

FONDERIE LEGHE FERROSE E NON FERROSE

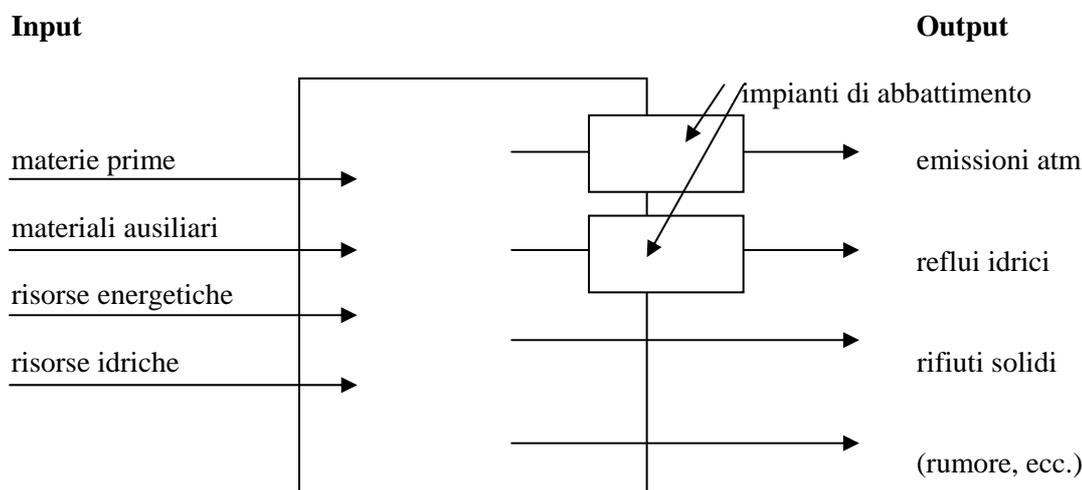
CAPITOLO 4 IMPATTO E RISCHIO AMBIENTALE DEL COMPARTO

- 4.1. Consumo delle risorse**
- 4.2. Matrici ambientali interessate dagli impatti**
- 4.3. Fattori di impatto**
- 4.4. Evidenze e orientamento della prevenzione**

4.1 Consumo delle risorse

Per inquadrare l'attività delle fonderie si fa riferimento allo schema sintetico presentato in Figura 4.1, quantificando il consumo di risorse e i fattori di impatto con riferimento a 1 unità di prodotto (getto) o a 1 unità di ghisa colata.

Figura 4.1. Schema sintetico per individuare i carichi ambientali dell'attività di fonderia



**Tabella 4.1. Fonderie di ghisa e di acciaio. Formatura (7 unità produttive)
Materie prime, materiali ausiliari, consumo di risorse (intervallo dei valori rilevati)**

| | input | |
|--|---------|---|
| FORMATURA A RESINA | | |
| Sabbie silicee (kg/ t getto) | 117-996 | Impiego con riciclo |
| Resine (kg/ t getto) | 19-36 | 3,0-4,0 con formatura "no-bake" |
| Catalizzatori (kg/ t getto) | 10-12 | 1,6 con formatura "no-bake" |
| Distaccante (kg/ t getto) | 2-10 | |
| Solventi pulitura attrezzature (kg/ t getto) | 0,26 | |
| Vernice forme e anime (kg/ t getto) | 6,7-10 | |
| Solvente alcoolico (kg/ t getto) | 0,66 | |
| Colle (kg/ t getto) | 0,70 | |
| FORMATURA FORME A VERDE | | |
| Terre (kg/ t getto) | 1550 | Totale terre lavorate |
| Sabbie silicee (kg/ t getto) | 64-228 | A cui si aggiunge il riciclo interno (ca 85%) |
| Sabbie premiscelate (kg/ t getto) | 18 | |
| Nero minerale (kg/ t getto) | 5-35 | |
| Bentonite (kg/ t getto) | 15-91 | |
| Acqua raffreddamento (mc/ t getto) | 95 | Circuito di raffreddamento a ciclo aperto |
| FORMATURA ANIME A VERDE | | |
| Sabbie silicee e cromite (kg/ t getto) | 32 | |
| Sabbie prerivestite (kg/ t getto) | 54 | |
| Agglomerante (kg/ t getto) | 2 | |
| Reagente (kg/ t getto) | 0,30 | |
| VERNICIATURA | | |
| Vernice forme e anime (kg/ t getto) | 2 | |
| Solvente alcoolico (kg/ t getto) | 0,24 | |
| Colle (kg/ t getto) | 0,12 | |

Risulta evidente l'elevata variabilità dei consumi specifici, in particolare dei materiali ausiliari destinati alla formatura, che dipende dalla tecnica di colata, ma soprattutto dalla forma e dal peso del getto colato.

Tabella 4.2. Fonderie di ghisa e di acciaio. Fusione e colata (7 unità produttive)
Materie prime, materiali ausiliari, consumo di risorse (intervallo dei valori rilevati)

