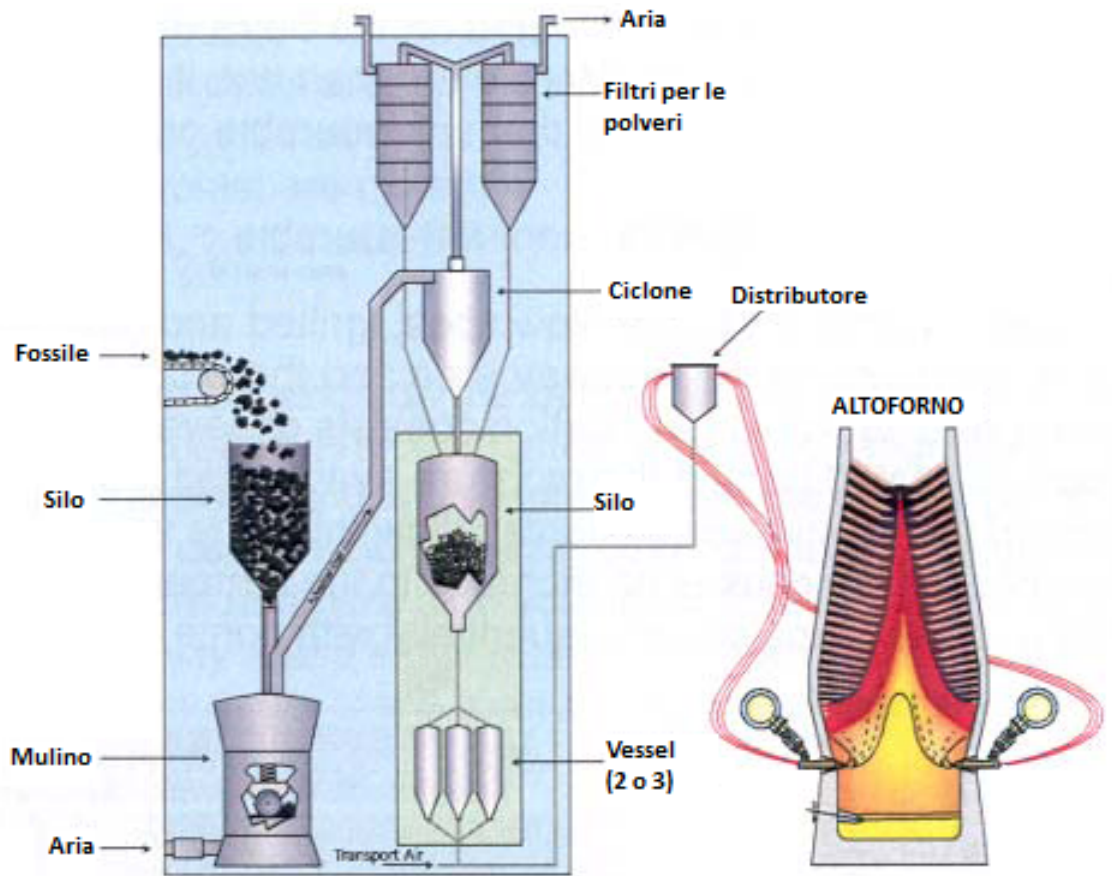


Figura 3.4: Esempio di impianto di PCI.

I tipi di fossile si distinguono in base alle materie volatili. I fossili a bassa volatilità hanno una percentuale di materie volatili pari al 6-12%, quelli ad alta volatilità pari al 30% ed oltre. Le più importanti caratteristiche dei fossili sono:

- alto rapporto di sostituzione rispetto al coke; la composizione ed il contenuto di umidità dei fossili determinano la quantità di coke rimpiazzabile da una certa quantità di fossile; una semplice formula per il rapporto di sostituzione (riferito a coke con 87.5% di carbonio) è

(Toxopeus et al., 1991):

$$RR = 2 \times \%C_{\text{coal}} + 2.5 \times \%H_{\text{coal}} - 2 \times \%U_{\text{coal}} - 86 + 0.9 \times \%CEN_{\text{coal}}$$

- **composizione:** livelli elevati di zolfo e fosforo possono aumentare i costi aggiuntivi in acciaieria;
- **durezza:** la durezza del fossile, misurata dall'indice di macinabilità di Hardgrove, deve corrispondere alle specifiche dei mulini;
- **contenuto di umidità:** si deve considerare sia il contenuto di umidità del fossile grezzo, sia il contenuto di umidità massimo che esso può assorbire, per prevenire l'umidificazione della superficie dei cumuli di fossile stoccati.

I fossili vengono iniettati mediante le lance inserite nelle tubiere che a loro volta sono inserite nei portavento ed infine nella sacca dell'altoforno. Il fossile durante la combustione rimane per un brevissimo tempo (5 millisecondi) nella raceway. La gasificazione del fossile procede mediante diversi passaggi (Figura 3.5). Durante la prima fase, il fossile si riscalda e l'umidità evapora. Successivamente il riscaldamento del fossile causa la gasificazione dei componenti volatili. Questi vengono infiammati e bruciati, il che causa un innalzamento della temperatura. Alla fine del processo avviene la combustione del carbone. Tutti questi passaggi avvengono in maniera sequenziale con qualche sovrapposizione.

Si devono infine citare, quali combustibili ausiliari, il petrolio, il gas naturale e il catrame. Un confronto delle composizioni chimiche tipiche e gli effetti sulla temperatura di fiamma è riportato nella tabella 3.1.



Figura 3.5: Gasificazione del fossile.

Tabella 3.1: Dati tipici per combustibili iniettabili.

*Confrontato con coke con 87.5%C

**Iniettando 10kg/tHM aggiuntivi

Combustibili	Rapporto di sostituzione*	C	H	Umidit	Effetto sulla T di fiamma**
	[-]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Carbone	0.80	80	6	2	-32
Petrolio	1.16	87	11	2	-37
Gas Naturale	1.05	57	19	-	-45
Catrame	1.2	87	6	2	-25

Capitolo 4

Reazioni caratteristiche e produttività dell'altoforno

La disumanità del computer sta nel fatto che, una volta programmato e messo in funzione, si comporta in maniera perfettamente onesta.

ISAAC ASIMOV

4.1 Introduzione

La produzione di un altoforno è, in condizioni di marcia regolari, direttamente correlata con la quantità di coke bruciato di fronte alle tubiere e la quantità di fossile iniettato.

La produttività di un altoforno aumenta al diminuire del consumo specifico di combustibile.

4.2 La raceway

4.2.1 Velocità di produzione

Nella raceway si forma gas caldo, che fonde i ferriferi ed innesca le reazioni chimiche di riduzione del minerale di ferro. Dato un certo consumo di coke e fossile per tonnellata di ghisa, la produzione di un altoforno è determinata dalla quantità di ossigeno insufflata attraverso le tubiere.

Più ossigeno viene immesso nell'altoforno, maggiore è la quantità di coke e fossile bruciata (produzione di monossido di carbonio CO) e maggiore è la produzione; il coke ed il fossile non sono solo bruciati davanti alle tubiere, ma vengono utilizzati anche per la carbonizzazione del ferro (la ghisa contiene circa il 4.5% di carbonio) e per le reazioni di riduzione diretta. Il consumo di un altoforno è espresso come coke (con contenuto di carbonio pari al 87.5%) più fossile.

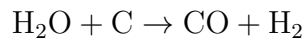
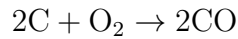
In altoforno a parità di ossigeno, quindi con stesso volume e condizioni di vento, se il combustibile utilizzato diminuisce la produttività aumenterà: per esempio se sono impiegati 10 kg/tHM di coke in meno, la produzione aumenterà in media del 3%. Al contrario, se si carica coke extra, per esempio perché l'altoforno si è raffreddato, a parità di condizioni di vento, la produzione naturalmente diminuirà.

4.2.2 Condizioni della raceway e temperatura di fiamma

Condizione del gas di sacca

Nella raceway il calore del vento e quello generato dalla combustione del coke (e del fossile o di altro combustibile ausiliario) sono usati per fondere la carica ferrifera. Il calore disponibile per fondere la carica dipende dalla massa di gas prodotta e dalla temperatura di fiamma, ovvero la "temperatura adiabatica di fiamma della raceway" (RAFT).

La quantità e la composizione del gas nella raceway possono essere calcolate considerando le seguenti reazioni:



All'interno e nelle immediate vicinanze della raceway, tutto l'ossigeno viene convertito in monossido di carbonio e tutta l'acqua in idrogeno e monossido di carbonio.

Per esempio, supponiamo che un altoforno abbia un volume di vento pari a $6500 \text{ Nm}^3/\text{min}$ con ossigeno totale pari al 25.6%. Trascurando gli effetti dell'umidità del vento e del fossile, il volume nella raceway è:

$$\text{Azoto} \quad (1 - 0.256) \times 6500 = 4836 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

$$\text{Ossigeno} \quad 0.256 \times 6500 = 1664 \text{ Nm}^3/\text{min}$$

L'ossigeno genera due molecole di CO, quindi il volume di gas è $4836 + 2 \times 1664 = 8164 \text{ Nm}^3/\text{min}$. La composizione risultante è: azoto $4836/8164 = 59\%$, monossido di carbonio 41% . Il calcolo può essere esteso includendo l'umidità nel vento e l'iniezione di fossile o altri combustibili ausiliari.

Temperatura di fiamma della raceway

La temperatura di fiamma della raceway è la temperatura che il gas raggiunge quando tutto l'ossigeno e l'acqua sono stati convertiti in CO ed idrogeno. La temperatura di fiamma è un concetto teorico, dato che non tutte le reazioni si completano nella raceway.

Da un punto di vista teorico, dovrebbe essere calcolata dal bilancio termico sulla raceway ma per l'utilizzo pratico si sono trovate delle relazioni lineari. La temperatura di fiamma è generalmente compresa tra i 2000°C e i 2300°C , ed è influenzata dalle condizioni di iniezioni ed insufflaggio.

In particolare, la temperatura di fiamma aumenta se:

1. la temperatura del vento aumenta;

2. la percentuale di ossigeno nel vento aumenta;

e diminuisce se:

1. l'umidità nel vento aumenta;
2. il tasso di iniezione del fossile aumenta, dato che vengono bruciati combustibili "freddi" anzichè coke caldo; l'effetto preciso dipende anche dalla composizione del combustibile ausiliario.

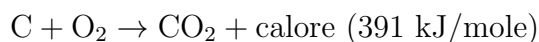
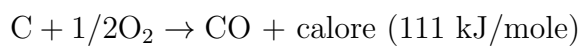
La tabella 4.1 fornisce qualche regola empirica per la gestione della temperatura di fiamma.

Tabella 4.1: Effetti sulla temperatura di fiamma

	Unità di misura	Cambiamento	Temperatura di fiamma (°C)
Temperatura del vento	°C	+100	+100
PCI	kg/t	+10	-30
Ossigeno	%	+1	+45
Umidità	gr/Nm ³	+10	-50

4.3 Carbonio ed ossidi di ferro

Il carbonio può dare luogo a due tipi di ossidi:



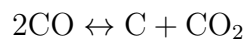
Solo la prima reazione ha luogo nella raceway. Da notare che la seconda reazione genera molto più calore, quindi conviene convertire quanto più

possibile il CO in CO₂. Il rapporto

$$\eta_{\text{CO}} = \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2}$$

detto "rendimento del gas" è un parametro molto usato nel controllo del processo d'altoforno.

Nella figura 4.1 è mostrato, a varie temperature, l'equilibrio della reazione



detta anche "reazione di Boudouard".

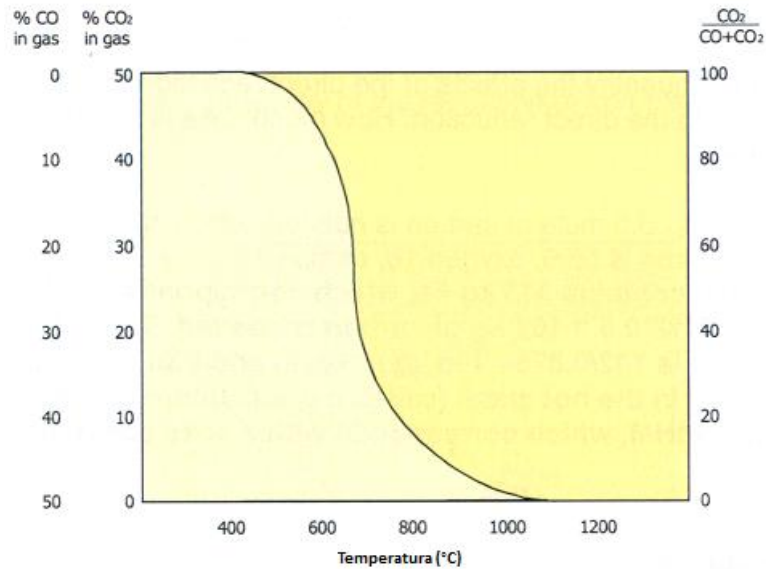


Figura 4.1: Reazione di Boudouard: la curva rappresenta l'equilibrio.

A temperature superiori ai 1100°C, tutta la CO₂ viene convertita in monossido di carbonio (CO). Di conseguenza, alle alte temperature (sacca e zona di fusione dell'altoforno) solo il CO è stabile.

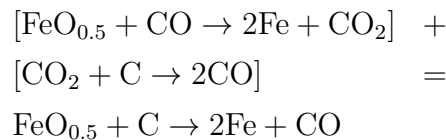
A temperature inferiori a 500°C, tutto il CO tende a decomporsi in C e CO₂. Il carbonio formatosi in questo modo è molto fine ed è noto come "carbone di Boudouard".

Nella normale pratica, la decomposizione del monossido di carbonio può essere osservata nel materiale refrattario, dove esiste un'atmosfera contenente CO alla corretta temperatura.

4.3.1 Riduzione diretta

Mentre i gas riducenti caldi prodotti nella raceway salgono attraverso la parte bassa dell'altoforno, cedono calore alla carica ferrifera arrivando a fonderla nella parte inferiore della zona di fusione.

Tali gas rimuovono anche l'ossigeno dagli ossidi di ferro che contengono approssimativamente un atomo di ossigeno ogni due di ferro. Il CO₂ prodotto dalla reazione è direttamente trasformato in CO con il carbonio del coke. La reazione totale è conosciuta come "riduzione diretta", dato che l'ossigeno viene direttamente rimosso dagli ossidi da parte del carbonio del coke :



La reazione di riduzione diretta richiede un'enorme quantità di calore, che viene fornito dal gas della raceway a spese del suo contenuto energetico.

La reazione diretta di riduzione generalmente rimuove all'incirca un terzo dell'ossigeno della carica, mentre l'altro meccanismo (riduzione gassosa, o indiretta) ne rimuove i restanti due terzi.

La quantità residua di ossigeno da rimuovere alle alte temperature, cioè nel momento in cui la carica inizia a fondere, dipende molto dall'efficienza del processo di riduzione nel tino.

Quindi osserviamo che la riduzione diretta:

1. consuma carbonio (coke) e genera gas CO extra;
2. costa molta energia.

Nella normale pratica, la riduzione diretta può essere tenuta sotto controllo. In molti altiforni, la percentuale di riduzione diretta (percentuale di ossi-

geno rimossa dalla carica per riduzione diretta) o la “solution loss” (quantità di coke utilizzata per la riduzione diretta) vengono calcolati online.

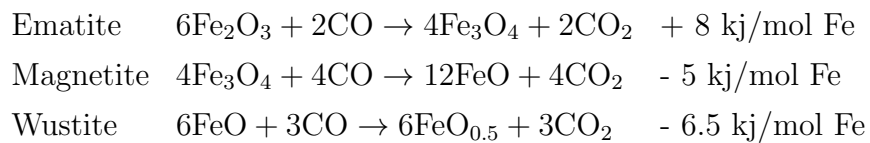
È noto che quando la riduzione diretta o la solution loss aumentano, l’altoforno si raffredda più velocemente (a causa alla maggiore quantità di coke utilizzata). Quando previsto, il raffreddamento può essere prevenuto per esempio aumentando il combustibile ausiliario.

Supponendo un rapporto di O/Fe pari a 0.5 prima della riduzione, calcoliamo quanto coke è necessario per la reazione diretta.

Per 1 kmole di $\text{FeO}_{0.5}$, sono necessari 0.5 kmoli di C, ovvero 6 kg di carbonio (peso atomico Fe = 55.6, O = 16, C = 12). Una tonnellata di ghisa contiene 945 kg di Fe, che corrispondono a $945/55.6 = 17$ kmoli; quindi per ogni tonnellata di ghisa sono necessari $17 \times 12 \times 0.5 = 102$ kg di carbonio. Se il coke contiene l’87.5% di carbonio, allora il coke di solution loss è $102/0.875 = 116$ kg. Oltre alla solution loss, il coke viene anche disciolto nel ferro liquido. La ghisa contiene circa il 4.5% di C, cioè 45 kg/tHM, che corrispondono ad un consumo di coke di $45/0.875 = 51$ kg/tHM.

4.3.2 Riduzione indiretta

Quando la temperatura del gas diventa più bassa, la CO_2 diventa stabile e possono avvenire le reazioni di riduzione:



La riduzione è anche detta “riduzione gassosa” perché l’ossigeno viene rimosso dalla carica mediante il gas CO. La riduzione del $\text{FeO}_{0.5}$ avviene per riduzione diretta, come detto in precedenza.

