

### 4.2.3 Altoforno

Per la produzione della ghisa in altoforno, i principali aspetti ambientalmente rilevanti riguardano:

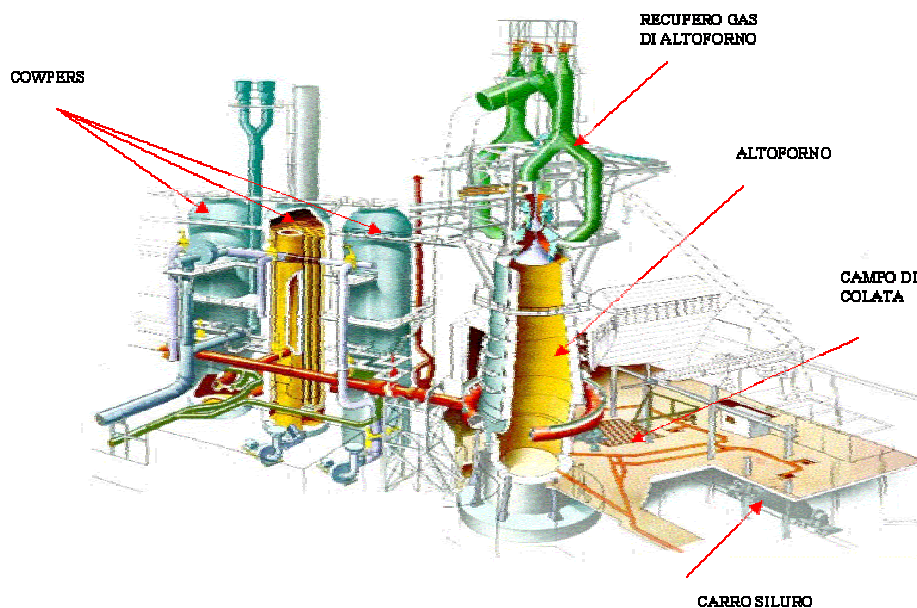
- il trattamento ed il recupero del gas di altoforno;
- la captazione e abbattimento delle emissioni nel colaggio dei prodotti fusi.

#### A) Aspetti tecnici, tecnologici ed ambientali (consumi, emissioni, rifiuti)

Il processo di produzione della ghisa in altoforno comprende le seguenti fasi:

1. *caricamento materiali;*
2. *generazione del vento caldo;*
3. *processo di riduzione in altoforno;*
4. *colaggio ghisa e loppa;*
5. *trattamento loppa.*

Per ciascuna delle suddette fasi vengono di seguito descritte le attività svolte e le principali componenti di natura ambientale su cui applicare le B.A.T. ai fini della prevenzione integrata dall'inquinamento.



#### 1. Caricamento materiali

I materiali costituenti la carica dell'altoforno sono il coke, i fondenti ed i materiali ferrieri, questi ultimi in forma di minerale agglomerato e/o in pezzatura (pellets e calibrati). Detti materiali, provengono dai rispettivi impianti produttivi e/o dallo stoccaggio in cumuli, sono stati insilati in una stock-house al servizio dell'altoforno e dopo vagliatura per la scelta della frazione granulometrica idonea, vengono, dopo pesatura, inviati in altoforno per il caricamento dall'alto.

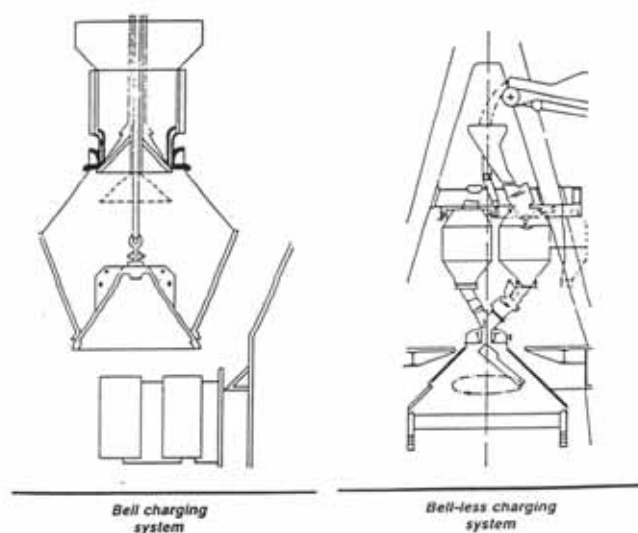
Il coke in altoforno assolve a diverse funzioni, tra le quali:

- fornisce il calore necessario alla fusione dei minerali;

- fornisce il gas riducente necessario alla trasformazione degli ossidi di ferro in ferro metallico;
- fornisce il carbonio necessario alla carburazione della ghisa e per la riduzione di alcuni elementi di lega;
- sostiene la carica fino alla parte bassa dell’altoforno, essendo l’unico materiale che non fonde.