| | input | |
|--|--------------|--|
| FUSIONE E COLATA | | |
| Ghisa in pani (kg/ t ghisa) | 111-656 | a cui si aggiunge il riciclo interno |
| Rottami ferrosi (kg/ t ghisa) | 623-840 | a cui si aggiunge il riciclo interno |
| Ferroleghie (kg/ t ghisa) | 38-54 | |
| Coke (kg/ t ghisa) | 92-260 | In cubilotto |
| Energia elettrica (kWh/ t ghisa) | 500-600 | forno elettrico a induzione a crogiolo |
| Energia elettrica (kWh/ t ghisa) | 25-30 | Mantenimento: forno induzione a canale |
| Energia elettrica (kWh/ t ghisa) | 50-70 | Mantenimento: forno induzione a crogiolo |
| Energia elettrica (kWh/ t acciaio) | 500-600 | forno elettrico a induzione a crogiolo |
| Energia elettrica (kWh/ t acciaio) | 600-700 | forno induzione a crogiolo |
| | | |
| Ricarburante (kg/ t ghisa) | 30 | |
| Calcare (kg/ t ghisa) | 36-72 | |
| Ossigeno (mc/ t ghisa) | 5,1-7,2 | In cubilotto |
| Inoculanti (kg/ t ghisa) | 67 | Destinate a ghise sferoidali |
| Polveri di copertura (kg/ t ghisa) | 1,7 | |
| Scorificanti (kg/ t ghisa) | 0,38-0,77 | |
| | | |
| <i>Input energia totale (MJ/ t getto ghisa grigia)</i> | <i>10465</i> | <i>Intervallo: 4190-12558</i> |
| <i>Input energia totale (MJ/ t getto ghisa sferoidale)</i> | <i>20930</i> | <i>Intervallo: 16744-25116</i> |
| <i>Input energia totale (MJ/ t getto acciaio)</i> | <i>18837</i> | <i>Intervallo: 12558-25116</i> |

Anche per quanto concerne la fase di fusione è possibile apprezzare l'ampia differenza fra la natura e la quantità delle risorse materiali ed energetiche implicate dai diversi forni.

Tabella 4.3. Fonderie di ghisa e di acciaio. Finitura. Manutenzione (5 unità produttive)
Materie prime, materiali ausiliari, consumo di risorse (intervallo dei valori rilevati)

| | input | |
|--|-----------------|--|
| FINITURA | | |
| Graniglia in acciaio (kg/ t getto) | 2,9-6,8 | |
| Vernice (kg/ t getto) | 9,4 | |
| Diluenti (kg/ t getto) | 3,7 | |
| Solventi (kg/ t getto) | 2,6 | |
| | | |
| RIFACIMENTI REFRAATTARI | | |
| Pigiata refrattaria (kg/ t getto) | 8 | Forni elettrici |
| Pigiata refrattaria (kg/ t getto) | 35 | Cubilotti |
| | | |
| MANUTENZIONE MECCANICA | | |
| Oli e grassi lubrificanti (kg/ t getto) | 0,65 | |
| | | |
| RISORSE IDRICHE (tutto lo stabilimento) | 4,4-10,0 | Ricircolo solo raffreddamento cubilotto |

Con l'inserimento di sistemi di riciclo delle acque di processo estesi a tutti gli impianti, il consumo per raffreddamento può essere limitato alla sola quota di evaporazione e di reintegro degli spurghi, stimabile in meno del 5% del consumo senza ricircolo.

Rimane una quota consumata dalla tecnica di formatura a verde e che viene restituita sostanzialmente sotto forma di vapore in particolare nelle successive fasi di distaffatura e di riciclo.

4.2 Matrici ambientali interessate dagli impatti

L'attività di fonderia esercita un impatto su molteplici matrici ambientali secondo lo schema seguente, nel quale sono state indicate esclusivamente le principali sorgenti e le principali tecnologie e configurazioni impiantistiche implicate da impatto significativo o critico.

| | |
|------------|---|
| MATRICE | - Sorgente di impatto |
| ARIA | <ul style="list-style-type: none"> Emissioni canalizzate - Impianti di fusione - Impianti di trattamento terre (formatura a verde) - Impianti di distaffatura - Impianti di formatura (formatura con resine) Emissioni diffuse - Approvvigionamento materie prime e stoccaggio (rottami, sabbie) - Impianti di fusione (caricamento e spillaggio forno elettrico ad arco) - Sivere (trattamento sferoidizzazione ghisa) - Colata (forme medio-grandi dimensioni) - Colata (impianti a carosello non aspirati) - Raffreddamento forme (impianti o postazioni non aspirate) - Impianti di formatura forme e anime (formatura con resine) |
| ACQUA | <ul style="list-style-type: none"> - Dilavamento coperture e superfici non pavimentate - Dilavamento rifiuti solidi stoccati con modalità improprie - Sversamenti sostanze chimiche |
| SUOLO | <ul style="list-style-type: none"> - Depositi "temporanei" di rifiuti solidi - Sversamenti sostanze chimiche |
| TERRITORIO | <ul style="list-style-type: none"> Rumore - Impianti di fusione (forno elettrico ad arco) - Impianti di formatura a vibroscossa - Impianti di distaffatura Vibrazioni - Impianti di formatura a vibroscossa |

Aria

Per quanto concerne l'inquinamento atmosferico si evidenzia una criticità nella fase di fusione legata all'eventuale presenza di cariche sporche.

Le emissioni aerodisperse possono essere caratterizzate con riferimento alle diverse fasi di lavorazione, distinguendo emissioni canalizzate, e presidiate da impianti di abbattimento, ed emissioni non canalizzate e quindi direttamente uscenti dall'involucro dell'attività come emissioni diffuse.

Il contributo delle emissioni canalizzate, per quanto concerne i quantitativi di sostanze rilasciate in atmosfera, dipende in misura sostanziale dalle caratteristiche di abbattimento e dalla frequenza di regimi di anomalo funzionamento dei filtri, che possono comportare importanti quantitativi emessi in breve tempo.

Le emissioni non canalizzate costituiscono, anche per questa tipologia produttiva, un rilevante contributo che deriva da molteplici sorgenti.

Si segnalano le emissioni diffuse che si sviluppano durante le fasi di colata e di raffreddamento dei getti, per particolari tipologie produttive con presenza di anime realizzate con resine organiche, in concomitanza di configurazioni impiantistiche dove non sia prevista il completo presidio di tutte le aree di emissione.

Le emissioni che derivano dalla fase di fusione sono costituite da polveri, ossido di carbonio, anidride solforosa e bassi quantitativi di cloruri e fluoruri. Dalla carica possono generarsi composti organici, che si sommano alle emissioni di ossidi metallici.