Seguendo la discesa della carica dalla stock line, la riduzione da ematite a magnetite inizia a circa 500°C. La riduzione da magnetite a wustite avviene nella zona tra i 600 ed i 900°C, mentre la riduzione da wustite a ferro avviene

tra i 900 e 1100°C. All'inizio della zona di fusione (1100°C-1150°C), si arriva in genere con il $\text{FeO}_{0.5}$. Per la wustite è stata riportata l'espressione FeO anche se in realtà la sua forma più stabile è $\text{FeO}_{0.95}$.

Le reazioni sono mostrate in figura 4.2.

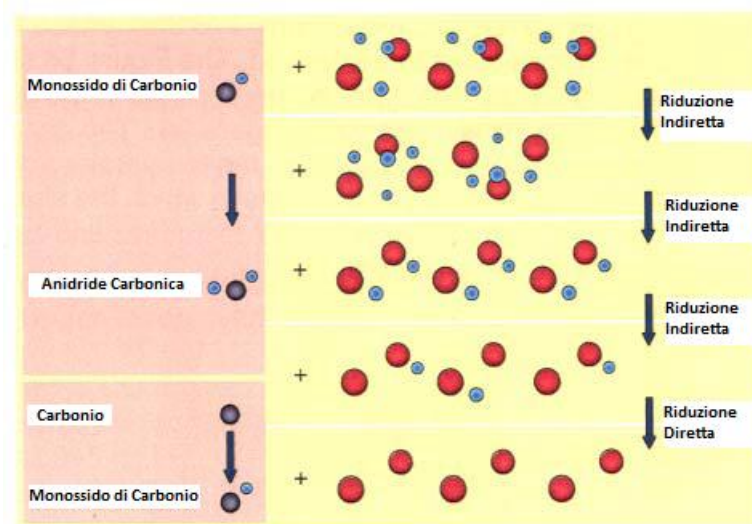


Figura 4.2: Sommario della riduzione degli ossidi di ferro.

L'equilibrio tra i vari ossidi di ferro ed il gas è mostrato in figura 4.3. La figura mostra a quale livello di temperatura e composizione del gas non può avvenire un'ulteriore riduzione gassosa della carica.

La riduzione della wustite a ferro richiede la più alta concentrazione di CO, come si vede in figura 4.3. L'utilizzazione del gas deve essere inferiore al 30%. Se la CO_2 è più alta, la wustite non viene più ridotta. La riduzione da wustite a ferro arriva vicino all'equilibrio.

L'avanzamento della riduzione in un altoforno può essere osservato in due modi diversi:

- Carica: attraverso l'analisi di altiforni congelati, come mostrato in figura 4.4;

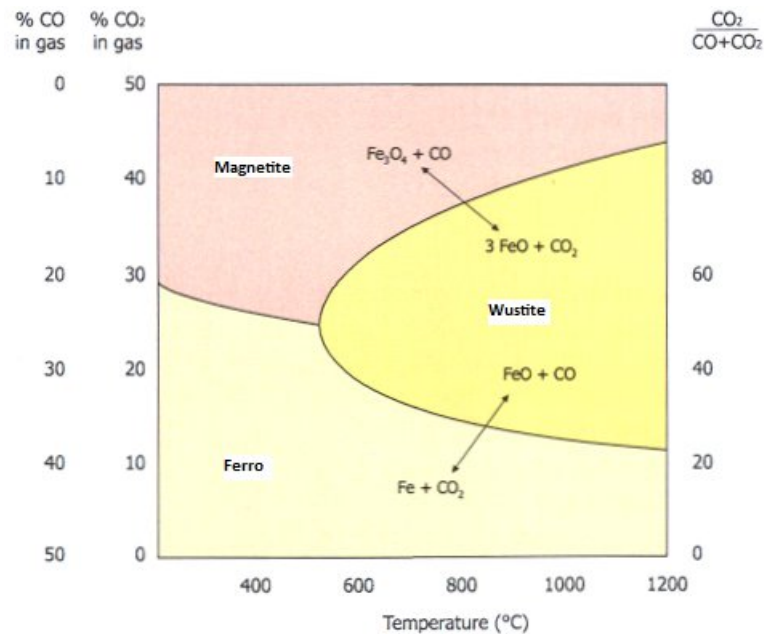


Figura 4.3: Schema della relazione tra temperatura, composizione del gas ed ossidi di ferro (la linea indica l'equilibrio)

- Gas: attraverso sonde di prelievo gas in diversi punti dell'altoforno; la figura 4.5 mostra un tipico esempio di analisi del gas; i dati possono essere rappresentati nei grafici di equilibrio tra gas ed ossidi di ferro; il gas normalmente mostra una "zona di riserva termica", cioè una zona nella quale la temperatura non cambia rapidamente, ed una "zona di riserva chimica", cioè una zona nella quale la composizione chimica non cambia; la zona di riserva termica diminuisce e può scomparire quando l'altoforno è spinto ad alte produttività.

4.4 Profilo di temperatura

Il profilo di temperatura e le reazioni chimiche nell'altoforno sono strettamente correlati così come visibile nella figura 4.6. La riduzione degli ossidi di ferro a wustite ha luogo a temperature di 800-900°C. Di conseguenza, nel-

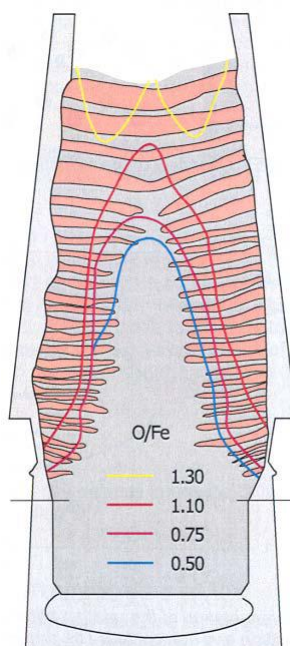


Figura 4.4: Riduzione in un altoforno congelato.

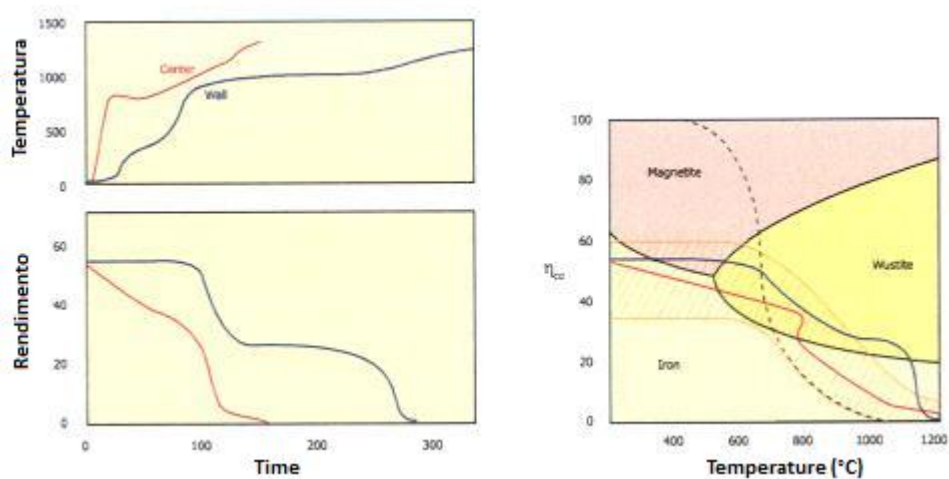


Figura 4.5: Composizione del gas e temperature in altiforni in marcia

l'intervallo di temperature tra 900°C e 1100°C, la wustite può essere ridotta ulteriormente, per via indiretta, senza interferenza da parte della reazione di

Boudouard.

Questa zona di “preparazione chimica” può estendersi fino al 50-60% dell’altezza dell’altoforno, ed ha una temperatura relativamente costante. È infatti detta “zona di riserva termica”.

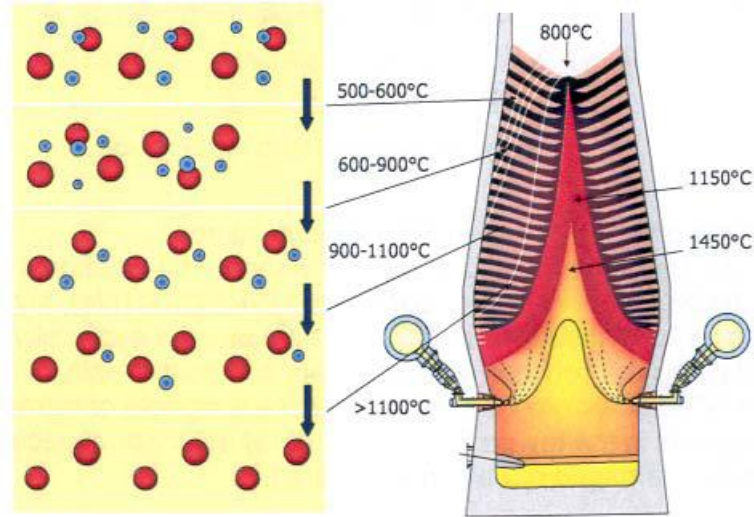


Figura 4.6: Reazioni di riduzione e temperatura della carica.

4.5 Simmetria circonferenziale e riduzione diretta

Il raggiungimento di elevate prestazioni in altoforno necessita che tutta la sua circonferenza partecipi in maniera uguale al processo.

Se tutti i settori non partecipano in maniera uguale al processo, si formerà una asimmetria nella zona di fusione, come mostrato nella figura 4.7. La mancanza locale di calore porterà all’abbassamento della zona di fusione in certi settori ed al suo innalzamento in altri settori. Solo l’aumento del livello termico generale dell’altoforno, influenzando la sua efficienza, può controbilanciare questo fenomeno.

L’asimmetria nel processo è generalmente dovuta ai seguenti fattori:

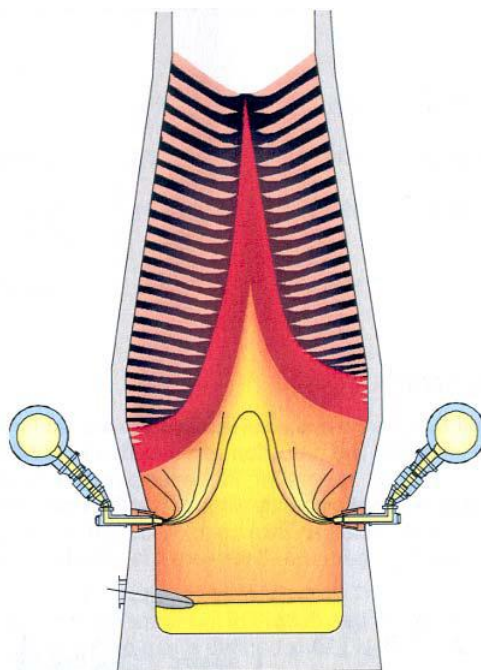


Figura 4.7: Zona di fusione asimmetrica

1. tubiere senza iniezione fossile;
2. cattiva distribuzione del vento: se la velocità del vento risulta essere troppo bassa (< 100 m/s), le tubiere non distribuiscono il vento come dovrebbero. La cattiva distribuzione del vento può anche essere dovuta a tubiere parzialmente (depositi di loppa) o completamente tappate (al di sopra dei fori di colata o di hot spot nel refrattario del crogiolo), da usura localizzata nel refrattario dell'altoforno, da danneggiamento o sparizione delle piastre di usura alla bocca;
3. asimmetria nel caricamento: con la bocca Paul Wurth questo può essere prevenuto sia alternando i sili di coke e ferriferi, sia cambiando il verso della rotazione dello scivolo; con un sistema a campana è possibile alternare l'ultimo skip nella semi-carica;

4. inclinazione dell'altoforno rispetto alla sua verticale, specialmente negli altiforni più datati.

Esistono metodi per correggere le asimmetrie del processo, per esempio togliere l'iniezione del fossile ad opportune tubiere. Tuttavia, è preferibile eliminare le cause di asimmetria piuttosto che correggerle.

Capitolo 5

Il sistema di caricamento dell'altoforno

Come il ferro in disuso arrugginisce, così l'inazione sciupa l'intelletto.

LEONARDO DA VINCI

5.1 Introduzione

Al fine di migliorare il processo di altoforno ed aumentare la produttività, a cavallo del XX secolo, si introdussero molteplici modifiche. Tra queste hanno sicuramente avuto una notevole importanza gli sviluppi e l'automazione dei sistemi di caricamento della carica ferrifera e di coke. In particolare al fine di riutilizzare il gas di processo come combustibile sia nelle torri di Cowper che in centrale termica per la generazione di energia, oltre a specifici filtri per il lavaggio del gas stesso, era necessario adottare un sistema di caricamento che limitasse le perdite di gas.

5.2 “Two-bell” charging system

L’evoluzione della tecnologia in questa direzione, ha portato all’invenzione di vari impianti, il primo dei quali è il sistema di caricamento a doppia campana (two-bell charging system), che ha stabilito lo standard per tutti gli altiforni fino al 1970, ed è ormai operativo solo su un numero limitato di forni (figura 5.1).

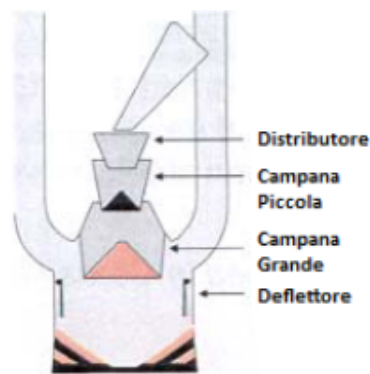


Figura 5.1: Sistema di caricamento a doppia campana

Come ben si nota, il gas attraversa le prese superiori continuamente, mentre i cicli di carica vanno avanti ininterrottamente. Le cariche di materiale non sono uniformi, il coke è più leggero (3.5-4 volte) del minerale di ferro mentre le cariche di sinter e pellets hanno densità e dimensione variabile. La distribuzione non uniforme delle cariche è causa di variazioni del profilo di temperatura, della velocità del gas, della composizione del gas stesso e quindi incide sulla produttività dell’altoforno.

Il principio di funzionamento prevede l’apertura in maniera alternata delle due campane (small and large bell), così da evitare considerevoli perdite di gas. In particolare si possono distinguere quattro fasi principali:

1. la small bell (superiore) e la large bell (inferiore) sono chiuse; una tramoggia rotante carica la campana superiore mentre il gas di processo fluisce attraverso le prese superiori in maniera continua;

2. viene aperta solo la small bell così da riempire la large bell;
3. viene aperta la large bell per caricare l’altoforno mentre la small bell viene chiusa per evitare trafile di gas in atmosfera;
4. terminato il caricamento dell’altoforno vengono chiuse entrambe le campane per riprendere il ciclo di caricamento.

In generale si può affermare che le particelle fini offrono maggiore resistenza al passaggio del gas riducente, da ciò, allo scopo di migliorare la produttività, nel tempo sono stati introdotti vari accorgimenti:

1. vagliatura delle cariche solide prima dell’immissione in altoforno per eliminare i fini al di sotto di una certa dimensione;
2. agglomerazione di fini per sinterizzazione o pellettizzazione;
3. dispositivo di caricamento appropriato per operare una distribuzione delle dimensioni della carica, che sia più uniforme possibile lungo le sezioni orizzontali.

Proprio a riguardo dell’ultimo punto, una soluzione è costituita da uno scivolo rotante, sul quale cade il materiale proveniente dal dispositivo di caricamento, e ruotando e variando l’angolo di inclinazione, distribuisce il materiale sulla campana piccola, ottenendo una distribuzione più uniforme. La figura 5.2 mostra due tipi di profili di stock-line ottenuti con tale dispositivo. Si nota una certa segregazione tra particelle piccole e grandi, e ciò è dovuto alle loro traiettorie differenti, che assumono durante la caduta nella bocca del forno, al momento dell’apertura della campana grande.

5.2.1 Ulteriori innovazioni

Al fine di migliorare ulteriormente l’uniformità della distribuzione durante la carica, si introdussero successivamente altre modifiche a cui fece seguito l’utilizzo del dispositivo a campana con armatura mobile e del dispositivo a

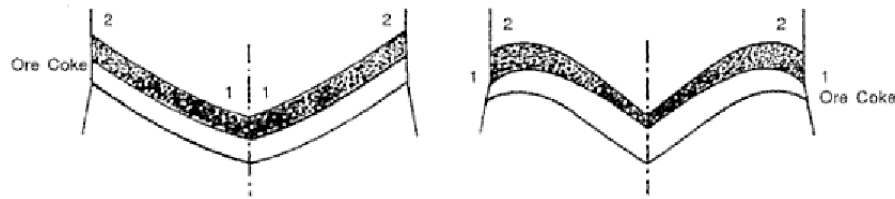


Figura 5.2: Profili tipici della stock-line

quattro campane. In particolare nel dispositivo ad armatura mobile si utilizza un deflettore mobile in seguito alla large bell che permette un controllo su una sezione maggiore della stockline; inoltre l'utilizzo di deflettori differenti per la carica ferrifera e di coke ha migliorato ulteriormente l'uniformità della carica. Tuttavia nonostante i sistemi di caricamento a doppia campana siano dotati di armatura mobile presentano una flessibilità limitata nel variare le traiettorie di caduta del materiale e quindi nel controllo della stock-line stessa.

5.3 “Bell-less top” charging system

Il sistema di caricamento più efficiente e tuttora utilizzato nella maggior parte degli altiforni è il Bell-less top charging system, mostrato in figura 5.3, ovvero senza campane, inventato e introdotto sul mercato in Lussemburgo da Paul Wurth nel 1972.