L’agglomerato e i minerali di ferro in pezzatura sono i portatori del ferro: dallo stato di ossidi essi vengono trasformati dall’azione del gas riducente; i fondenti, invece, hanno il compito di rendere fusibili le impurità (ganga) contenute nei minerali di ferro e che vanno a costituire la cosiddetta loppa di altoforno.

Con l’adozione di sistemi di caricamento a tenuta con campane o con tramogge, la quantità di gas di altoforno e particolato che può essere emesso durante l’operazione di caricamento, viene limitata alla sola quantità relativa alla depressurizzazione del volume del vano di carica.



Sistema di caricamento in altoforno

In normali condizioni di funzionamento, le principali emissioni in atmosfera presenti nella fase di caricamento sono quelle che si manifestano nella vagliatura dei materiali alla stock-house.

## 2. Generazione del vento caldo.

Per i processi che avvengono in altoforno è necessaria l'iniezione di aria calda (vento caldo) tramite apposite tubiere.

L'ossigeno contenuto nel vento caldo (quello presente nell'aria ambiente con eventuale arricchimento esterno) ed il carbonio del coke reagiscono tra loro dando origine al gas riducente, ricco in ossido di carbonio, che investe in fase ascensionale la carica ed esercita l'azione riducente nei confronti degli ossidi di ferro presenti nei minerali.

La generazione del vento caldo avviene attraverso l'utilizzo dei cosiddetti "cowpers" a combustione interna o a combustione esterna; per ogni altoforno sono necessari dai tre ai quattro cowpers.



Vista cowpers altoforno

I cowpers vengono riscaldati attraverso la combustione del gas di altoforno, arricchito con gas di cokeria o gas metano; il calore generato nella combustione determina il riscaldamento di un impilaggio di mattoni refrattari, sino a raggiungere nella camera una temperatura di circa  $100\div 1500$  °C. A questo punto la combustione nel cowper viene interrotta e nella camera viene soffiata aria in controcorrente; il calore accumulato dall'impilaggio di mattoni refrattari si trasferisce all'aria riscaldandola sino ad una temperatura compresa tra  $900\div 1350$  °C.

Il processo continua fino a che la camera non può più produrre vento a temperatura idonea, dopodiché viene interrotto il passaggio dell'aria ed effettuato un nuovo ciclo di riscaldamento.

Le principali emissioni in atmosfera che si manifestano, in normali condizioni, durante la fase di generazione del vento caldo sono quelle dei prodotti di combustione del gas di altoforno, arricchito con gas di cokeria o con gas metano; in particolare gli  $\text{NO}_x$ , per via delle alte temperature.

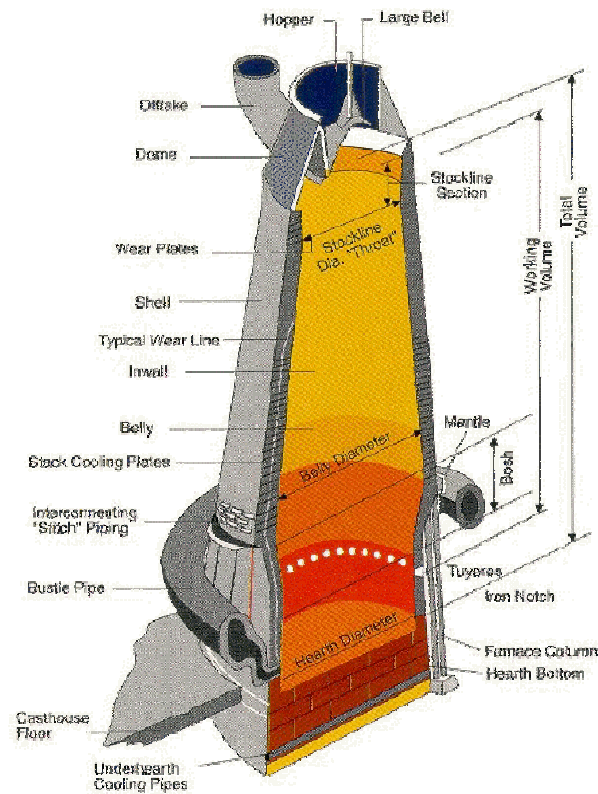
### 3. Processo di riduzione in altoforno

L'altoforno è costituito da una corazza esterna d'acciaio rivestita all'interno da mattoni refrattari con particolari caratteristiche chimico-fisiche atte a resistere alle elevate temperature e raffreddato con acqua nelle zone termicamente più sollecitate.