Nel caso di impiego di forno elettrico ad arco, si configurano condizioni di emissione analoghe a quelle descritte per la produzione di acciaio. Dal punto di vista quantitativo le situazioni sono però estremamente differenziate, in quanto nelle fonderie si osservano processi metallurgici con produttività ridotte (10-20 t/ora) a fronte di quella raggiunta nella produzione destinata alla colata continua: questo si traduce in eventi

critici con una intensità e frequenza più ridotta. La ridotta produttività, rispetto al comparto acciaio, rende più difficilmente proponibili integralmente le soluzioni di captazione previste per presidiare la fase di carica.

I sistemi di controllo per le frazioni solide comunemente inseriti con tutte le tipologie di forno sono i filtri a manica. Con cicloni e scrubber a umido si individua efficienza di abbattimento inferiore, compatibile per i fattori di emissione più contenuti, tipicamente dei forni a induzione.

Una fase molto critica, dovuta alle consistenti emissioni, si determina anche nel caso di trattamento effettuato in siviera di sferoidizzazione della ghisa: la reazione esotermica provoca una violenta emissione di fumi.

Tabella 4.4. Composizione tipica delle polveri emesse da un forno a cubilotto per ghisa

| Costituente | % (in peso) |
|--------------------------------------|-------------|
| Fe ₂ O ₃ + FeO | 29-34 |
| CaO | 15 |
| MgO | 15 |
| Basi solubili | 11 |
| Cr ₂ O ₃ | 9 |
| SiO ₂ | 4 |
| MnO | 3 |
| C | 1-2 |
| PbO | 0.04 |

Gli impianti di colata, in particolare durante le fasi di solidificazione e di raffreddamento, si caratterizzano per le emissioni diffuse, che possono coinvolgere numerosi prodotti di combustione e di degradazione termica dei leganti organici utilizzati per la formatura (idrocarburi, ammoniaca, acido cianidrico, aldeidi, fenolo, ecc.): queste emissioni costituiscono, in alcune configurazioni, un complesso problema per quanto concerne la captazione e il contenimento delle emissioni irritanti e odorose.

Gli impianti di formatura e di preparazione anime implicano emissioni organiche nel caso di impiego di leganti organici: si evidenzia la presenza di aldeidi, fenolo, ammoniaca, solventi alifatici e solventi aromatici. La tecnologia di captazione e abbattimento può non essere adeguata per emissioni diffuse irritanti e odorose.

Gli impianti di preparazione terre, di distaffatura e di sterratura si caratterizzano per emissioni costituite sostanzialmente da polveri e in misura ridotta da composti organici, da circoscrivere alla fase di distaffatura.

Per i componenti dell'impianto terra (nastri, sili, tramogge, molazze, ecc.) le captazioni delle polveri e degli inquinanti organici possono essere opportunamente risolte con soluzioni di buona tecnica, tramite l'inserimento di aspirazioni localizzate e con la segregazione di alcune parti dell'impianto. Risulta più problematico risolvere correttamente la captazione per gli impianti di distaffatura, nel caso l'operazione implichi complesse movimentazioni dei getti di peso significativo.

Acqua. Suolo

Si evidenziano le problematiche connesse alla preparazione e alla gestione delle terre destinate alla preparazione delle forme e alle lavorazioni di solidificazione, di pulizia e finitura dei getti.

Figura 4.2. Piazzali esterni. Depositi non tutelati rispetto al dilavamento meteorico di terre di fonderie (“depositi temporanei”) e di cassoni con forme in resina non idonee. Figura 4.3. Sottofondi adiacenti a impianti produttivi realizzati con terre di fonderia esauste: conseguente inquinamento delle acque per dilavamento e del suolo



4.3. Fattori di impatto

Con gli output si individuano i fattori di impatto dell'attività, che possono essere quantificati sia a monte che a valle di tipici sistemi di abbattimento e/o depurazione, tenendo conto di eventuale riciclo effettuato all'interno dell'attività produttiva per acqua e rifiuti (previo eventuale trattamento).

Tabella 4.5. Fonderie di ghisa e di acciaio (7 unità produttive)
Fattori di emissione, reflui idrici, fattori di generazione di rifiuti (intervallo dei valori rilevati)

| | output | |
|--|-----------|--|
| FUSIONE (CUBILOTTI) | | |
| Polveri (g/ t ghisa) | 3-20 | Emissione canalizzata dopo filtrazione a secco |
| Biossido di zolfo (g/ t ghisa) | 16 | (Emissione canalizzata dopo filtrazione a secco) |
| Fumi cubilotto (kg/ t ghisa) | 22-59 | |
| Fumi cubilotto (kg/ t ghisa) | 100-150 | Rifiuto P (pericoloso) (*) |
| Altri fumi (kg/ t ghisa) | | Rifiuto NP (*) |
| Scoria cubilotto (kg/ t ghisa) | 50-100 | Rifiuto NP (non pericoloso) (*) |
| Refrattari cubilotto (kg/ t ghisa) | 1-2 | Rifiuto NP+P (*) |
| FUSIONE (FORNO ELETTRICO INDUZIONE) | | |
| Emissione canalizzata (g polveri/ t acciaio) | 4-65 | Dopo filtrazione a secco |
| Fumi forno elettrico induzione (kg/ t ghisa) | 2-13 | |
| Scoria forno elettrico induzione (kg/ t ghisa) | 33-55 | |
| FORMATURA A RESINA | | |
| Fenoli (g/ t getto) | 16 | Emissione canalizzata dopo abbattimento a umido |
| Aldeidi (g/ t getto) | 210 | Emissione canalizzata dopo abbattimento a umido |
| Scarti lavorazione anime (kg/ t getto) | 6 | |
| Sabbie da anime termoindurenti (kg/ t getto) | 110-150 | |
| Forme e anime da formatura (kg/ t ghisa) | 300-850 | Rifiuto NP+P (*) |
| IMPIANTO TERRE | | |
| Polveri (g/ t getto) | 80-95 | Emissione canalizzata dopo filtrazione a umido |
| Biossido di zolfo (g/ t getto) | 360-1800 | Emissione canalizzata dopo filtrazione a secco |
| Fanghi (kg/ t getto) | 10-14 | da impianto di abbattimento a umido |
| Terre da impianto di rigenerazione (kg/ t getto) (1) | 396-527 | Sabbie con resine organiche |
| Terre da impianto di rigenerazione (kg/ t getto) (1) | 118-330 | Terre a verde |
| FINITURA | | |
| Polveri (kg/ t getto) | 3-12 | Rifiuto dopo abbattimento a secco |
| Morchie vasca verniciatura (kg/ t getto) | 0,7-0,9 | |
| Oli esausti (kg/ t getto) | 0,02-0,04 | |