Tale sistema, comprende la combinazione di due sili di stoccaggio, detti *hopper* (una per la carica ferrifera, e l'altra per il coke), di un “cancello” per il passaggio del materiale e di uno scivolo detto *tilting rocker*.

Il principio di funzionamento prevede l'arrivo della carica, prima ferrifera e poi coke, dalle stock house tramite classici nastri trasportatori; il materiale viene quindi scaricato in un primo silo intermedio, di forma trapezoidale, ove lo stesso materiale si accumula secondo l'angolo di natural declivio, pari all'incirca a 45° . L'accumulo di materiale, detto *ston-box* (figura 5.4), evita un impatto diretto tra la parete della tramoggia trapezoidale e il flusso di materiale, così da preservare la stessa tramoggia da rapida usura e conferire

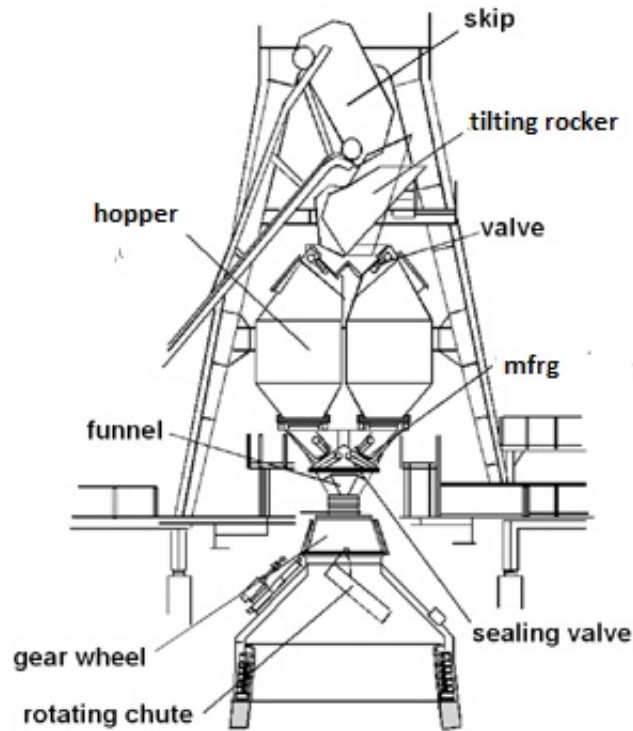


Figura 5.3: Schema del sistema di caricamento Paul Wurth.

al flusso una traiettoria ed una velocità adeguata nella caduta verso il tilting rocker.

Tra la tramoggia trapezoidale e il tilting rocker è interposta, perpendicolarmente alla direzione del flusso di materiale, una semplice piastra rivestita da materiale ceramico, detta *deflettore ceramico*. Il deflettore ha una duplice funzione:

1. garantire la gittata ideale al flusso; è necessario che il deflettore guidi il flusso lungo la concavità del tilting rocker in modo da assicurare un tempestivo e regolare caricamento delle hopper;
2. evitare l'usura del sistema di caricamento a causa dell'impatto diretto del flusso di materiale; il deflettore ceramico ha una vita utile media pari ad un mese.

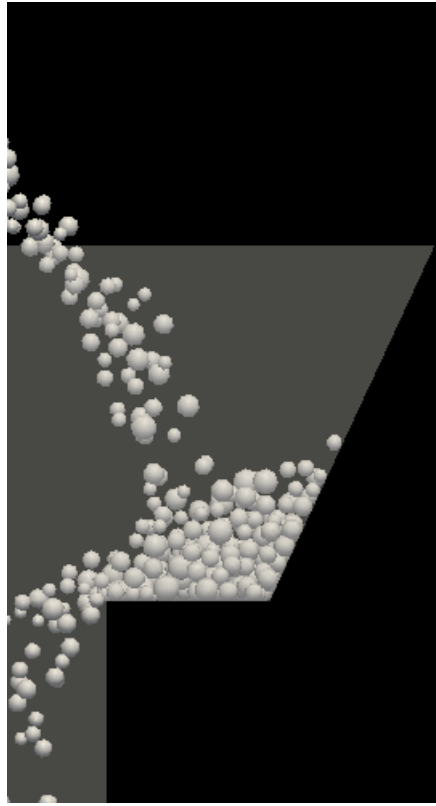


Figura 5.4: Profilo della ston-box

Successivamente il materiale è fornito al tilting rocker, il quale permette il riempimento di una o dell'altra hopper. Vi è un sistema di movimentazione dedicato, che conferisce al tilting un angolo di basculamento compreso tra i 41° e i 50° . Anche il tilting rocker presenta un rivestimento interno in materiale ceramico per evitare un'elevata usura a causa dell'impatto di materiale. In generale il tilting rocker, dal punto di vista geometrico, è caratterizzato da una lunghezza ed un diametro medio pari rispettivamente a 2500 mm e 1000 mm .

Il tilting rocker scarica quindi il materiale nell'hopper opportuna, che verrà successivamente aperta tramite la valvola di scarico (*MFRG*) posta sul fondo, permettendo la carica dell'altoforno. Le hopper sono di fatto delle grandi tramogge, assimilabili a cilindri di diametro medio pari a 4 m .

All’apertura del fondo delle hopper, il materiale viene scaricato su uno scivolo rotante e a pendenza variabile, noto come *rotating distributing chute*, che attraverso un sistema di valvole di sigillatura e di cancelli permette il controllo del flusso e garantisce una distribuzione ottimale ed uniforme.

Tutti i componenti dell’apparato di caricamento in questione sono totalmente automatizzati e controllati in remoto tramite opportuni software.

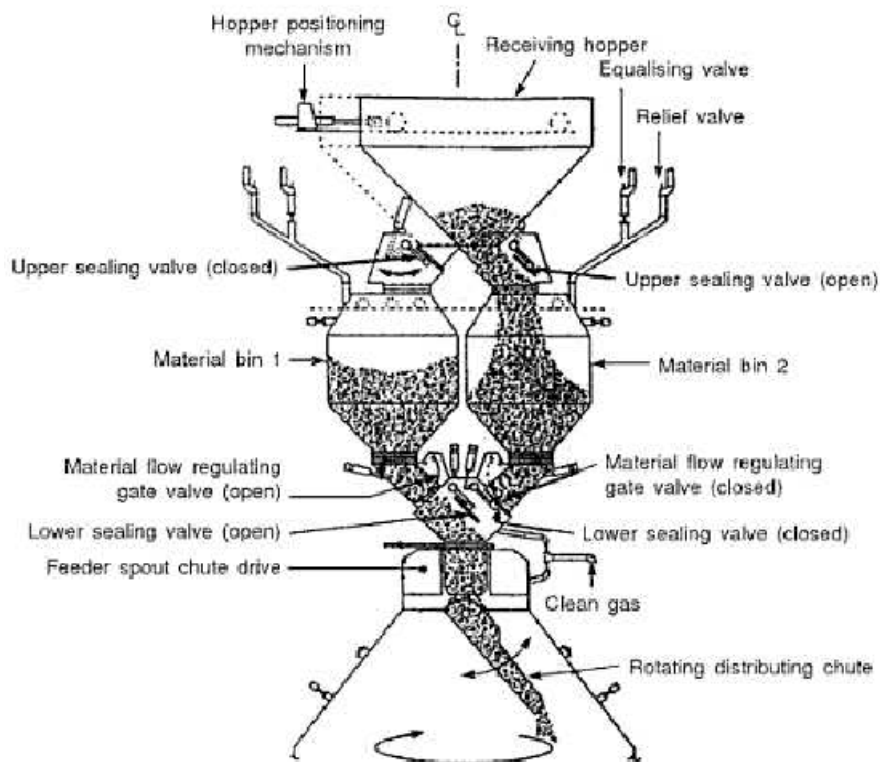


Figura 5.5: Sistema di caricamento Paul Wurth

L’elevato impiego del BLT è giustificato dalle elevate pressioni alla bocca del forno; in tutti gli impianti moderni infatti all’uscita del forno si registra un valore che si attesta tra le 1.5 e le 2 atm. Questo porta a trafiletti di gas più accentuati, così come ad una rapida erosione delle campane; il tipo senza campana, si comporta molto meglio, e il controllo della distribuzione della carica è nettamente superiore.

In particolar modo nello stabilimento ILVA di Taranto i quattro altiforni sono equipaggiati con il sistema di caricamento in questione e godono di elevata produttività ed efficienza nelle fasi di caricamento; tuttavia solo l’altoforno n.2 e n.4 sono dotati del tilting rocker.

In aggiunta alle modifiche introdotte sull’apparato di caricamento, è stato di gran lunga migliorato anche l’intero sistema di monitoraggio durante la carica. Le principali grandezze di processo monitorate sono la temperatura lungo più sezioni del forno, la pressione e la distribuzione della carica (tramite innovativi modelli matematici).

I principale vantaggi riscontrati sono elencati di seguito:

- incremento della produttività, minor consumo di coke, maggior vita utile del forno;
- riduzione dell’usura del refrattario;
- maggior efficienza del gas di riduzione;
- migliore qualità metallurgica della ghisa;
- minor emissioni di polveri;
- riduzione di perdite nelle tubiere.

5.3.1 Assieme del sistema di caricamento BLT

Al fine di comprendere a fondo il funzionamento del sistema di caricamento BLT, dopo aver preso visione dei disegni originali Paul Wurth, si è realizzato l’intero assieme con l’ausilio di un sistema cad, in particolare CATIA V5.

Si riportano in seguito alcuni screenshot che permettono di apprezzare l’intero apparato di caricamento in 3D.

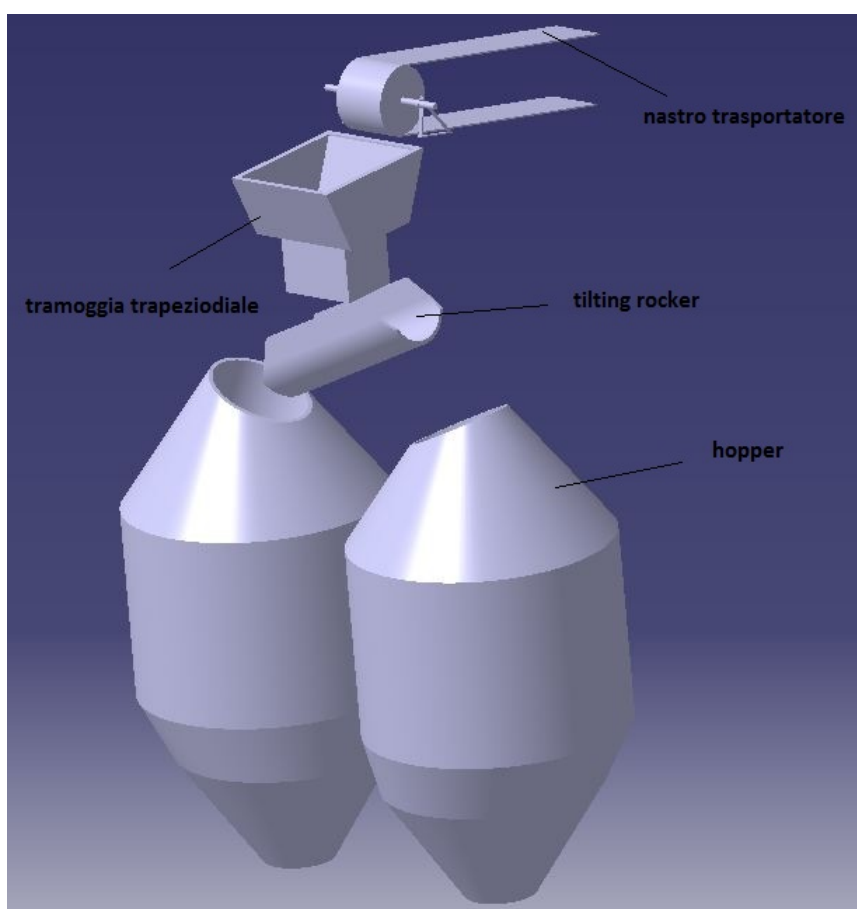


Figura 5.6: Assieme sistema caricamento Paul Wurth vista 1

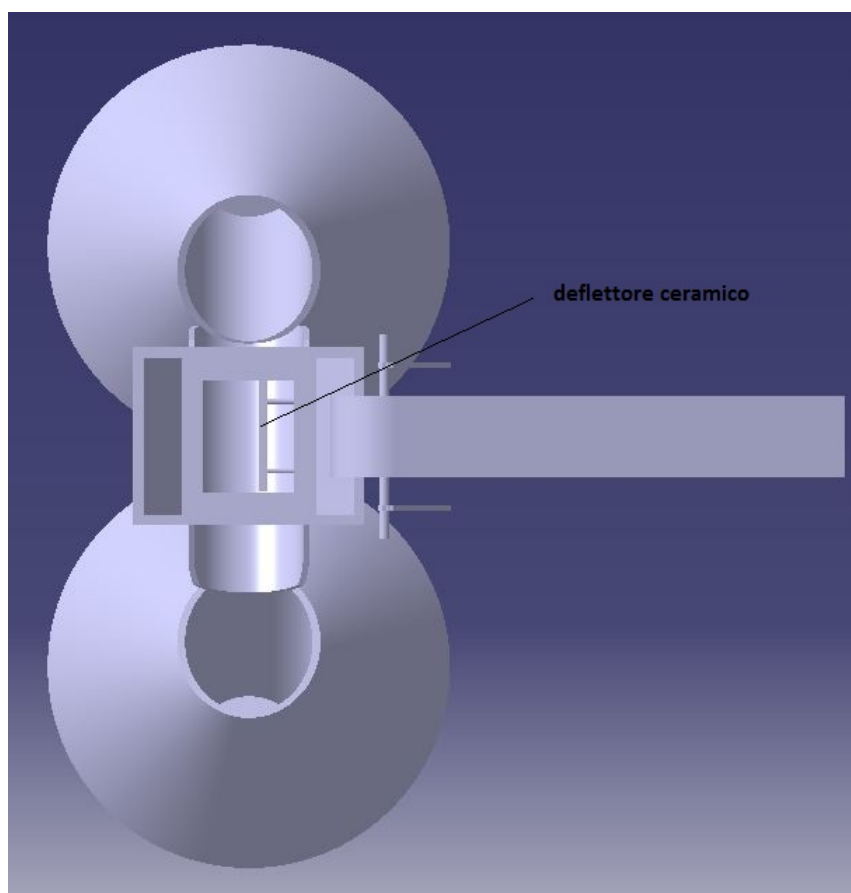


Figura 5.7: Assieme sistema caricamento Paul Wurth vista 2

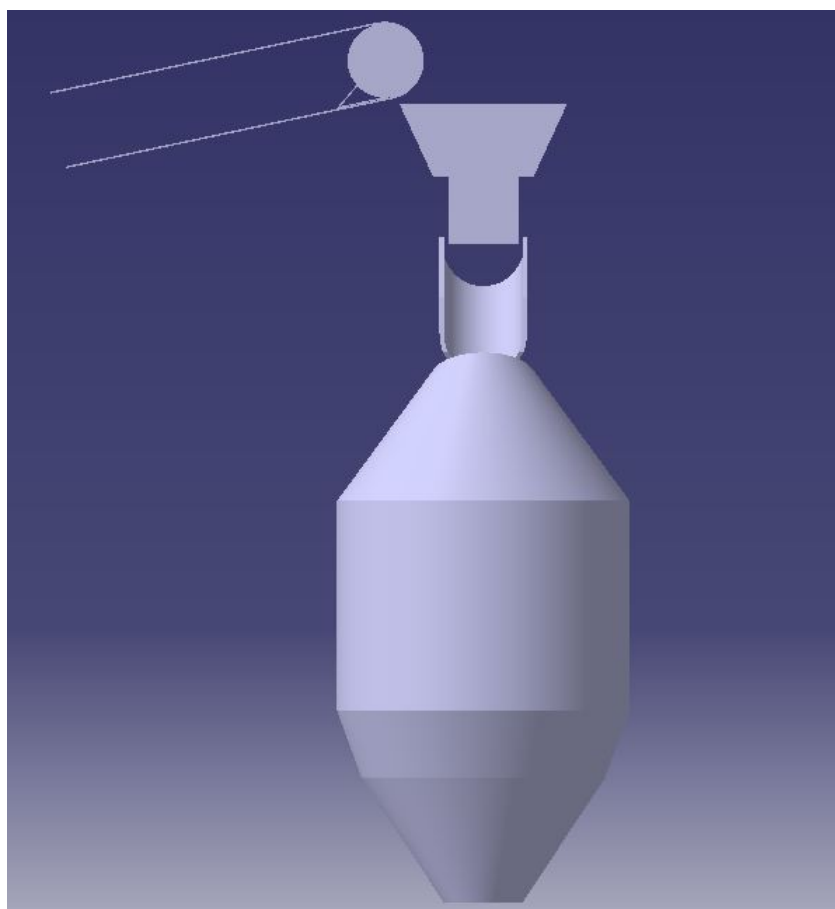


Figura 5.8: Assieme sistema caricamento Paul Wurth vista 3

Capitolo 6

Presentazione del problema

In realtà si sa solo quando si sa poco; col sapere aumenta il dubbio.

JOHANN WOLFGANG GOETHE

6.1 Introduzione

Si è descritto, nei capitoli precedenti, il ruolo fondamentale svolto dai sistemi di caricamento e la loro influenza sull'efficienza e sulla produttività dell'altoforno.