(*) fonte APAT

(1) per quanto concerne il trattamento di rigenerazione, che può essere installato nell'insediamento oppure localizzato esternamente all'attività produttiva, si può fare riferimento a una resa del processo attorno all'85% del materiale in ingresso.

4.4 Evidenze e orientamento della prevenzione

L'industria di fonderia è un settore differenziato in maniera abbastanza significativa.

Una distinzione fra le diverse configurazioni deve essere fatta in base ad alcuni parametri discriminanti l'attività:

- innanzitutto in relazione al tipo di metallo fuso, ferroso o non ferroso;
- in base alla tecnologia di fusione del metallo;
- in merito al tipo di formatura, in forma permanente o in forma a perdere;
- in merito alla tecnologia di formatura;
- in merito alla tipologia di prodotto (peso, geometria, dimensione della serie) che rende fattibile dal punto di vista tecnologico ed economico l'introduzione di sistemi meccanizzati e di sistemi automatizzati di diverso livello.

Risulta evidente che ciascuna fonderia può essere considerata come una combinazione di diversi requisiti produttivi richiesti a cui si risponde con diverse tecniche fusorie e con diversi sistemi di formatura.

Quindi la scelta delle tecnologie disponibili più efficaci dal punto di vista della prevenzione è estremamente complessa ed è il risultato di una serie di vincoli da cui non è possibile prescindere, dovendo adattare i risultati ai differenti tipi di installazioni.

In questa sede si intendono sottolineare alcuni di questi aspetti con importanti implicazioni, non solo per l'impatto ambientale direttamente implicato dall'attività produttiva e dall'impatto ambientale indirettamente implicato (si pensi alla scelta dei diversi vettori energetici e di materie prime e materiali ausiliari diversi)

Stoccaggio e manipolazione delle materie prime

Gli aspetti rilevanti da un punto di vista ambientale sono legati alle varie modalità con le quali vengono stoccati e movimentati i materiali metallici ferrosi e non, il coke, le terre e le sabbie, i leganti e gli additivi per la formatura. Le fasi di stoccaggio e manipolazione delle materie prime sono comuni a tutti i tipi di fonderia; indipendentemente dalla produzione specifica.

Interventi di minimizzazione dell'impatto prevedono di:

- Adottare stoccaggi separati per i vari materiali in ingresso, prevenendo deterioramenti e pericoli.
- Effettuare lo stoccaggio dei rottami e dei ritorni interni su superfici impermeabili e dotate di sistemi di raccolta e trattamento del percolato. In alternativa lo stoccaggio può avvenire in aree coperte.
- Effettuare un riutilizzo interno dei bocconi e dei ritorni di lavorazione.
- Stoccare i leganti chimici in aree coperte, dotate di sistemi di aerazione e di raccolta dei liquidi spillati.
- Stoccare separatamente i vari tipi di residui e rifiuti, in modo da favorirne il corretto riutilizzo, riciclo o smaltimento.
- Utilizzare di modelli di simulazione, modalità di gestione e procedure per massimizzare la resa dei metalli e ottimizzando i flussi materiali dell'impianto.

Fusione e trattamento del metallo

Si fa riferimento a quanto già sottolineato nel Capitolo 3.3 "*Preparazione metallo. Trattamenti metallo fuso*", in merito alle variabili in base alle quali articolare la scelta del forno. In questo paragrafo si vogliono sottolineare anche input e output dei diversi tipi di forno e le specificità dell'impatto ambientale che implicano le diverse tipologie.

Per la fusione dell'acciaio si utilizzano sia forni elettrici ad arco (EAF) che forni a induzione (IF) con criteri di scelta basati su ragioni tecniche (capacità, tipologia di acciaio, ecc.) ed economiche. Grazie alla notevole capacità di affinazione, l'EAF permette la fusione di materiali di recupero di bassa qualità, i quali rappresentano un vantaggio in termini di riciclo, ma che tuttavia richiedono un appropriato trattamento delle emissioni attraverso un sistema di depurazione.

Particolarmente critica diventa la problematica della captazione da inserire per un forno che non fornisce i livelli di produzione che si ottengono in acciaieria.

1. forno a cubilotto:
 - a. forni a vento freddo;
 - b. forni a vento caldo;
 - c. forni a lunga durata;
2. forno ad arco elettrico;
3. forno ad induzione:
 - a. senza nucleo;
 - b. a canale;
4. forno rotativo;
5. forno a suola e/o a riverbero;
6. forno a tino;
7. forno a crogiolo;
8. forno a volta radiante.

Forni a cubilotto: forni a vento freddo

Il cubilotto è un forno a tino con rivestimento refrattario nel quale la carica metallica è riscaldata dalla combustione del coke, che avviene nella parte inferiore del forno. L'aria di combustione è iniettata nel "cuore" attraverso appositi ugelli dotati di una valvola di controllo che permette di regolare il flusso d'aria. Il forno è detto a vento freddo perché l'aria di combustione è a temperatura e pressione ambiente.

Una volta che la carica metallica ha raggiunto la zona di combustione, il metallo comincia a fondersi e a colare attraverso il coke, fino a raggiungere una zona sottostante la zona di combustione (crogiolo). Tutte le impurità sono intrappolate nella scoria grazie agli agenti fondenti. La scoria ha una densità minore del metallo fuso e quindi galleggia sopra e può essere agevolmente separata. Una volta che il metallo liquido ha raggiunto un determinato livello, si apre il foro di colata e si riempie la siviera, oppure si trasferisce il metallo fuso in un forno di mantenimento.

Il rivestimento refrattario del cubilotto a vento freddo dura soltanto per una campagna di fusione, a causa del calore che si sviluppa e dell'azione chimica della scoria; per tale motivo ove richiesta una produzione giornaliera continuativa, il reparto fusorio è dotato di una coppia di forni.

Tabella 4.6. Flussi di materia ed energia per un forno a cubilotto

| Flussi in entrata | Flussi in uscita |
|--|--|
| Materiali ferrosi (ghisa in pani, rottami di acciaio e di ghisa, ricicli interni) Ferroleghie e metalli alliganti Flussi (castina, scarificanti, desolforanti, ...) Energia (coke, gas, olio combustibile, elettricità) Ossigeno Acqua di raffreddamento Acqua Refrattari | Lega metallica fusa (ghisa) Emissioni in atmosfera Scorie Rifiuti di refrattario |

Vantaggi

- Costi di investimento contenuti (12500-15000 euro/t di capacità produttiva oraria)
- Flessibilità nei materiali di carica utilizzabili
- Efficienza termica accettabile

Svantaggi

- Rigidità del regime produttivo (cambio tipologia di lega)
- Elevato costo della carica dovuta alle maggiori percentuali di ghisa in pani richieste
- Elevati costi ambientali
- Necessità di impianti di depolverazione di dimensioni adeguate agli alti volumi di emissioni prodotte

Forni a cubilotto: forni a vento caldo

Costruttivamente, questo cubilotto è uguale a quello a vento freddo; l'unica differenza è che l'aria di combustione è riscaldata. In questo modo si ottengono i seguenti vantaggi:

- Riduzione dei consumi di coke
- Incremento della temperatura del metallo
- Aumento della velocità di fusione
- Si può aumentare nella carica, la percentuale dei rottami di ferro rispetto alla ghisa, riducendo così i costi.

L'aria di combustione è riscaldata mediante calore recuperato dal forno stesso, oppure attraverso una fonte di calore esterna.

Gli investimenti per un forno ad aria calda sono molto maggiori rispetto a quelli necessari per uno ad aria fredda; per tale motivo, questo forno è economicamente conveniente solo quando si devono produrre più di 1000 t/mese di getti.

Vantaggi

- Consumi di coke contenuti
- Alte temperature di spillata
- Elevata produzione oraria
- Minore assorbimento di S nel bagno
- Minori costi della carica (maggiore utilizzo di materiali di recupero)

Svantaggi

- Maggiori costi di investimento
- Rigidità nel regime produttivo (difficoltà di cambio di lega)
- Elevati costi ambientali
- Necessità di impianti di depolverazione di dimensioni adeguate agli alti volumi di emissioni prodotte

Forni a cubilotto: forni a cubilotto a lunga durata

Questi forni a cubilotto possono essere sia a vento freddo che caldo.

La loro particolarità sta nel fatto di non avere un rivestimento refrattario all'interno, ma di avere le pareti del forno raffreddate ad acqua, fin sopra la zona del crogiolo di raccolta del metallo fuso. In questo modo il forno può funzionare in modo continuativo, anche per diversi mesi, poichè non c'è nessun materiale refrattario che si usura e che deve essere ripristinato. D'altra parte questo tipo di forno porta a perdite di calore di tenore elevato e quindi risulta conveniente quando si prevede una produzione con la massima continuità.

Forni ad arco elettrico

Il principio di funzionamento è lo stesso del forno utilizzato in acciaieria. La principale differenza risiede nel fatto di dovere alimentare un reparto di solidificazione in getti, e quindi l'esercizio di questo forno in fonderia non ha la necessità di acquisire le numerose evoluzioni tecnologiche rivolte soprattutto all'incremento di produttività.

Il forno ad arco elettrico è un forno nel quale il metallo è fuso attraverso il calore prodotto da un arco elettrico. Il metallo da fondere è posto nel tino ed è ricoperto da un coperchio, di materiale refrattario, attraverso il quale passano i tre elettrodi di grafite. Il metallo è fuso dal calore dell'arco elettrico che scocca tra i tre elettrodi di grafite e la carica che svolge la funzione di neutro. Una volta che il metallo è stato fuso, il forno viene svuotato ribaltandolo e versando il materiale attraverso un apposito canale.

Il rivestimento del forno acido (SiO₂) non sono più utilizzati, in quanto penalizzano l'affinazione di zolfo e fosforo; sono utilizzati rivestimenti di tipo basico (MgO e altri). La decarburazione del bagno viene effettuata introducendo ossigeno nel metallo fuso, tramite lance manovrate manualmente.

Tabella 4.7. Flussi di materia ed energia per un forno ad arco elettrico

| Flussi in entrata | Flussi in uscita |
|---|--------------------------------------|
| Materiali ferrosi (ghisa in pani, rottami di acciaio e ghisa, torniture, ricicli interni) | Lega metallica fusa (acciaio) |
| Ferroleghie e metalli alliganti | Emissioni in atmosfera |
| Flussi (castina, scorificanti, ...) | Scorie (CaO; SiO ₂ , MgO) |
| Energia (elettricità, gas, olio combustibile) | Rifiuti di refrattario |
| Ossigeno | |
| Elettrodi | |
| Acqua di raffreddamento | |

Forno a induzione senza nucleo

Questo tipo di forno è utilizzato per fondere metalli ferrosi e non. Il forno è rivestito internamente da materiale refrattario, che contiene al suo interno delle spire di rame raffreddate ad acqua, attraverso le quali passa la corrente. L'esterno del forno è racchiuso in una carpenteria di acciaio.