Dunque si vuole realizzare un modello che ben approssimi la fisica del problema così da studiare a fondo l'intera fase di caricamento, rilevarne i limiti e ove possibile introdurre migliorie. In particolare si è scelto di realizzare il modello di carica dell'altoforno n.4 dello stabilimento ILVA di Taranto, equipaggiato con un sistema di caricamento Bell-less top, ovvero senza campana.

Dopo aver compreso a fondo le fasi di caricamento descritte nel capitolo precedente, si è tentato di applicare al modello cad precedentemente realizzato,

i pacchetti cae presenti all'interno di Catia stesso. Tuttavia tra i numerosi pacchetti disponibili, non si è colto il toolkit adatto al problema in questione.

Sostanzialmente il problema deve essere approcciato tramite la teoria dinamico-cinematica per ciò che concerne la traiettoria e l'interazione tra particelle, e con la teoria fluidodinamica in riferimento all'interazione tra le particelle e l'aria circostante. Per l'appunto nessuno dei pacchetti disponibili è adatto all'accoppiamento dei due problemi.

Si è dunque abbandonata l'idea di utilizzare un sistema cae, virando l'attenzione su un software studiato appositamente per uno studio fluidodinamico, ovvero *OpenFOAM*.

6.2 Cos'è OpenFOAM

OpenFOAM, acronimo di Open Source Field Operation and Manipulation, è prima di tutto e soprattutto una C++ library, utilizzata principalmente per creare eseguibili, conosciuti come applicazioni (applications). Come dice il nome stesso, è distribuito gratuitamente da OpenCFD mediante licenza libera GNU, pertanto tale toolbox può essere installato solo su sistemi operativi quali Linux, Debian, Ubuntu, Fedora, che condividono la filosofia del Free Software; tuttavia è possibile lavorare anche su altri SO non liberi, mediante installazione di macchina virtuale. Le applicazioni sono divisibili in due categorie:

1. solver: solutori progettati per risolvere uno specifico problema di meccanica dei continui;
2. utilities: utilità progettate invece per adempiere a compiti di manipolazione di dati.

All'interno della distribuzione di OpenFOAM, sono inclusi numerosi solutori e svariate utilità, che coprono un'ampia gamma di problemi, quali flussi potenziali, laplaciani, incompressibili, compressibili, supersonici, analisi

strutturale, fluidi granulari, fluidi molecolari e reazioni chimiche, combustione e trasferimento di calore, magnetoidrodinamica, geofisica, persino un problema che esula dalle tradizionali applicazioni CFD, ovvero una simulazione finanziaria riguardante l'equazione di Black-Scholes.

La maggiore potenzialità di questo toolkit risiede nel fatto che ogni utente può sviluppare nuovi solver e nuove utilities; l'utente ha infatti accesso al codice originale e può liberamente modificarlo: in tal modo si possono creare nuove applicazioni, estendendo così le capacità del software a campi di studio e di ricerca non ancora affrontati e implementati.

OpenFOAM viene fornito di ambienti per il pre e il post processing, e le interfacce a tali ambienti, sono esse stesse utilities di OpenFOAM, assicurando pertanto una gestione robusta dei dati attraverso tutti gli ambienti.

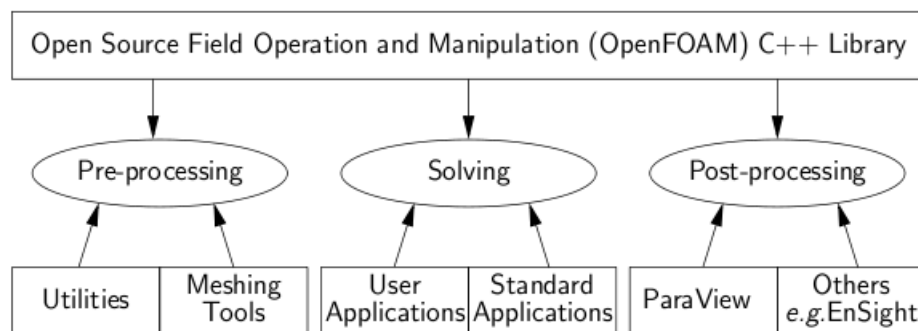


Figura 6.1: Struttura di base di OpenFOAM

6.2.1 Struttura di un caso di OpenFOAM

La struttura di base della cartella per un caso di OpenFOAM, è costituita principalmente da tre sotto cartelle:

- *constant* al cui interno vi sono i files che caratterizzeranno la fisica e la geometria del problema; sono presenti infatti la sotto cartella polymesh all'interno della quale l'utente potrà dichiarare la geometria in questione e creare la griglia di soluzione, e tutti i files riguardanti le proprietà

fisiche dell'applicazione; ad esempio `transportProperties`, è un file al cui interno saranno immagazzinate le informazioni concernenti le proprietà di trasporto del modello: tipo di trasporto (es. newtoniano) e relative costanti, μ e ν ;

- `0` ove risiede il file contenenti le condizioni al contorno del problema; non è banale notare che in OpenFOAM, i campi di qualsiasi grandezza, devono essere inizializzati, anche quando la soluzione non richiede strettamente che ciò sia fatto;
- `system` contenente i solver necessari e tutti i file ad essi legati; ivi si definiscono infatti tempo di inizio e fine simulazione, il passo di integrazione e più in generale parametri riguardanti la soluzione e l'output dei risultati.

Successivamente all'esecuzione della simulazione OpenFOAM crea nuove cartelle dei “tempi” all'interno delle quali vengono stampati i risultati ottenuti in termini di posizione, velocità, pressione, temperatura e più in generale delle grandezze di interesse.

6.2.2 Post-processing: ParaView

Il principale strumento di post-processing fornito insieme ad OpenFOAM, è il modulo di lettura da eseguire con ParaView, una applicazione di visualizzazione, ovviamente open-source. ParaView adopera il Visualisation ToolKit (VTK) come motore di elaborazione dati e di rendering, e può perciò leggere qualsiasi dato in formato VTK.

ParaFoam è semplicemente uno script che lancia ParaView utilizzando il modulo di lettura fornito insieme a OpenFOAM. Viene eseguito come una qualsiasi altra utility di OpenFOAM, lanciandolo da terminale, all'interno della cartella del caso. ParaFoam si presenterà all'utente tramite tre principali funzioni:

1. Pipeline Browser: contiene i moduli aperti in Paraview, ovvero i risultati delle simulazioni elaborate precedentemente;
2. Properties Panel: permetta all'utente di scegliere l'input per il caso, ovvero tempi, grandezze fisiche e parti da visualizzare;
3. Display Panel: controlla la rappresentazione visiva del modulo scelto, ad esempio colori, stile di rappresentazione etc.

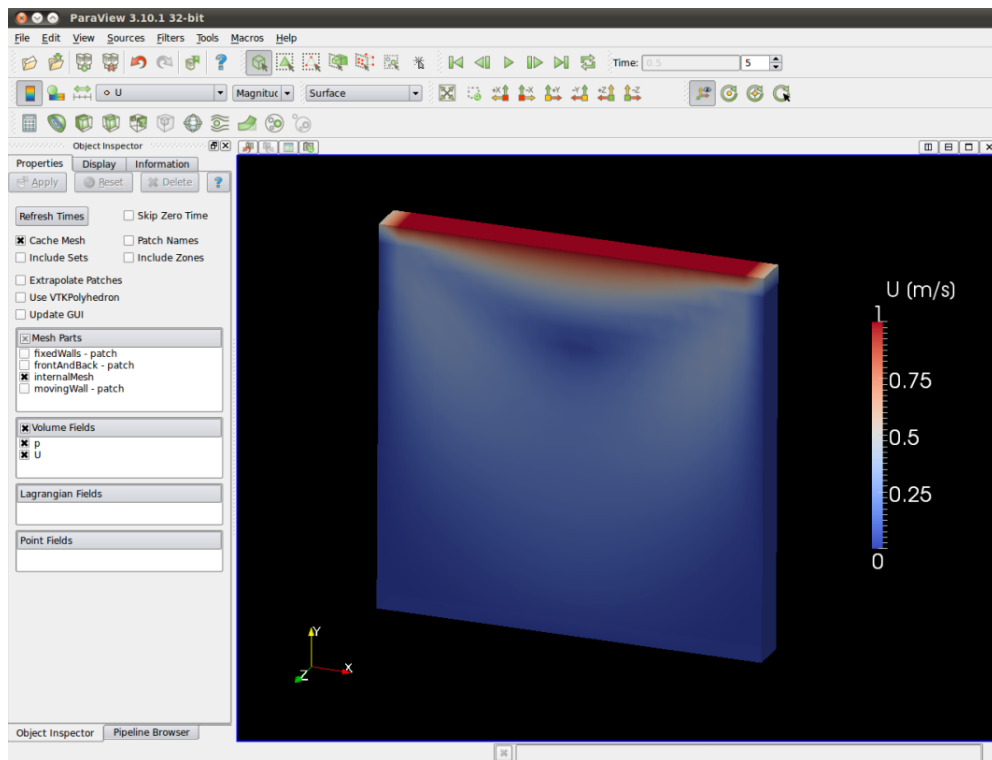


Figura 6.2: Struttura generale di paraView

Paraview opera su una struttura ad albero, che permette all'utente di "filtrare" i dati tramite opportune utilities (filters), a partire dal modulo del caso, così da creare il numero desiderato di sottomoduli. La forza di ParaView risiede nel fatto che l'utente può creare un gran numero di sottomoduli e scegliere quali di questi visualizzare, per generare l'immagine o l'animazione

desiderata; ad esempio si potrebbero aggiungere geometrie solide, griglie e vettori di velocità, alla regione di contorno di una pressione, andando in seguito a scegliere quali oggetti visualizzare o meno, a seconda dell'effetto grafico da voler ottenere.

6.3 Approccio al problema

Come primo approccio al problema presentato, si è utilizzato il modello dell'intero sistema di caricamento precedentemente realizzato, esportandolo dal software cad in formato "neutro", così da affiancare la geometria alla parte puramente fisica già implementata con OpenFOAM. Tuttavia sono tempestivamente nati i primi problemi a causa della compatibilità di OpenFOAM con determinati files, ma soprattutto a causa del concetto di geometria implementato su OpenFOAM: i solver, come è ovvio, sono caratterizzati dalla definizione di un dominio, di un volume di controllo chiuso e limitato contenente le sezioni di passaggio del flusso di materiale; ne consegue che OpenFOAM non considera spessori, gole e più in generale features che non si offrono al passaggio del flusso. L'assieme precedentemente realizzato risulta quindi inadeguato ai fini della simulazione del flusso di materiale.

Si è conseguentemente affrontato il problema geometrico definendo il dominio, ex novo, con l'ausilio di OpenFOAM; la costruzione della geometria con OpenFOAM non è affatto banale poiché questa dovrà essere definita di punto in punto e successivamente superficie per superficie così come si argomenterà nei capitoli successivi.

Capitolo 7

Definizione del modello

Se la sostanza delle cose coincidesse immediatamente con la forma delle loro manifestazioni, ogni scienza sarebbe superflua.

KARL MARX

7.1 Introduzione

In ogni lavoro di simulazione fluidodinamica, il primo passo da compiere, prima ancora della definizione della geometria e del dominio di interesse, è quello di implementare un modello fisico per il problema in questione. In particolare si dovrà utilizzare un modello che approssimi il meglio possibile le condizioni del sistema e che realizzi quindi durante la simulazione, il reale comportamento in esercizio.

L'oggetto del mio studio, ovvero l'analisi del flusso di materiale, che sia carica ferrifera o coke, attraverso l'apparato di caricamento dell'altoforno, rappresenta di fatto lo studio di un fluido granulare.

Un fluido granulare è così definito:

“una carica solida è costituita da molte particelle, dette granuli, di differenti dimensioni, e possibilmente differenti densità e composizione chimica, che si raggruppano casualmente per formare la carica stessa.” (C.R. Woodcock, J.S. Manson)

L’approccio tramite CFD-DEM è senza alcun dubbio il più efficace, e quindi il più utilizzato nel mondo della ricerca industriale, per far fronte ad un problema granulare o particellare. Questo approccio permette di accoppiare un problema fluidodinamico (CFD: Computational Fluid Dynamics) con un’accurata soluzione della componente dinamico-cinematico del letto di particelle, ottenuta con un approccio agli elementi discreti (DEM).

7.2 Approccio CFD-DEM

7.2.1 Computational Fluid Dynamics

Negli ultimi anni si è registrato un crescente interesse industriale nella simulazione di sistemi fluidi granulari (o particellari), quali il trasporto pneumatico, letti granulari, spray di particelle, filtrazione, e trasporto di materia granulare. Le metodologie più comunemente impiegate, sono quelle implementate all’interno di un’ambiente *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*).

Vi sono due principali approcci per far fronte ad un problema si fatto:

- approccio Euleriano-Lagrangiano
- approccio Euleriano-Grangulare

Per sistemi molto diluiti, nei quali la frazione solida è inferiore al 10%, si preferisce adottare un approccio Euleriano-Lagrangiano, nel quale le particelle, considerate come punti dotati di massa, che possono scambiarsi forze e momenti con il fluido, vengono studiate individualmente all’interno del fluido, e le loro traiettorie sono calcolate utilizzando una semplice equazione

di equilibrio delle forze. La forma delle particelle, le proprietà meccaniche e le interazioni interparticellari sono ignorate, mentre per le collisioni tra particelle e superfici, tale approccio si rifà ad un semplice modello di rimbalzo.

Se la frazione solida all'interno del fluido inizia a diventare importante, allora questo metodo non è sufficientemente adeguato a descrivere le dinamiche del fluido stesso, perché le collisioni tra le particelle non sono più trascurabili e la frazione solida si comporta essa stessa come un fluido continuo interpenetrante. Questo approccio, chiamato Euleriano-Granulare, tratta la fase granulare statisticamente per calcolare il tensore delle tensioni e la frazione di vuoto; accoppiando poi l'equazione di conservazione della massa, si possono determinare le forze in gioco, quantità di moto ed energia, tra fase fluida e fase solida. Le approssimazioni del metodo CFD applicato a flussi fluidi-granulari, ignorano le proprietà meccaniche e inerziali di ciascuna particella, così come le interazioni tra particella e parete, limitando quindi la precisione del metodo stesso, nello spiegare, ad esempio, le evoluzioni di concentrazioni di particelle, a loro volta caratterizzate da granulometrie non uniformi, oppure nel tenere conto delle interazioni tra particelle e superfici in genere.

7.2.2 Discret Element Method

Il primo passo per ovviare ai limiti del CFD è affidarsi al metodo agli elementi discreti, *DEM (Discrete Elements Method)*, che propone una soluzione lagrangiana ai flussi granulari, e calcola esplicitamente per ciascuna particella, la propria dinamica. Codesto metodo, viene impiegato per modellare il comportamento granulare in un'ampia gamma di applicazioni, quali il trasporto su nastro, la carica e lo svuotamento di tramogge (hopper), l'attrito tra particelle, e molto altro ancora. Tuttavia, il metodo in questione non tiene conto delle interazioni tra particelle e fluido, in modo rigoroso, ma considera semplicemente una forza di attrito viscoso.

7.2.3 Coupling CFD-DEM

L'approccio che massimizza i pregi di entrambi i metodi di risoluzione, consiste nell'accoppiamento dei due stessi, accostando la dinamica delle particelle ai calcoli fluidodinamici. Il più semplice accoppiamento è quello "a senso unico", ovvero one-way coupling, dove la forza resistente agente sulle particelle è calcolata basandosi sulle condizioni locali del flusso, in un campo di flusso convergente. Questo tipo di accoppiamento offre buoni risultati se il trasferimento della quantità di moto dal fluido alle particelle è basso relativamente alla quantità di moto locale del fluido; tuttavia offre il vantaggio di velocizzare i tempi di calcolo, ed è applicabile a flussi con un numero esiguo di particelle.

Il pieno accoppiamento tra le fasi tiene conto dello scambio di quantità di moto, di massa e energia se necessario, l'approccio più comunemente adottato è quello di accostare al DEM le equazioni di Navier-Stokes, utilizzando i termini di quantità di moto. Questo tipo di accoppiamento è però limitato a semplici geometrie e domini di calcolo.

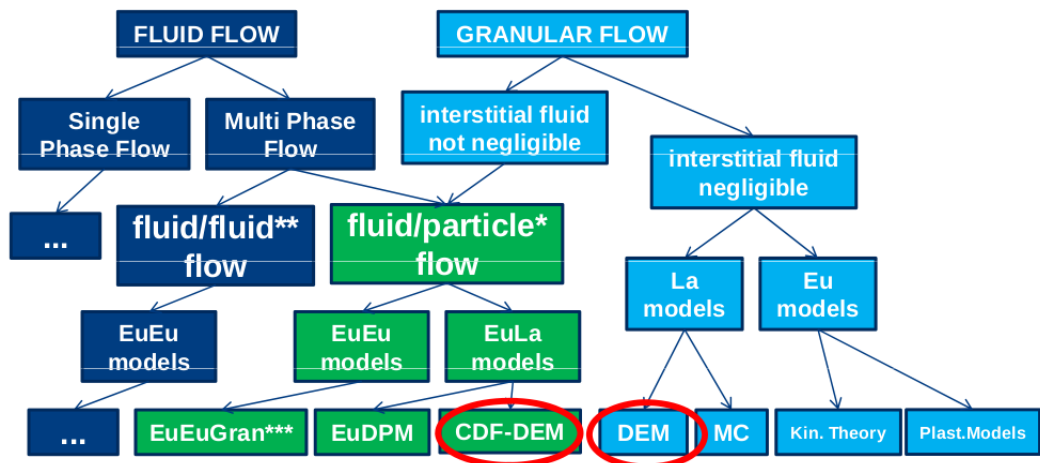


Figura 7.1: Accoppiamento CFD-DEM

In seguito alle considerazioni sopra citate, si farà uso di un accoppiamento one-way, parzialmente già implementato in un risolutore pre-esistente e

direttamente utilizzabile attraverso OpenFOAM. Il risolutore in questione, ovvero *icoUncoupledKinematicParcelFoam*, risolve prettamente la parte dinamica del problema tramite un semplice modello basato sull'equilibrio delle forze in gioco, il *modello di Voigt* che verrà trattato con maggiore attenzione nel successivo paragrafo; la questione fluidodinamica viene invece semplificata definendo una drag force di tipo viscoso agente sulle particelle stesse.