La frequenza della corrente che passa nelle spire dell'induttore influenza la penetrazione della corrente stessa all'interno del materiale da fondere. Quindi la frequenza di funzionamento influenza anche la dimensione (capacità) del forno. Con frequenze di 50 Hz si hanno forni di una portata non inferiore ai 750 kg; con frequenze di 10 kHz la capacità dei forni non va oltre i 5 kg.

Questo tipo di forno è utilizzato, di norma, per fondere il metallo, ma non per mantenerlo alla temperatura desiderata. Per questo tipo di operazioni si utilizzano preferibilmente, forni a induzione a canale.

Tabella 4.8. Flussi di materia ed energia per un forno ad induzione

| Flussi in entrata | Flussi in uscita |
|---|--|
| Materiali ferrosi (ghisa in pani, rottami di acciaio e di ghisa, torniture, ricicli interni) Ferroleghe e metalli alliganti Materiali carburanti e flussi (scorificanti, .) Energia elettrica Acqua di raffreddamento | Lega metallica fusa (ghisa, acciaio) Emissioni in atmosfera Scorie Rifiuti di refrattario |

Vantaggi

- Alta flessibilità nella produzione di varie tipologie di leghe
- Brevi tempi di fusione
- Basso impatto ambientale
- Basso manutenzione legata alla durata del rivestimento refrattario
- Buon controllo di processo con possibilità di computerizzazione, conseguente controllo ottimale delle temperature
- Intensa agitazione del bagno con omogeneizzazione del metallo fuso
- Semplicità delle operazioni di caricamento, campionamenti di verifica, scorifica
- Possibilità di operare come forno di attesa, seppur con bassa efficienza

Svantaggi

- Maggiori costi energetici rispetto a forni coi combustibili fossili
- Minore effetto di pulizia sul bagno dovuto al basso quantitativo di scorie e alla relativamente ridotta superficie di contatto fra metallo e scoria
- Alti costi di investimento
- Non adatti per alte produttività orarie

Forni a induzione a canale

Questo tipo di forno è costituito da un grosso bacino, isolato termicamente, equipaggiato con un coperchio amovibile, realizzato per permettere la carica del forno. Solitamente il forno ha anche un meccanismo idraulico che ne permette il basculamento per la spillata e la manutenzione.

Per funzionare, il forno richiede che sia sempre presente una quantità minima di metallo liquido al suo interno; per questo motivo la capacità del forno è sempre contrassegnata con due valori (ad es. 60/35 kg), in cui il primo valore contrassegna la capacità totale, mentre il secondo la capacità utile: la differenza tra i due è la quantità minima di metallo che deve essere presente nel forno.

Questo tipo di forno è utilizzato principalmente come forno di mantenimento del metallo fuso, in abbinamento con un forno fusorio (duplex)

Vantaggi

- Elevata efficienza termica come forno di attesa e surriscaldamento
- Minimo effetto di ossidazione degli elementi di lega
- Ridotta manutenzione

Svantaggi

- Presenza costante di una minima quantità di metallo fuso per garantirne il funzionamento
- Impossibilità di partenze a freddo
- Difficoltà di monitorare l'usura del canale
- Pericoli potenziali dovuti al perdite accidentali di acqua dalla bobina dell'induttore, difficili da poter prevenire

Forno rotativo

Questo forno consiste in un cilindro orizzontale, nel quale la carica metallica è fusa da un apposito bruciatore situato a una estremità, mentre i gas di scarico fuoriescono dal forno dalla estremità opposta. Durante il funzionamento, il forno ruota lentamente intorno al suo asse, in modo da permettere una omogenea distribuzione del calore al suo interno. Una volta che il metallo è stato fuso, si apre il foro di spillaggio, e il contenuto è trasferito nelle siviere o nei forni di mantenimento.

Il forno rotatorio può essere utilizzato per fondere sia ghisa che alluminio. È un forno che presenta bassi costi di investimento e una facile manutenzione; per contro ha lo svantaggio di bruciare, durante il suo funzionamento, elementi come C, Si, Mn e S, che devono essere ripristinati con apposite aggiunte prima o dopo la fusione.

Tabella 4.9. Flussi di materia ed energia per un forno rotativo

| Flussi in entrata | Flussi in uscita |
|---|--|
| Materiali ferrosi (ghisa in pani, rottami di acciaio e ghisa, torniture, ricicli interni) Ferroleghe e metalli alliganti Agenti carburanti e flussi (scarificanti, desolforanti, ...) Energia (gas, olio combustibile, elettricità) ossigeno Acqua di raffreddamento | Lega metallica fusa (ghisa) emissioni in atmosfera scorie Rifiuti di refrattario |

Vantaggi

- Veloci cambi di produzione di leghe
- Fusione senza contaminazione della lega
- Bassi costi di investimento
- Ridotte produzioni di emissioni con necessità di più contenuti sistemi di depurazione
- Facile manutenzione

Svantaggi

- Maggiore ossidazione degli elementi di lega del bagno
- Maggiori consumi di combustibile se utilizzato in modo discontinuo
- Consumi energetici proporzionali alla quantità di acciaio (rottami) in carica

Forno a suola e/o a riverbero

Questo forno è a riscaldamento diretto poiché l'aria calda e i gas di combustione sono diretti dal bruciatore sul metallo da fondere; i gas di scarico sono poi captati e convogliati all'esterno del forno attraverso una apposita canalizzazione.

Il forno può avere configurazioni diverse, a seconda del materiale che deve essere fuso e delle applicazioni a cui deve essere destinato. L'efficienza di fusione del forno, che non è molto elevata poiché il calore non viene trasferito per intero dal bruciatore al metallo, può tuttavia essere aumentata utilizzando un arricchimento di ossigeno.

Forni a tino

Questo forno è un semplice forno verticale, in cui il materiale è introdotto dall'alto ed è fuso nella parte bassa, da bruciatori usualmente alimentati a gas. Questo forno è usato soprattutto per l'alluminio. A causa delle difficoltà nella costruzione di tale forno e delle operazioni di manutenzione del materiale refrattario, il forno è utilizzato soprattutto per metalli a basso punto di fusione.

I moderni forni con sistemi di controllo computerizzato dei bruciatori, raggiungono consumi di energia di 650 kWh/t di alluminio fuso (a 720 °C), con una efficienza termica del 50%.

Vantaggi:

- Ridotta quantità di gas in emissione.
- Attraverso il lungo preriscaldamento, la carica viene essiccata prima dell'inizio della fusione. Ciò rende il forno ottimale per l'alluminio, per la riduzione del rischio di esplosioni
- produzione di idrogeno al camino.
- Costi di investimento e di gestione relativamente contenuti in relazione all'efficace preriscaldamento, al controllo automatico e alla durata del refrattario,
- Basso consumo di combustibile, eccellente controllo della temperatura e bassi cali di fusione.

Svantaggi:

- Scarsa flessibilità per i cambi di lavorazione.

Forni a crogiolo

Questi forni sono costituiti da un crogiolo riscaldato esternamente da bruciatori alimentati a gas o ad olio. Sono utilizzati soprattutto per la fusione di metalli non ferrosi; hanno ridotta capacità e bassi volumi di produzione.

Vantaggi:

- Tecnologia semplice
- Bassa manutenzione
- Flessibilità nel cambiamento di lega

Svantaggi:

- Bassa efficienza e ridotta capacità produttiva

Forni a volta radiante (riscaldamento a resistenza)

Sono forni utilizzati esclusivamente per il mantenimento del metallo liquido, normalmente integrati con macchine formatrici a bassa pressione.

Sono caratterizzati da ridotti consumi energetici.

Vantaggi

- Controllo accurato delle temperature
- Ridotti consumi energetici.
- Migliori condizioni ambientali.

Formatura e preparazione delle anime

Verranno di seguito discusse le tecniche di realizzazione delle forme e delle anime con l'impiego di leganti inorganici argillosi (formatura a verde) e di leganti chimici.

Formatura in terra a verde

La preparazione della terra a verde prevede la miscelazione della sabbie base con additivi e leganti. Tale operazione può essere eseguita in appositi mescolatori operanti in normale atmosfera o sotto vuoto.

I mescolatori sotto vuoto, trovano in genere un utilizzo in impianti in cui la capacità produttiva della sabbia sia superiore alle 60 t/h.

- Chiusura di tutte le unità operative degli impianti di lavorazione, delle terre (griglia vibrante, depolveratori della sabbia, raffreddatori, unità di miscelazione), e depolverazione delle emissioni.
- Impianto unico per la miscelazione ed il raffreddamento della sabbia sotto vuoto.
- Utilizzare tecniche di recupero delle terre. L'aggiunta di sabbia nuova dipende dalla quantità di anime presenti e dalla loro compatibilità con le tecniche di recupero impiegate. Per le sole terre a verde, la percentuale di recupero raggiungibile è del 98%. Sistemi con elevate percentuali di anime con leganti incompatibili con il sistema di recupero, possono raggiungere percentuali di riutilizzo fra il 90 e il 94%.

Formatura chimica

Vengono utilizzati vari tipi di leganti, ciascuno con specifiche proprietà ed applicabilità.

- Minimizzare l'utilizzo di resine e leganti, utilizzando sistemi di controllo del processo (manuali o automatici) e di controllo della miscelazione. Per le produzioni di serie con frequenti cambi dei parametri produttivi, utilizzare sistemi di archiviazione elettronica dei parametri produttivi.
- Captazione delle emissioni dalle aree di produzione, di movimentazione e di stoccaggio delle anime prima della distribuzione.
- Utilizzo di intonaci refrattari a base di acqua, in sostituzione degli intonaci con solvente ad alcool, per la verniciatura di forme e anime nelle fonderie con produzioni di media e grande serie.
- Utilizzo di vernici ad alcool nel caso di:
 - produzioni di forme e anime complesse e di grandi dimensioni;
 - utilizzo di sistemi con sabbia e silicato di sodio;
 - produzione di getti in magnesio produzione di getti in acciaio al manganese, con vernici a base di MgO.

Quando vengono utilizzate vernici ad alcool, utilizzare sistemi di captazione delle emissioni prodotte, fissi o mobili, fatta eccezione per le fonderie con produzione di grossi getti con formatura "in campo", ove le cappe non possono essere utilizzate.

Minimizzare la quantità di sabbia avviata alla discarica, utilizzando sistemi di rigenerazione e/o di riutilizzo.

Nel caso di rigenerazione, si applicano le seguenti condizioni:

- Per le sabbie con leganti con indurimento a freddo per esempio sabbie con resina furanica), utilizzo di sistemi di recupero di tipo meccanico, a eccezione dei sistemi con silicato di sodio. La resa del processo di recupero, è del 75-80 %.
- La sabbia con silicato è rigenerata utilizzando trattamenti termici e pneumatici. La resa del recupero è compresa fra 45 e 85 %.
- Sabbie derivanti da processi in cassa d'anima fredda (cold box), SO₂, cassa d'anima calda (hot box) e Croning, e miscele di sabbie con leganti organici, vengono rigenerate utilizzando una delle seguenti tecniche: rigenerazione meccanica a freddo (per esempio sistemi ad abrasione, sistemi a impatto, sistemi pneumatici) o rigenerazione termica. La percentuale di recupero raggiungibile dipende dalla quantità di

anime utilizzate. La sabbia rigenerata può essere riutilizzata per la produzione di anime in misura compresa fra il 40 e il 100 %.