Dunque ci si trova al cospetto di un accoppiamento CFD-DEM parzialmente “forzato”, nel senso che la questione fluidodinamica è ottenuta con un'opportuna approssimazione.

7.3 Formulazione matematica del moto di particelle tramite DEM

Il Discret Element Method è un approccio per lo studio del moto di particelle, basato sulla risoluzione di equazioni di equilibrio che considerano le forze di contatto particella-particella o particella-parete.

Le forze di contatto sono descritte dal modello di Voigt che consiste sostanzialmente in un semplice modello massa-molla-smorzatore come mostrato in figura 7.2.

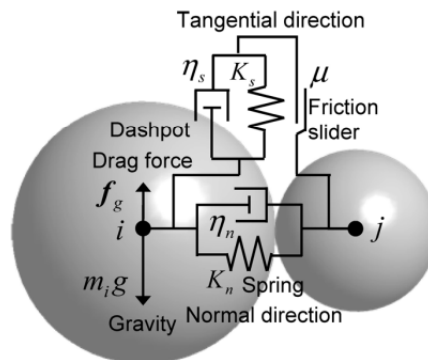


Figura 7.2: Schematizzazione del modello di Voigt

All'istante t , lo spostamento u_i e la rotazione ϕ_i della particella i avente massa m , sono descritti dalle seguenti equazioni:

$$m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} + \eta \frac{du_i}{dt} + K u_i + f_g + m_i g = 0$$

$$I_i \frac{d^2 \phi_i}{dt^2} + \eta R_i^2 \frac{d\phi_i}{dt} + K R_i^2 \phi_i = 0$$

dove K , η , I , R , f_g e g sono rispettivamente la rigidezza generalizzata, il coefficiente di smorzamento, il momento d'inerzia, il raggio della particella, la forza di interazione fluido-particella, e l'accelerazione gravitazionale.

La forza di contatto F agente tra le particelle j e i , può essere espressa come:

$$F_{n,t} = \sum_j (e_{n,t} + d_{n,t})$$

$$F_{s,t} = \sum_j (e_{s,t} + d_{s,t})$$

dove d ed e sono le forze elastiche e di smorzamento generate dal contatto particella-particella, mentre i pedici s e t sono riferiti alla direzione normale e tangenziale. Il moto delle particelle è generalmente determinato tramite un metodo differenziale incrementando l'istante di tempo in questione. La forza di contatto è ricavata dalla variazione di spostamento Δu in un tempo discreto Δt :

$$e_{n,t} = e_{n,t-\Delta t} + K_n \Delta u_n$$

$$d_{n,t} = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t}$$

$$e_{s,t} = e_{s,t-\Delta t} + K_s \Delta u_s$$

$$d_{s,t} = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t}$$

In particolare i coefficienti K_n , K_s , η_n e η_s valgono:

$$K_n = 2D_b \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right)^{-1}$$

$$K_s = 8D_b \left(\frac{2(2 - \nu_i)(1 + \nu_i)}{E_i} + \frac{2(2 - \nu_j)(1 + \nu_j)}{E_j} \right)^{-1}$$

$$\eta_n = 2\sqrt{mK_n}$$

$$\eta_s = 2\sqrt{mK_s}$$

dove E e ν sono il modulo di Young e il coefficiente di Poisson della particella, e D_b è il raggio della circonferenza di contatto.

Quando la forza tangenziale è maggiore della forza di attrito statico, questa assume la seguente espressione:

$$F_{s,t} = \mu_t |F_{n,t}|$$

ove μ_t rappresenta il massimo coefficiente di attrito statico.

Per avvicinarsi ulteriormente alla reale interazione tra le particelle, si introduce nel modello stesso un nuovo termine, relativo all'attrito nel moto rotazionale, che mitiga l'effetto della forza tangenziale dovuta al contatto particella-particella; in particolare questo termine è dovuto alla forma irregolare delle particelle, ben diversa da quella sferica ipotizzata dal modello.

$$I_i \frac{d^2 \phi_i}{dt^2} = \sum_j (T_{s,t} + M_t)$$

$$T_{s,t} = -R_i \sum_j F_{s,t}$$

$$M_t = \frac{3}{8} \alpha D_b |F_n|$$

dove $T_{s,t}$ e M_t rappresentano la coppia ricevuta dalla singola particella ed una funzione del *coefficient of rolling friction* α ; quest'ultimo dipende

dalle proprietà fisiche della superficie della particella, infatti ogni particella a causa dell'elevata irregolarità della carica è caratterizzata da un coefficiente differente.

7.3.1 Formulazione della forza resistente

Per ciò che concerne l'interazione fluido particella, il modello in questione fa uso di una drag force f_g di tipo viscoso, agente sulla singola particella. La drag force è calcolata ipotizzando una forma sferica delle particelle, mentre per quelle non sferiche si farà riferimento ad una sfera equivalente circoscritta alla stessa particella. Nel caso sia possibile realizzare uno studio puramente accoppiato tra CFD e DEM, tutte le informazioni saranno estrapolate dalla mesh CFD contenente per ogni elemento il centro delle particelle DEM. Se il software utilizzato non consente di risolvere il problema in questo modo, allora sarà l'utente a definire le grandezze fluidodinamiche necessarie alla costruzione della drag force.

In particolare il coefficiente di drag dipende fortemente dal numero di Reynolds Re :

$$Re = \frac{\rho L |v|}{\mu}$$

ove ρ è la densità del fluido, μ la sua viscosità, L la grandezza caratteristica e quindi in questo caso il diametro della particella, e v la velocità relativa tra fluido e particella. Il coefficiente di drag è quindi definito in funzione del numero di Reynolds Re :

$$c_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re \leq 0.5 \\ \frac{24(1+0.15Re^{0.687})}{Re} & 0.5 < Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases}$$

Si può dunque definire la forza di drag come:

$$F_g = 0.5c_d\rho Av|v|$$

La drag force può essere ulteriormente corretta, tramite un opportuno coefficiente χ , funzione della frazione di vuoto ϵ del letto fluido:

$$F_g = 0.5c_d\rho Av|v|\epsilon^{-(\chi+1)}$$

ove χ è definito come:

$$\chi = 3.7 - 0.65\exp\left[-\frac{(1.5 - \log_{10} Re)^2}{2}\right]$$

Capitolo 8

Sviluppo della geometria del sistema di caricamento

Una teoria può essere provata da un esperimento. Ma nessun percorso guida dall'esperimento alla nascita di una teoria.

ALBERT EINSTEIN

8.1 Introduzione

Dopo aver definito il modello fisico che governa il problema, come in ogni lavoro di fluidodinamica computazionale e più in generale di simulazione meccanico-fisica, si prosegue nella fase di pre-processing, spostando l'attenzione sulla definizione della geometria del caso di interesse.

Così come argomentato nei capitoli precedenti, la definizione della geometria in OpenFOAM non è affatto banale; il concetto fondamentale sul quale si basa il pre-processing di OpenFOAM, è la costruzione a blocchi: qualsiasi figura solida, in linea di principio può essere definita, a patto che si segua la corretta strategia. I blocchi sono le unità fondamentali che costituiscono

la geometria; esistono vari tipi di blocchi, che si distinguono per il numero dei vertici, e quindi numero di facce e di spigoli, che li compongono: quello più semplice è l'esaedro, ma ne esistono altri più complessi come il prisma, la piramide, il tetraedro, i quali si possono realizzare mediante opportuni accorgimenti in scrittura partendo dal blocco esaedrale.

Per definire i blocchi, è necessario dichiarare i vertici, le coordinate dei quali sono le prime informazioni che si trovano nel file *blockMeshDict*. Le regole per la scrittura dei vertici sono abbastanza semplici, ogni punto infatti è individuato da tre coordinate (x, y, z) , date in metri, o in multipli o sottomultipli del metro come mostrato in figura 8.1.

Le righe successive del codice, sono dedicate ai blocchi; nel nostro caso si è fatto un uso esclusivo del blocco esaedrale, perché l'utility *blockMesh*, privilegia celle di questo tipo.

Per definire tale blocco, occorrono otto vertici, i quali vanno elencati seguendo un ordine preciso, in modo da non generare blocchi a volume negativo. Sempre in tale sezione, successivamente ad ogni blocco, si dovrà indicare il numero di intervalli nei quali “suddividere” il blocco stesso in ogni direzione, così da definire la griglia necessaria al calcolo. È ovviamente necessario assicurare la giusta continuità alla mesh nella definizione di blocchi contigui.

Il passo successivo riguarda la sezione denominata *edges* (spigoli), che accoglierà le istruzioni riguardanti il tipo di raccordo da interporre tra i vertici precedentemente dichiarati. Di default l'utility *blockMesh*, introduce uno spigolo lineare, altrimenti, utilizzando la keyword adeguata, si possono realizzare diversi tipi spigoli: *arc* per ottenere un arco circolare, *polyLine* crea una linea spezzata, *polySpline* invece crea un insieme di curve. In particolare nel problema in questione si è fatto uso unicamente di spigoli lineari e di archi (soprattutto nella dichiarazione delle facce del tilting rocker).

L'ultima parte del file ha una rilevanza critica, poiché ivi si discrimina la natura delle varie superfici che costituiscono i confini del dominio: tale parte del file, chiamata non a caso *boundary*, riporta delle liste di superfici. Si dovrà in particolare specificare il tipo di superficie in questione, ad esempio

```
convertToMeters 0.001;

vertices
(
  (-1014 2270 870)//0
  (-100 2270 870)//1
  (335 2270 870)//2
  (1249 2270 870)//3
  (-554.4 1275 870)//4
  (-100 1275 870)//5
  (335 1275 870)//6
  (789.4 1275 870)//7
  (-1014 2270 540)//8
  (-100 2270 540)//9
  (335 2270 540)//10
  (1249 2270 540)//11
  (-554.4 1275 540)//12
  (-100 1275 540)//13
  (335 1275 540)//14
  (789.4 1275 540)//15
  (-1014 2270 -540)//16
  (-100 2270 -540)//17
  (335 2270 -540)//18
  (1249 2270 -540)//19
  (-554.4 1275 -540)//20
  (-100 1275 -540)//21
  (335 1275 -540)//22
  (789.4 1275 -540)//23
  (-1014 2270 -870)//24
  (-100 2270 -870)//25
  (335 2270 -870)//26
  (1249 2270 -870)//27
  (-554.4 1275 -870)//28
  (-100 1275 -870)//29
  (335 1275 -870)//30
  (789.4 1275 -870)//31
  (-100 -563.829676841525 540)//32
  (335 -563.829676841525 540)//33
  (-100 375 -540)//34
  (335 375 -540)//35
  (-523 -563.829676841525 540)//36
  (523 -563.829676841525 540)//37
)
```

Figura 8.1: Definizione dei vertici

parete (*wall*), regione (*patch*), alla quale si applicano determinate condizioni al contorno. Un altro file, contenuto nella cartella 0, avrà il compito di recepire le regole delle condizioni al contorno definite successivamente dall'utente. Tutte quelle superfici che non sono dichiarate in boundary, vengono raccolte in una lista, detta *defaultFaces*, compilata automaticamente dall'utility blockMesh, e sono considerate come regioni nelle quali non vi è nessuna condizione al contorno.

```

blocks
(
  hex (4 5 13 12 0 1 9 8) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (5 6 14 13 1 2 10 9) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (6 7 15 14 2 3 11 10) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (12 13 21 20 8 9 17 16) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (13 14 22 21 9 10 18 17) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (14 15 23 22 10 11 19 18) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (20 21 29 28 16 17 25 24) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (21 22 30 29 17 18 26 25) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (22 23 31 30 18 19 27 26) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (32 33 35 34 13 14 22 21) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (44 45 51 50 40 41 32 36) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (45 46 52 51 41 42 33 32) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (46 47 53 52 42 43 37 33) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (94 48 54 96 44 45 51 50) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (48 49 55 54 45 46 52 51) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (49 95 97 55 46 47 53 52) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (50 51 57 56 36 32 34 38) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (51 52 58 57 32 33 35 34) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (52 53 59 58 33 37 39 35) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (96 54 60 98 50 51 57 56) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (54 55 61 60 51 52 58 57) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (55 97 99 61 52 53 59 58) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (56 57 67 66 38 34 63 62) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (57 58 68 67 34 35 64 63) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (58 59 69 68 35 39 65 64) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (98 60 70 100 56 57 67 66) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (60 61 71 70 57 58 68 67) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (61 99 101 71 58 59 69 68) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (76 77 49 48 73 74 46 45) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (92 76 48 94 72 73 45 44) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (77 93 95 49 74 75 47 46) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (74 75 47 46 80 81 43 42) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (73 74 46 45 79 80 42 41) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (72 73 45 44 78 79 41 40) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (70 71 87 86 67 68 84 83) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (100 70 86 102 66 67 83 82) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (71 101 103 87 68 69 85 84) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (68 69 85 84 64 65 91 90) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (67 68 84 83 63 64 90 89) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
  hex (66 67 83 82 62 63 89 88) (5 5 5) simpleGrading (1 1 1)
)

```

Figura 8.2: Definizione dei blocchi

8.2 I componenti della bocca Paul Wurth

Come argomentato nei capitoli precedenti i principali componenti del sistema di caricamento (figura 8.3) ideato da Paul Wurth sono uno scivolo basculante (tilting rocker), due sili di stoccaggio (hopper) ed uno scivolo rotante (rotating distributing chute) posto in successione alle due hopper che permette un'adeguata distribuzione del materiale nell'altoforno variando il proprio angolo di incidenza; hanno inoltre grande importanza il deflettore ceramico e la tramoggia trapezoidale, che permette l'accumulo di materiale

e la formazione della ston-box, in modo tale da conferire al flusso di materiale la giusta gittata.

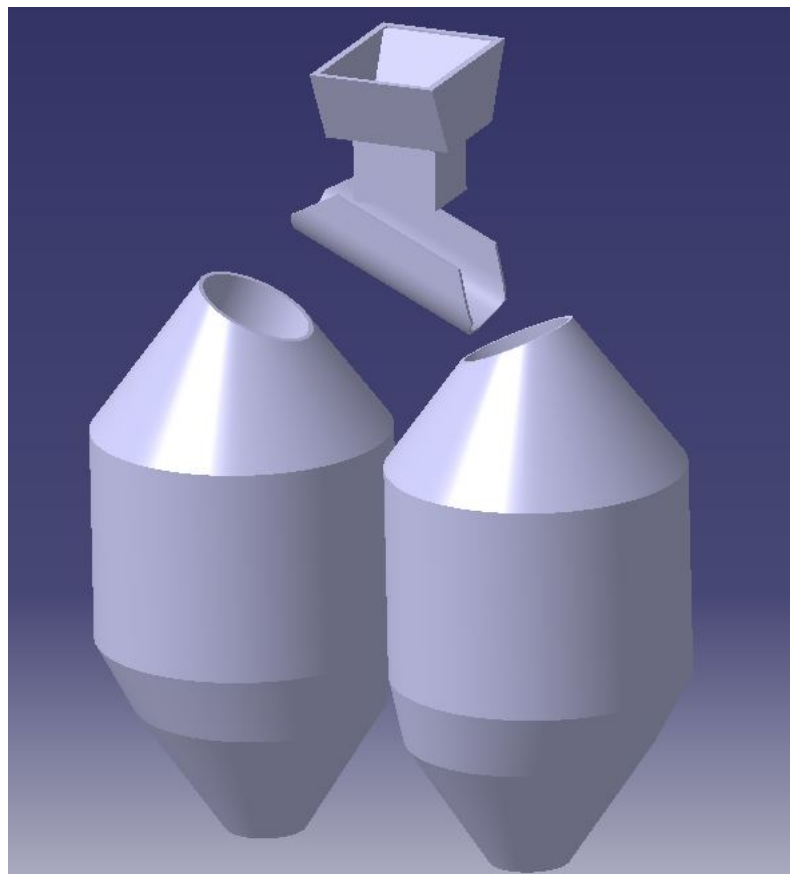


Figura 8.3: Componenti della bocca Paul Wurth

In particolare questo lavoro di tesi è concentrato sullo studio del flusso di materiale che attraversa la tramoggia trapezoidale, impatta sul deflettore e si accinge ad incanalarsi lungo il tilting rocker.

Si trascurerà per lo meno nella fase iniziale, la presenza delle due hopper che raccolgono il materiale in successione al tilting rocker ed in particolare del nastro trasportatore che permette l'arrivo della carica dalle stock-house fino in cima all'altoforno.