- Miscele di terra a verde e sabbie con leganti organici, vengono rigenerate utilizzando processi di recupero meccanico-termico-meccanico, spogliatura per abrasione o pneumatica. La sabbia recuperata può essere riutilizzata per la produzione di anime nella misura dal 40 al 100%, e per la produzione di forme nella misura dal 90 al 100%.
- Monitorare la qualità e la composizione delle sabbie rigenerate
- Recuperare le sabbie all'interno del ciclo delle sabbie, solo in sistemi compatibili. Sabbie non compatibili sono tenute separate, per altri tipi di riutilizzo.

Tecniche di formatura con forma permanente.

- Minimizzazione del consumo di distaccante e di acqua nella formatura per pressocolata ad alta pressione.
- Applicare del distaccante (allo stato vaporizzato) a conchiglia chiusa.

Colata del metallo, raffreddamento e distaffatura

Si deve fare riferimento ai prodotti di combustione e di degradazione termica che si producono nelle fasi di colata, raffreddamento e distaffatura.

- Nelle linee di produzione di serie, aspirare le emissioni prodotte durante la colata e racchiudere le linee di raffreddamento, captare le emissioni prodotte.
- Racchiudere le postazioni di distaffatura e trattare le emissioni utilizzando cicloni, associati a sistemi di depolverazione a umido o a secco.
- Per le produzioni di grossi getti, colati "in campo" o "in fossa", ove il lay-out non consente di installare cappe per aspirazione localizzata, realizzare una adeguata ventilazione generale, oppure prevedere aree di colata distinte e non percorse dagli addetti durante il raffreddamento dei getti.

Per quanto concerne invece la colata in forma permanente, queste tecniche prevedono la colata della lega liquida in una forma metallica (stampo, conchiglia) dalle quali il getto è estratto dopo solidificazione. In alcuni processi, trovano un limitato utilizzo anime con leganti chimici, e precisamente nella colata per gravità in conchiglia, nella colata per centrifugazione o nella colata a bassa pressione.

- Captare le emissioni nella fase di colata ed eventualmente trattarle con sistemi a umido o a secco.
- Recuperare/riciclare gli eventuali residui di forma e/o anime presenti.
- Raccolta delle acque reflue per il successivo trattamento.
- Raccolta dei liquidi idraulici eventualmente persi dai circuiti di comando delle macchine per il loro successivo trattamento.
- Le tecniche di contenimento per la preparazione delle anime sono del tutto analoghe a quelle per la preparazione delle forme

In funzione del tipo di inquinanti atmosferici prodotti in tali fasi le tecniche di captazione ed abbattimento delle emissioni possono essere differenti.

Per la raccolta delle polveri:

- impiego di filtri a tessuto;
- impiego di cicloni con scrubber ad umido

Per la separazione dei COV sono:

- biofiltri;
- scrubbers con neutralizzazione chimica.

Finitura dei getti

Alcune operazioni di finitura eseguite sui getti producono emissioni che necessitano di captazione e convogliamento ad un impianto di depurazione.

Fra le operazioni di finitura che vengono effettuate sui getti, la eliminazione dei dispositivi di colata e di alimentazione dei getti (materozze, attacchi di colata, ecc), la pulitura dei getti (granigliatura), l'eliminazione

e la riparazione dei getti di acciaio (scricatura, saldatura) ed eliminazione di bave (sbavatura/ molatura) possono dare origine a emissioni di fumi/polveri.

Le tecniche riguardano la captazione e il trattamento mediante l'impiego di sistemi a secco o ad umido, delle emissioni prodotte nelle fasi di taglio dei dispositivi di colata, di granigliatura e sbavatura dei getti.

In particolare per quanto riguarda le emissioni di polveri e COV:

- impiego di filtri a tessuto e cicloni con scrubbers a umido per la raccolta delle polveri.
- impiego di biofiltri e scrubbers con neutralizzazione chimica per i COV.

Scarichi idrici e riciclo delle acque di raffreddamento

- Separazione delle diverse tipologie di acque reflue
- Utilizzo di sistemi di depolverizzazione a secco in modo da ridurre la produzione di acque reflue
- Utilizzo di "scrubbers biologici" che generano quantitativi di acqua minore rispetto agli scrubbers convenzionali
- Raccogliere le acque e utilizzare sistemi di separazione degli oli, prima dello scarico
- Massimizzare i ricicli interni delle acque di processo, e il loro riutilizzo multiplo
- Trattamento utilizzando opportune tecniche, di tutte le acque dei processi di depurazione delle emissioni e, in generale, di tutte le acque reflue
- Recupero delle ammine dalle soluzioni esauste di abbattimento degli scrubbers.

Smaltimento delle sabbie. Valorizzazione rifiuti solidi

- Recupero primario della sabbia per riutilizzo nella formatura (sistema a verde con leganti inorganici)
- Recupero meccanico delle sabbie nei processi con indurimento a freddo
- Recupero meccanico mediante sistemi ad abrasione
- Recupero meccanico con sistemi ad impatto
- Recupero a freddo con sistemi pneumatici
- Recupero termico
- Recupero combinato (meccanico – termico – meccanico) per le sabbie con bentonite e leganti organici
- Rigenerazione a umido
- Rigenerazione con sistemi pneumatici delle sabbie con silicato di sodio
- Riciclo della polvere delle operazioni di distaffatura e movimentazione sabbie nella terra di formatura
- Riutilizzo esterno della sabbia esausta in alternativa alla messa in discarica. La sabbia non più utilizzabile in fonderia può essere impiegata in altre attività.