8.2.1 Definizione del dominio di calcolo

Con l'ausilio del modello cad precedentemente realizzato si è dunque costruita, ex novo, la geometria. Si è costruita di primo acchito, per ovvi motivi, una geometria 3D: non ha infatti alcun senso partire da una struttura 2D per apprendere approssimativamente il comportamento del materiale, così come sarebbe funzionale invece ad esempio per lo studio riguardante la hopper.

In figura 8.4 è mostrata la geometria iniziale; ben si distinguono i componenti precedentemente elencati.

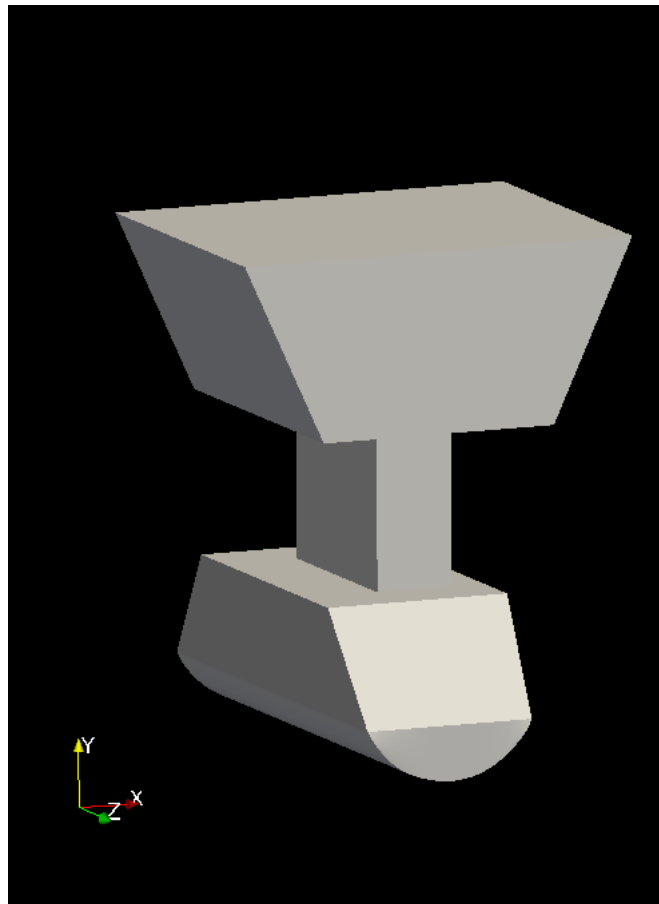


Figura 8.4: Geometria iniziale del sistema di caricamento

Si può notare come, almeno inizialmente per una questione pratica, il

tilting rocker è caratterizzato da un angolo di basculamento nullo; poiché, come è ovvio, questa configurazione non trova alcuna corrispondenza nella realtà pratica il passo successivo è stato quello di “inclinare” il tilting rocker in modo da studiarne la discesa durante la carica delle hopper. In particolare, da ricerche bibliografiche, è noto come angoli tipici di basculamento si assestano intorno ai 41° e 50° . Nel caso in questione è stato conferito al tilting rocker un angolo di basculamento pari a 41° (figura 8.5).

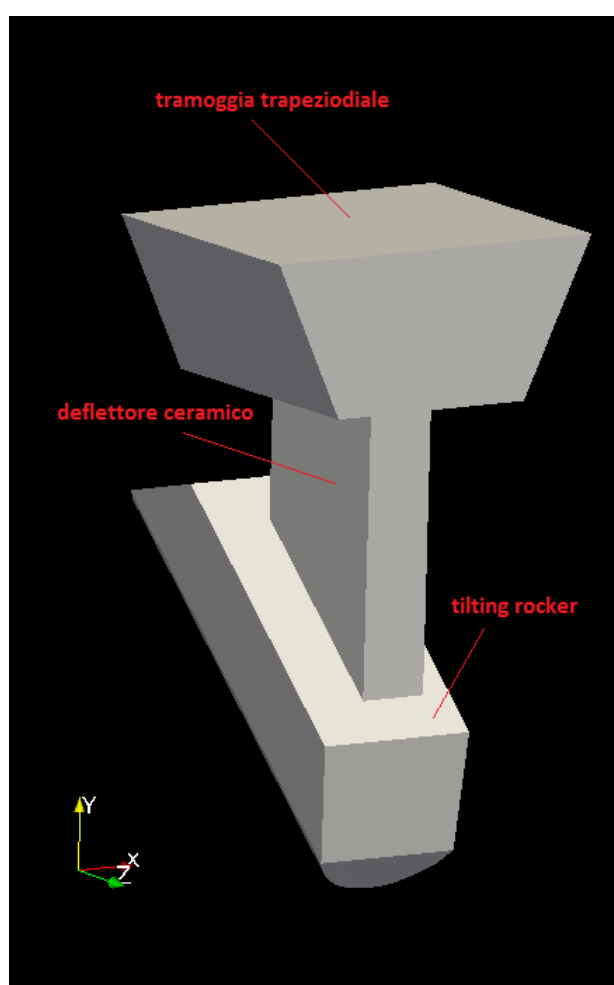


Figura 8.5: Geometria effettiva del sistema di caricamento

La costruzione della geometria, sebbene si mostri apparentemente lineare,

si è dimostrata abbastanza complessa a causa dell'elevato numero di punti, e quindi blocchi, necessari alla definizione dell'intero dominio: nel complesso il numero di punti ammonta a 119 mentre il numero di blocchi a 57; ogni punto della geometria è stato ricavato dai progetti originali Paul Wurth, tramite un dedicato strumento di misura di AutoCAD.

Successivamente è stata costruita la griglia di calcolo che permetterà l'integrazione del problema e la generazione della soluzione; in questa direzione la forza di OpenFOAM risiede nella generazione automatica della mesh, rispettando tutte le regole base imposte dal calcolo ad elementi discreti, indicando all'utente possibili fonti di errori e di features critiche da modificare prima della simulazione (ad esempio spigoli vivi e superfici eccessivamente inclinate rispetto alle adiacenti). L'unico compito che spetta all'utente è la scelta del numero di celle in cui dividere il dominio di interesse, che determinerà quindi la capillarità della mesh (figura 8.6).

In seguito alla definizione della geometria si è immediatamente posto il problema dell'ingresso delle particelle di materiale, trasportate in cima all'altoforno dal treno nastri. Come spiegato precedentemente questo lavoro esula la costruzione del nastro, tuttavia per ovvi motivi si deve realizzare una feature che ben approssimi il comportamento delle particelle durante l'arrivo alla bocca dell'altoforno, per lo meno in termini di velocità e traiettoria.

Il primo passo è stato quello di realizzare un semplice parallelepipedo, un box caratterizzato da una dimensione, la lunghezza, preponderante sulle altre due, dotato di una superficie detta di *inlet* che permettesse l'ingresso delle particelle nel dominio, tramite pura iniezione (figura 8.7). In particolare è stato compilato lo script *patchInjection* che assolve per l'appunto a questa funzione. Lo script in questione richiede all'utente di indicare le componenti di velocità che caratterizzeranno le particelle, la portata massica da introdurre, le caratteristiche intrinseche delle stesse particelle, ovvero densità, distribuzione granulometrica e il modello da utilizzare nel contatto superficie-particella.

Per ciò che concerne la distribuzione granulometrica, si è ipotizzata una

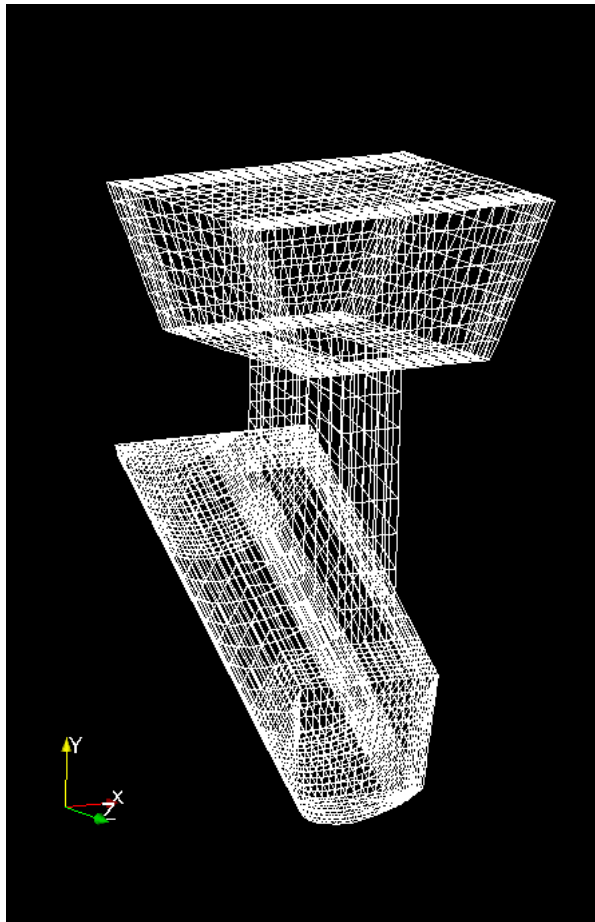


Figura 8.6: Dominio di calcolo

distribuzione normale avente media $\mu = 0.051 \text{ m}$ e deviazione standard pari a $\sigma = 0.0135 \text{ m}$ per le particelle di coke, mentre per le particelle ferrifere di agglomerato media $\mu = 0.023 \text{ m}$ e deviazione standard $\sigma = 0.0095 \text{ m}$ (figura 8.8).

Il box realizzato assolverà dunque, il compito del nastro trasportatore. Dopo una visione del sistema di caricamento dell'altoforno n.4 dello stabilimento ILVA di Taranto, oggetto del mio studio, è stato appurato che questo presenta un'inclinazione rispetto all'orizzontale di 12° , e che la sua velocità si attesta a 1.93 m/s . Il nastro fittizio realizzato in OpenFOAM deve avere quindi caratteristiche tali da garantire tale velocità alle particelle in caduta.

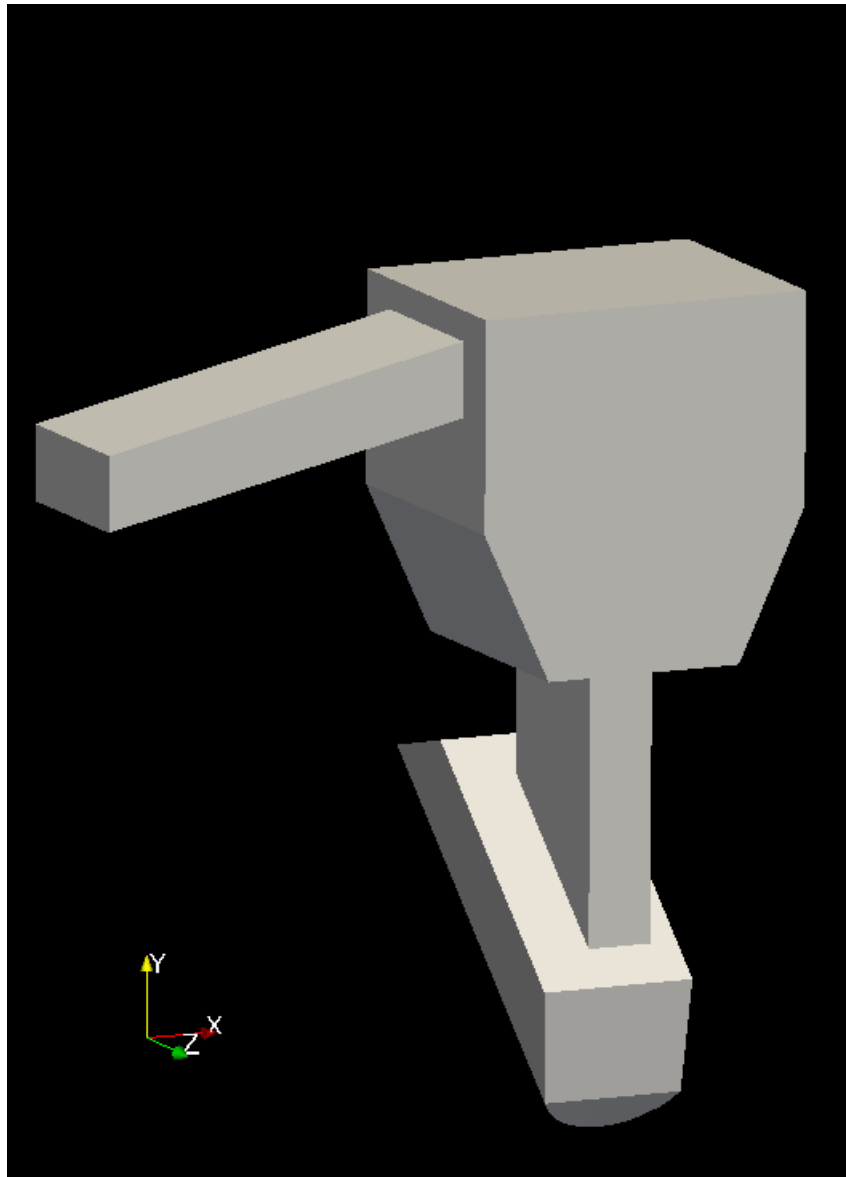


Figura 8.7: Configurazione iniziale del nastro di caricamento

Dal punto di vista geometrico il box in questione è caratterizzato da una lunghezza di 2500 mm , e da un'altezza di 500 mm .

È stata inoltre realizzata una cuffia alla tramoggia trapezoidale, avente altezza pari alla distanza reale tra la stessa tramoggia e il nastro (all'incirca

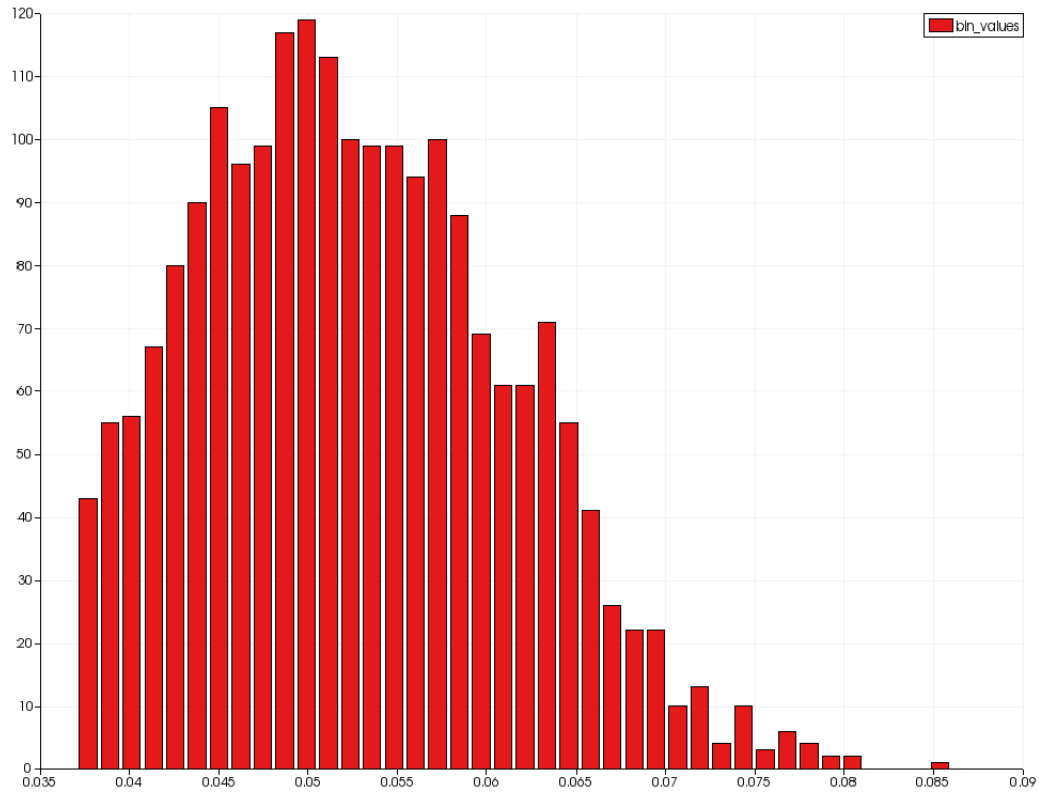


Figura 8.8: Distribuzione granulometrica delle particelle di coke

1 m), come in figura 8.9, in modo tale da garantire continuità tra la precedentemente geometria e il nastro fittizio, e permettere alle particelle la classica gittata di tipo parabolico.

Tuttavia si può ben comprendere come l'iniezione di particelle da una superficie di inlet, come descritto precedentemente, non rispecchi affatto il comportamento di un nastro trasportatore caratterizzato da particelle solidali al nastro stesso e aventi tutte stessa velocità. Per ovviare a questa discrepanza una prima soluzione è stata quella di introdurre dall'alto le particelle tramite una nuova superficie di inlet, così da permettere alle stesse di adagiarsi sulla superficie rappresentante il nastro; in particolare è stata utilizzata la geometria realizzata precedentemente, apportando opportune modifiche. La superficie in questione è stata dichiarata come *movingWall*,

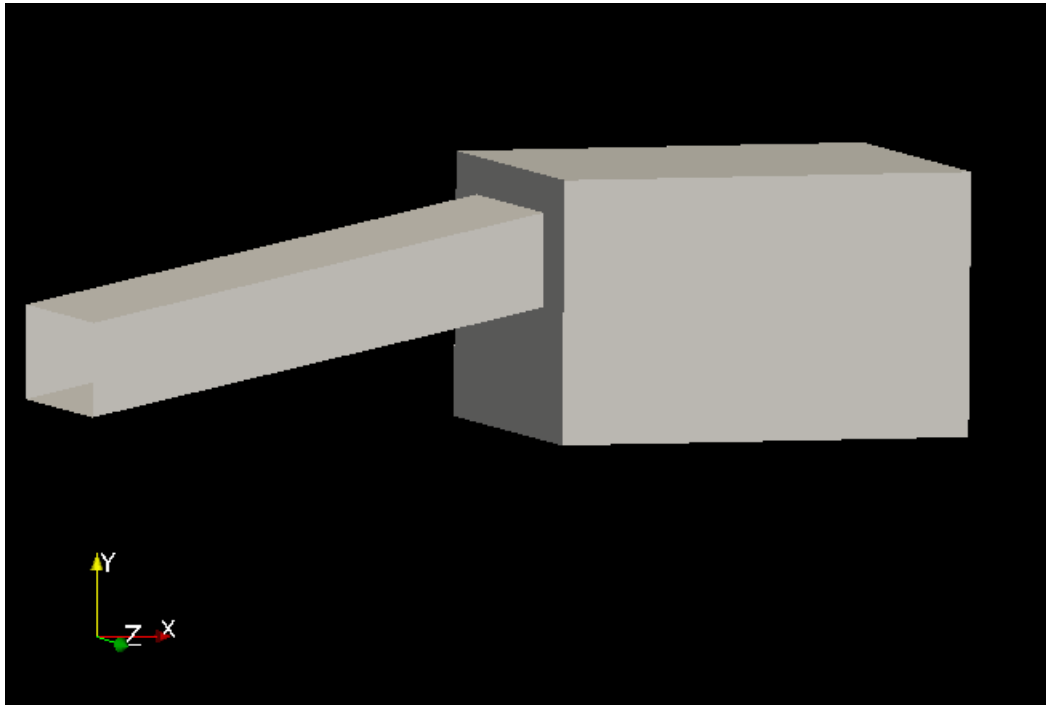


Figura 8.9: Particolare del nastro trasportatore e cuffia

ovvero superficie mobile, avente condizioni al contorno sulla velocità pari a quelle del nastro reale. L'idea di base consiste nell'approssimare la funzione del nastro trasportatore con l'ausilio della superficie mobile, avente il compito di accogliere il materiale iniettato e trasportarlo solidalmente alla tramoggia trapezoidale.

La geometria così ottenuta verrà utilizzata per l'esecuzione delle prime simulazioni; le modifiche apportate in itinere alla geometria, in seguito ai primi riscontri ottenuti, saranno trattate nel capitolo successivo riguardante il post-processing.

Capitolo 9

Post-processing e risultati finali

La pura ricerca è quando faccio quello che non so fare.

WERNER VON BRAUN

9.1 Introduzione

Dopo aver definito il modello fisico, la geometria ed infine costruito la griglia di calcolo, si può procedere alla compilazione finale degli script necessari per l'esecuzione della simulazione.

In particolare le grandezze di maggior interesse riguardano i parametri fondamentali per la carica, quali massa totale necessaria per il riempimento della hopper in caricamento, numero di particelle al secondo da iniettare nel sistema, tempo necessario per il caricamento; valori tipici, ricavati da una ricerca bibliografica e dall'esperienza presso lo stabilimento ILVA, e dunque utilizzati nelle diverse simulazioni sono elencati di seguito:

- $M_{tot} = 11650 \text{ kg}$;
- $n_{parcel} = 400 \frac{\text{particelle}}{\text{s}}$;

- $t_{carica} = 366 \text{ s}$.

Si dovranno inoltre definire tutti i coefficienti che caratterizzano il modello fisico utilizzato dal risolutore, precedentemente descritto, ponendo grande attenzione soprattutto sui coefficienti di smorzamento, attrito e di elasticità, non solo nel contatto particella-particella, ma anche nel contatto particella-parete; per ogni superficie si andranno infatti a definire coefficienti differenti in base al comportamento che le particelle dovranno assumere.

9.2 Risultati e modifiche del sistema

In seguito alla compilazione dei campi necessari di ogni script e alla definizione delle grandezze fondamentali di cui sopra, si è passati all'esecuzione delle simulazioni di carica.

In particolare sono state eseguite numerose simulazioni, correggendo passo passo ogni piccolo errore e imprecisione; tuttavia nonostante ciò non si è giunti al risultato sperato a causa delle caratteristiche del solver utilizzato. Nonostante le condizioni di velocità imposte alla superficie del nastro, e a fronte di un'impeccabile iniezione di particelle, le stesse dopo essersi perfettamente adagate sul nastro non presentano alcuna forma di moto (figura 9.1).

Molto probabilmente questo è dovuto all'implementazione del solver utilizzato (*icoUncoupledKinematicParcelFoam*) che privilegia l'iniezione e lo studio degli urti delle particelle piuttosto che il moto delle stesse in seguito alla definizione di una mesh mobile (*movingWall*). Per lo studio di una mesh mobile è infatti disponibile un solver dedicato, che sfortunatamente non può essere accoppiato con il solver necessario per l'iniezione e lo studio del moto delle particelle.

Si è quindi accantonato momentaneamente l'approccio con mesh mobile, che ben avrebbe approssimato anche il nastro trasportatore nonostante questo lavoro esuli uno studio del nastro stesso; si è dunque focalizzata l'at-

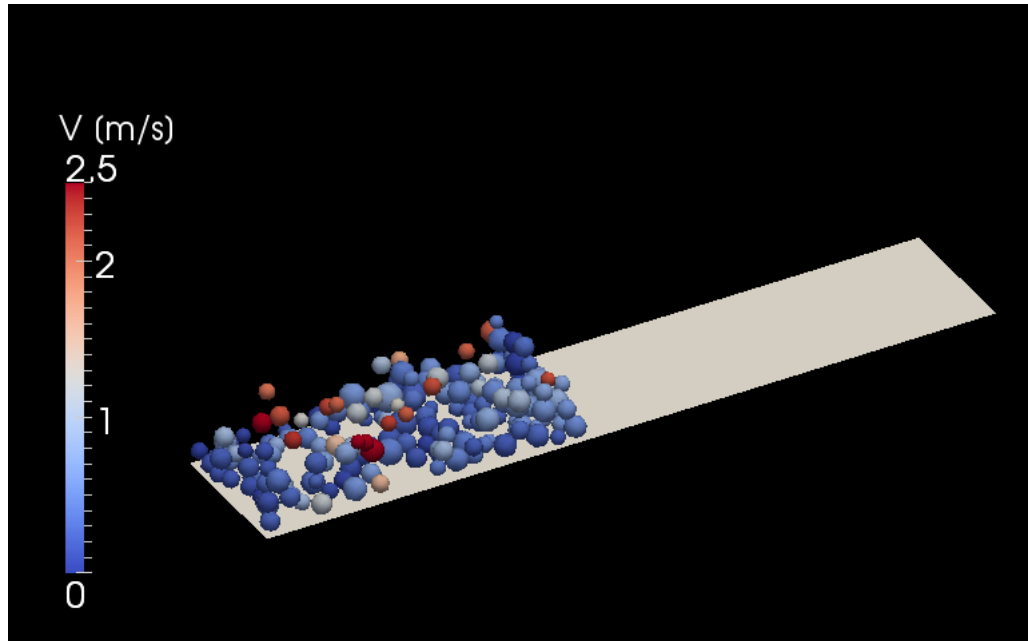


Figura 9.1: Particelle adagiate sul nastro

tenzione semplicemente sulla velocità e la traiettoria che le particelle devono possedere al termine del nastro, durante la caduta verso la ston-box.

La geometria è stata quindi nuovamente modificata, eliminando la superficie di inlet precedentemente realizzata, non più consona al problema; si utilizzerà dunque come superficie di iniezione la faccia posteriore del box rappresentante il nastro, come mostrato in figura 9.2

In particolare in seguito alle modifiche introdotte, il nastro dovrà avere caratteristiche fisiche e geometriche tali da garantire alla particelle una velocità pari a 1.93 m/s e una traiettoria adeguata; si è pensato di conferire al nastro un coefficiente d'attrito relativamente basso e prossimo allo zero, in modo da poter facilmente determinare la velocità di iniezione delle particelle tale da conferire alle stesse, al termine del nastro la velocità che assumono nelle quotidiane fasi di carica. Con l'ausilio di successive prove si è stimato un valore ottimale di velocità al fine dell'iniezione, pari a 4.1 m/s lungo la direzione parallela al nastro stesso (12°); come si può notare in figura 9.3 si

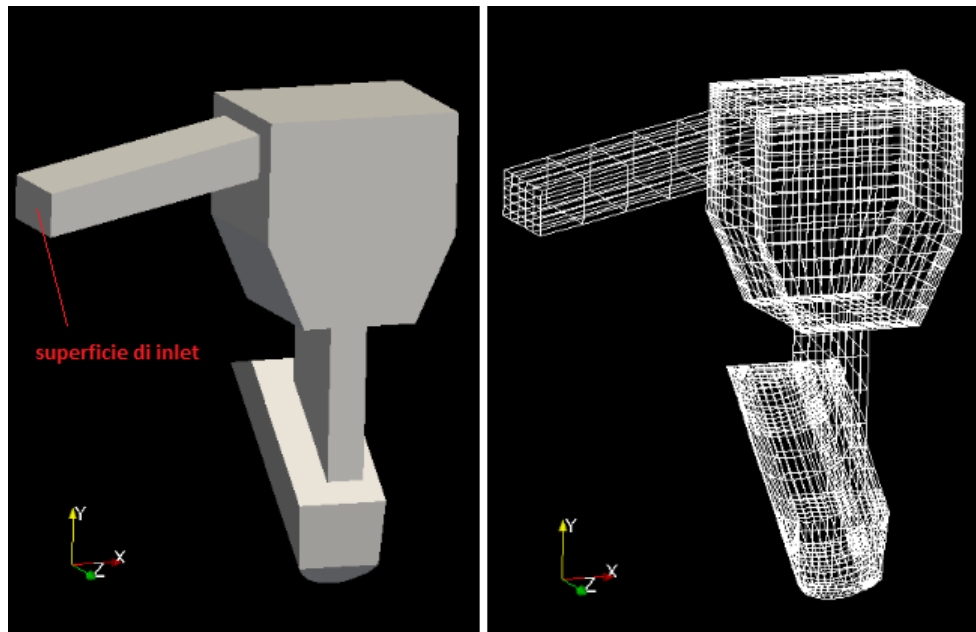


Figura 9.2: Geometria modificata e superficie di inlet

è ottenuta un'ottima approssimazione, avvicinandosi notevolmente al valore di velocità desiderato pari a 1.93 m/s .

È inoltre da sottolineare come questa configurazione fisico-geometrica del nastro, rappresenti comunque una più che valida schematizzazione di un nastro reale, poiché le particelle, fatta eccezione per il transitorio iniziale, sono caratterizzate da una velocità omogenea durante tutto il tragitto, così come nell'applicazione reale, ove sono trascinate solidalmente dal nastro in cima alla bocca dell'altoforno (figura 9.3).

9.3 Validazione del modello

Come si può ben comprendere, date le caratteristiche del lavoro in oggetto, la fase di post-processing consiste unicamente nella validazione della simulazione realizzata tramite confronto con l'andamento reale delle fasi di carica.

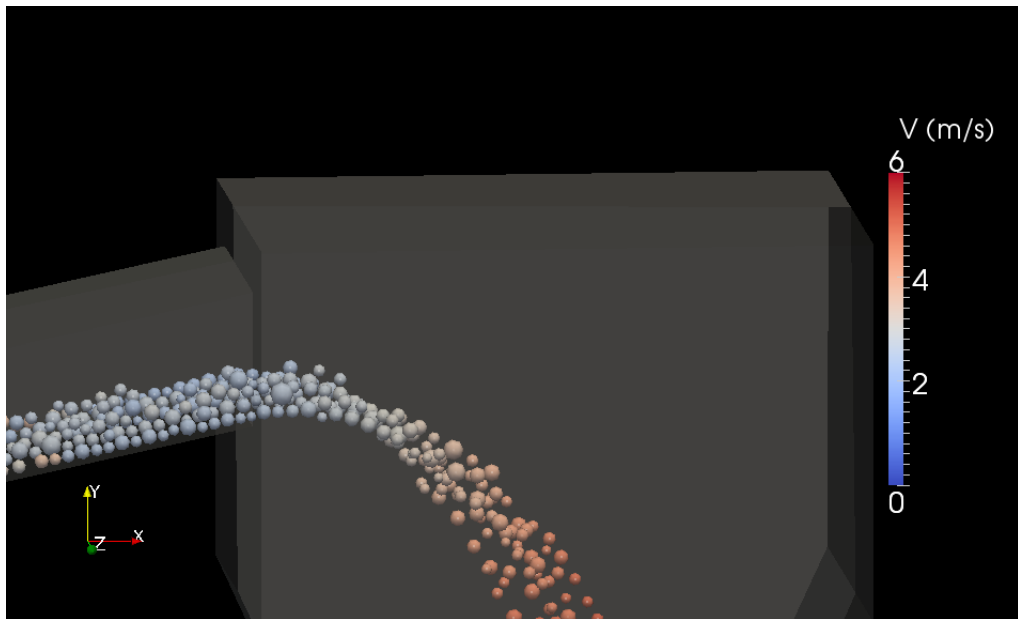


Figura 9.3: Velocità delle particelle al termine del nastro di caricamento

Si mostrano di seguito i risultati ottenuti, focalizzando l'attenzione sull'impatto tra il flusso di massa in ingresso e la ston-box (figura 9.5) ed in particolare sulla velocità del flusso di massa nel passaggio attraverso il tilting rocker (figura 9.6).

Dai risultati ottenuti si può notare come il sistema di caricamento realizzato presenti un comportamento fedele a quello reale, in termini di velocità e traiettoria. Il flusso di massa in caduta dal nastro, assume infatti, così come ci si aspetta, una traiettoria parabolica che permette nella fase iniziale della simulazione, l'accumulo di materiale e la conseguente formazione della ston-box, mentre successivamente garantisce l'impatto tra il materiale in caduta e la ston-box stessa. Come argomentato precedentemente, questo aspetto è di fondamentale importanza per il sistema di caricamento, in quanto protegge i componenti del sistema da una rapida usura, dovuta all'impatto diretto con il materiale di carica. Anche dal punto di vista cinematico il sistema simulato rispecchia l'andamento reale; si sono ottenuti infatti, valori di velocità prossimi a quelli reali, come mostrato ad esempio, nel paragrafo preceden-

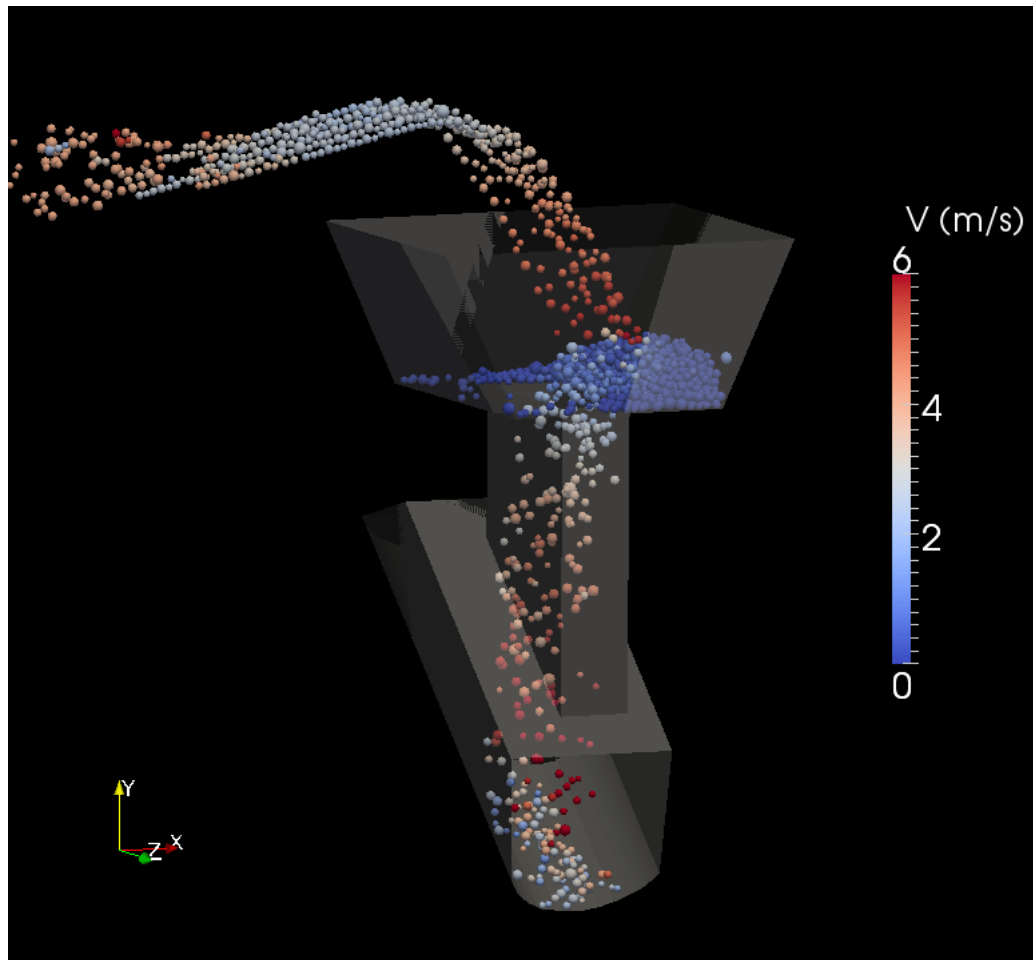


Figura 9.4: Panoramica del modello realizzato durante le fasi di caricamento

te, per la velocità del flusso in caduta dal nastro. La simulazione realizzata permette inoltre di comprendere l'importanza del deflettore ceramico: questo infatti assolve il compito di incanalare il flusso verso la fascia centrale della concavità del tilting rocker così da conferire alle particelle una traiettoria lineare nella caduta verso il silo in riempimento. Se così non fosse, il flusso assumerebbe traiettorie elicoidali, rallentando le fasi di carica del forno. Anche quest'ultima caratteristica, propria del sistema reale, è ampiamente soddisfatta durante la simulazione come mostrato in figura 9.7.

Un ulteriore riscontro è stato ottenuto in seguito ad un'ispezione presso

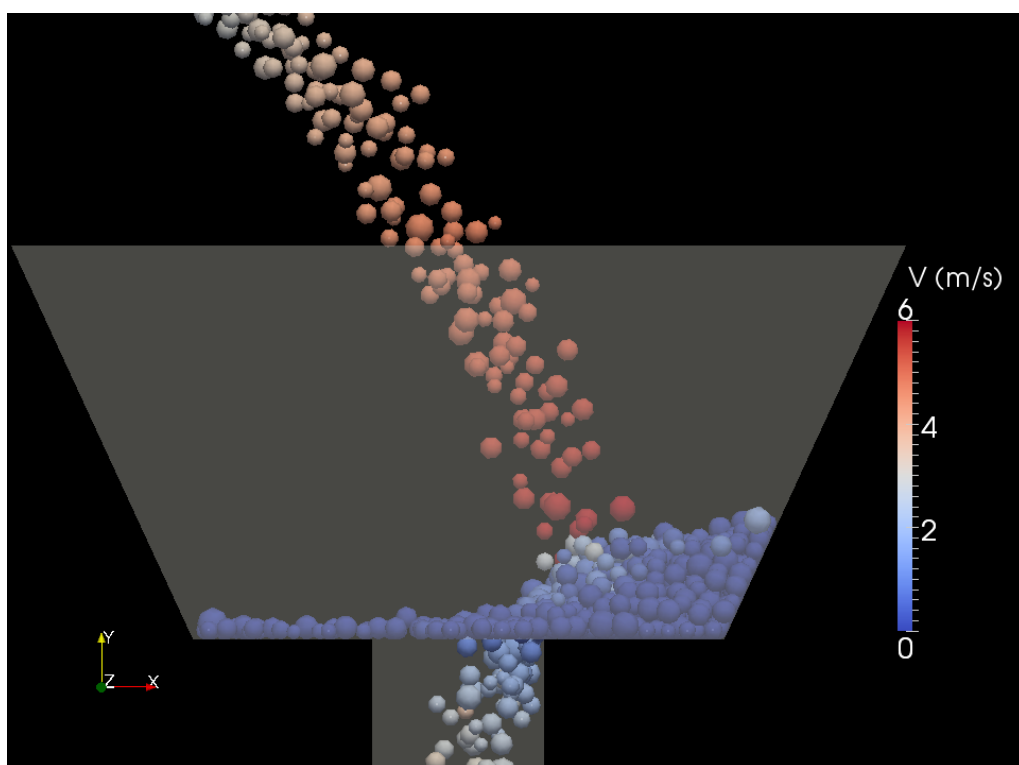


Figura 9.5: Impatto tra il flusso di massa e la ston-box

l'altoforno n.4, oggetto del mio studio, durante la quale è stato realizzato un breve video nelle fasi di caricamento. In figura 9.8 è riportato uno screenshot durante il passaggio della carica, in questo caso coke, attraverso il tilting rocker. Si può facilmente notare come la carica di coke ricalchi unicamente la fascia centrale dello scivolo ed assume una traiettoria lineare così come ottenuto nella simulazione presentata.

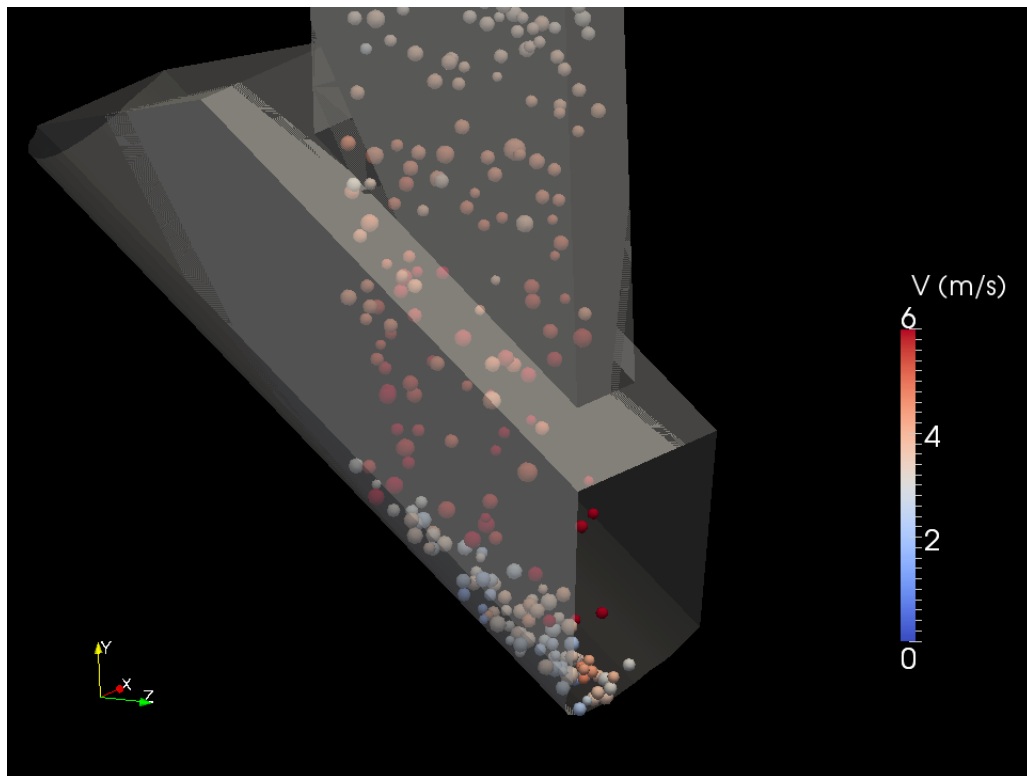


Figura 9.6: Velocità del flusso di massa nel passaggio attraverso il tilting rocker

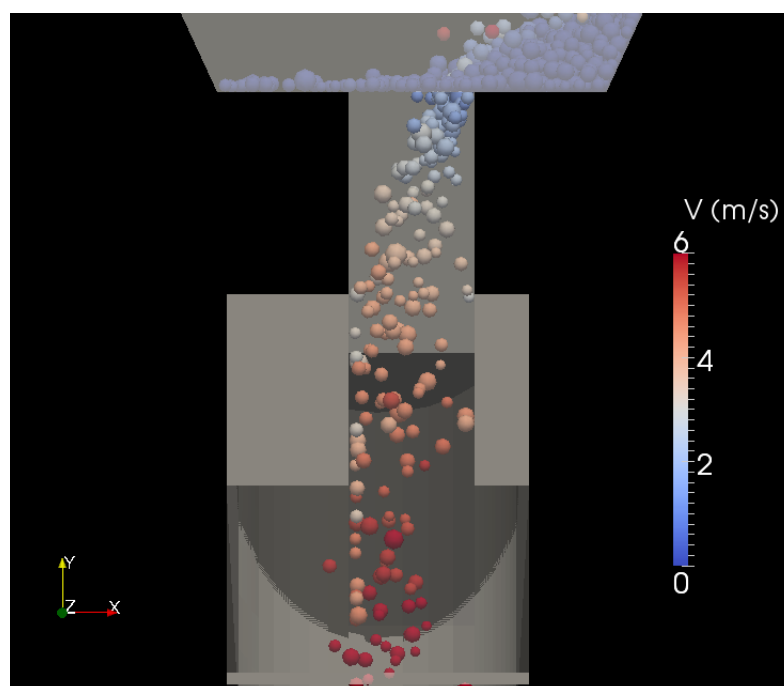


Figura 9.7: Andamento del flusso di materiale in presenza del deflettore

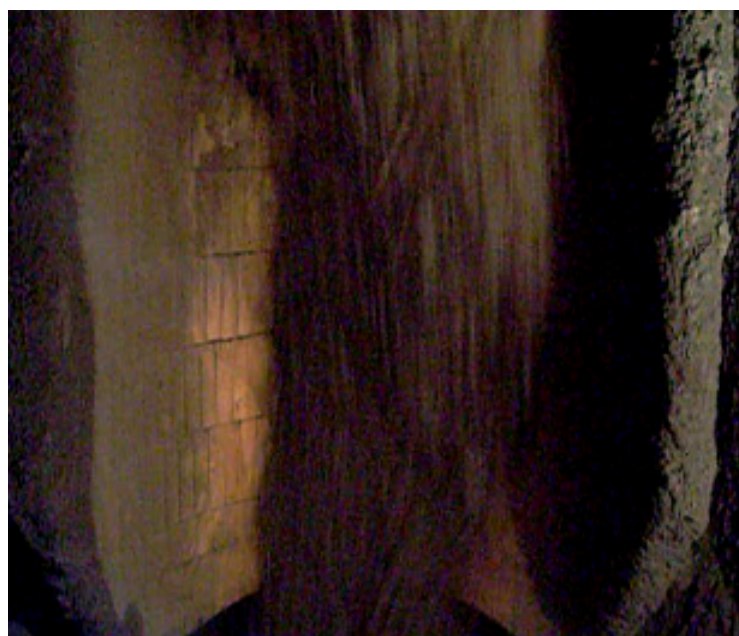


Figura 9.8: Andamento reale del flusso durante le fasi di caricamento

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi è dedicato allo studio, tramite accoppiamento CFD-DEM, del flusso di particelle durante le fasi di carica di un altoforno. In special modo questo lavoro ha avuto come obiettivo la realizzazione di una simulazione che ben rappresenti il passaggio del flusso di massa attraverso il tilting rocker, ovvero uno dei principali componenti del sistema di caricamento di un altoforno moderno.

Tale tema è particolarmente interessante nell'ambito della ricerca e sviluppo di un complesso siderurgico, poiché il buon funzionamento dell'apparato di caricamento di un altoforno è fondamentale per il conseguimento di un'elevata produttività e di una discreta qualità della ghisa e quindi dell'acciaio prodotto.

L'intero lavoro è stato realizzato presso lo stabilimento siderurgico ILVA di Taranto dal Marzo 2012 a Settembre 2012; ciò è stato di fondamentale importanza nella stesura di questa tesi, poiché mi ha permesso di toccare con mano e comprendere a fondo quei concetti teorici appresi nel corso delle lezioni.

Nei primi capitoli, in seguito ad una dovuta introduzione al processo e ai componenti principali dell'altoforno, si è realizzato un excursus circa i costituenti della carica del forno stesso, ovvero minerale di ferro e carbon coke. In particolare si sono analizzati, per entrambi, il ciclo di produzione e le principali proprietà necessarie prima dell'immisione nell'altoforno.

Dopo la dovuta ricerca bibliografica, è stato affrontato nel capitolo [6] il problema posto dall'azienda, optando per l'utilizzo del software OpenFOAM.

Si sono descritte dunque le funzionalità e i pregi dello stesso OpenFOAM, focalizzando in particolare l'attenzione sulla directory principale e su quei campi da customizzare in base al lavoro in questione. Il passo successivo è stata l'identificazione e la comprensione del modello fisico utilizzato dal risolutore, ovvero il Modello di Voigt.

Si è successivamente realizzata, come in un qualsiasi lavoro CFD-DEM, la geometria e la griglia di calcolo della porzione del sistema di caricamento di interesse, ovvero la tramoggia trapezoidale, deflettore e tilting rocker. La realizzazione della geometria è risultata essere particolarmente dispendiosa, a causa dell'impossibilità di importare in OpenFOAM l'intero sistema di caricamento realizzato con un sistema cad; OpenFOAM prevede infatti per la definizione del dominio di calcolo la dichiarazione di ogni singolo vertice, spigolo e superficie costituente la stessa geometria.

Infine dopo aver opportunamente definito il modello implementato nel risolutore si è generato l'output, seguito da un'attenta analisi dei risultati così da poter effettuare un confronto con le reali fasi di caricamento di un altoforno.

Dopo aver ottenuto i primi riscontri è stato necessario, come argomentato nel capitolo [9], apportare alcune modifiche; in particolar modo si è ulteriormente ampliato il dominio di calcolo, addizionandovi parte del treno nastri, necessario per direzionare la carica fino alla bocca dell'altoforno. In seguito all'introduzione di quest'ulteriore componente del sistema di caricamento, si sono ottenuti ottimi risultati: le particelle, rappresentanti coke o agglomerato, seguono un andamento prossimo a quello reale.

Al fine di accertare la bontà dei risultati ottenuti, è stata di grande importanza un'approfondita ispezione al sistema di caricamento dell'altoforno n.4 dello stabilimento ILVA di Taranto che ha permesso di comprendere ancor meglio le fasi di caricamento di un altoforno moderno e di poter validare il modello da me realizzato.

Un ulteriore sviluppo potrebbe essere quello di realizzare l'intero sistema di caricamento, di cui fanno parte anche i sili di carica ("hopper") e il "rota-

ting distributing chute”, ovvero uno scivolo rotante che permette di caricare l’altoforno con strati alternati di coke e ferriferi in maniera omogenea, come argomentato nel capitolo [5]. Nonostante i buoni risultati ottenuti nella realizzazione del nastro trasportatore, di cui al capitolo [9], si potrebbe inoltre tramite opportuno software, modellizzare con più accuratezza il nastro stesso, focalizzando l’attenzione soprattutto sulla parte cinematica, parzialmente trascurata in questo lavoro in quanto non oggetto di ricerca.

Riassumendo si possono sostanzialmente estrapolare, dai risultati ottenuti, informazioni circa la velocità assunta dalle particelle e la traiettoria delle stesse; entrambe le informazioni sono di fondamentale importanza per una riuscita ottimale del processo di carica del forno e per una buona previsione per ciò che concerne la sostituzione degli usurabili dello stesso sistema di caricamento, quali ad esempio la piastra di rivestimento del deflettore.

Un interessante sviluppo futuro potrebbe infatti consistere nello studio e nella realizzazione di un modello che quantifichi l’usura di quei componenti soggetti al passaggio del flusso, che impatta e danneggia lo strato ceramico del deflettore e del tilting rocker, appositamente studiato per essere sostituito durante le fermate programmate dell’altoforno. Presumibilmente la funzione di usura sarà dipendente dalla velocità e della traiettoria assunta dal letto di particelle; si potrebbe studiare dunque un “accoppiamento” tale da minimizzare l’usura stessa così da sostenere un minore impiego di usurabili ed aumentarne l’efficienza nel caricamento.

Bibliografia

- [1] Y. Omori, *Blast Furnace Phenomena and Modelling*, Elsevier Applied Science, London and New York, (1987).
- [2] M. Geerdes, H. Toxopeus, C. van der Vliet, *Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction*, Verlag Stahleisen, GmbH, (2004).
- [3] A. Ghosh, A. Chatterjee, *Ironmaking and Steelmaking: Theory and Prattice*, Phi, (2008).
- [4] A. T. Adema, Y. Yang, R. Boom, *Simulation of the Materials Flow in an Iron-making Blast Furnace*, ISIJ International, vol.50, No.7, pag. 954-961 (2010).
- [5] P. Golz, J. Favier, *DEM-CFD Modelling of Solid-Fluid Flows*, sito, Edinburgh (2009).
- [6] R. DiFelice, *Int. J. Multiphase Flow*, 20 (1994).
- [7] S. Natsui, S. Ueda, H. Nogami, J. Kano, R. Inoue, T. Ariyama, *Dynamic Analysis of Gas and Solid Flows in Blast Furnace with Shaft Gas Injection by Hybrid Model of DEM-CFD*, ISIJ International, vol. 51, n.1, pag. 51-58, (2011).
- [8] C. Mapelli, W. Nicodemi, *Siderurgia*, Zanichelli,(2010).
- [9] S. Natsui, S. Ueda, H. Nogami, J. Kano, R. Inoue, T. Ariyama, *Simultaneous Three-dimensional Analysis of Gas-Solid Flow in Blast Furnace*

- ce by Combining Discrete Element Method and Computational Fluid Dynamics*, ISIJ International, vol. 51, n.1, pag. 41-50, (2011).
- [10] C. Kloss, C. Goniva *Liggths: a New Open Source DEM Simulation Software*, Delft, March 16th, (2010).
- [11] K. Yoshimasa, T. Jimbo, T. Joko, Y. Aminago, T. Inada, *Investigations of Bell-Less Charging Based on Full Scale Model Experiments*, Trans. ISIJ, vol. 24, pag. 799, (1984).
- [12] H. Mio, S. Komatsuki, M. Akashi, A. Shimosaka, Y. Shirakawa, J. Hidaka, M. Kadowaki, S. Matsuzaki, K. Kunitomo, *Validation of Particle Size Segregation of Sintered Ore during Flowing through Laboratory-scale Chute by Discrete Element Method*, ISIJ International, vol. 48, n.12, pag. 1696-1703, (2008).