La temperatura varia da zona a zona: è massima (ca. 2000 °C) nella zona in cui il vento caldo viene insufflato alle tubiere e dove si ha la combustione del coke e degli altri agenti riducenti, ed è più bassa nella parte alta del forno dove viene introdotta la carica (ca. 100 – 300 °C): nel crogiolo dove si raccolgono la ghisa e la loppa allo stato fuso, si hanno temperature di ca. 1600°C.

L'altoforno è un forno a tino costituito da due tratti troncoconici ("tino" la parte superiore e "sacca" la parte inferiore) uniti in corrispondenza della loro base maggiore da una zona cilindrica (ventre).

Il materiale grezzo, che costituisce la carica del forno, viene introdotto dalla parte alta della struttura (bocca).



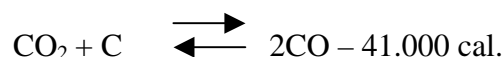
Vista in sezione di un altoforno

Immediatamente al di sotto della sacca si trova una parte cilindrica detta "crogiolo", la quale ha la funzione di raccogliere la ghisa prodotta insieme alla scoria (loppa di altoforno).

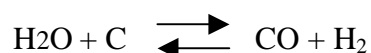
La carica, costituita dal letto di fusione (carica ferrifera e fondenti) e da coke viene introdotta dalla bocca a strati alterni e discende lentamente lungo il tino, permeata in controcorrente da gas caldi riducenti costituiti principalmente da CO, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Il gas si origina nella parte bassa del forno per effetto della combustione del carbonio del coke e degli agenti riducenti con l'ossigeno del vento, secondo la seguente reazione:



La CO<sub>2</sub>, in presenza di carbonio in eccesso, reagisce dando origine al CO secondo la seguente reazione di equilibrio:



L'umidità contenuta nell'aria soffiata a livello tubiere ("vento caldo" prodotto dai cowpers) si dissocia secondo la seguente reazione:



L'ossido di carbonio (CO) così formatosi nella zona di combustione, tende a salire attraverso la carica solida ed entra in contatto con il minerale esercitando l'azione di riduzione degli ossidi di ferro. La parte ridotta (Fe) fonde e si deposita nel crogiolo dove avviene la carburazione (soluzione del carbonio nella massa fusa) dando origine alla ghisa. La calcinazione del fondente presente nella carica dà origine ad ossido di calcio che insieme alla ganga dei minerali e alle ceneri del coke formano la loppa di altoforno. Questa fonde nella zona a più elevata temperatura del forno e si raccoglie nel crogiolo, in uno strato galleggiante sul bagno di ghisa fusa. Oltre oltre alla neutralizzazione della componente acida dei minerali, la loppa consente l'assorbimento dello zolfo e di altre impurezze contenute nella carica ed indesiderate nella ghisa.



Vista di altoforni

Il gas di altoforno esercita l'azione riducente nel suo moto ascensionale attraverso la carica, si raccoglie nella parte alta del forno, da dove viene convogliato al sistema di depurazione. Il gas d'altoforno è principalmente costituito da ca. 20÷28 % di CO, ca. 1÷5% di H<sub>2</sub>, ca. 50÷55% di N<sub>2</sub> e ca. 17÷25% di CO<sub>2</sub>.

Tale gas per le sue caratteristiche energetiche viene recuperato e dopo depurazione utilizzato tal quale, o arricchito con gas di cokeria o gas metano nelle varie utenze termiche. Emissioni in

atmosfera a carattere transitorio possono derivare dai cappelli di sicurezza posti sulla sommità dell'altoforno per consentire di scaricare le eventuali sovrappressioni che possono determinarsi all'interno del forno.

Dai sistemi di trattamento ad umido del gas di altoforno derivano inoltre dei reflui contenenti prevalentemente solidi sospesi (come carbone e metalli pesanti), composti dei cianuri, ecc.

#### 4. Colaggio ghisa e loppa

All'interno del crogiolo dell' altoforno si raccolgono, allo stato liquido, la ghisa e la scoria (*loppa*), quest'ultima stratificata sul bagno di ghisa fusa per effetto del differente peso specifico.

Periodicamente, la ghisa e la loppa vengono evacuate attraverso dei fori di colata situati lateralmente al crogiolo e chiusi con una massa refrattaria. All'apertura, mediante un martello pneumatico, i prodotti fusi fluiscono in un canale (*rigolone*) rivestito di materiale refrattario. La colata inizia con la fuoriuscita della ghisa, mentre verso la fine si ha la fuoriuscita sia della ghisa che della loppa; questa continua a stratificarsi sopra il bagno di ghisa e sfruttando proprio l'azione dei due diversi pesi specifici, con l'azione di una barriera immersa nel rigolone si ha la separazione della ghisa dalla loppa che si incanalano rispettivamente nella rigola ghisa e nella rigola loppa, che sono anch'essi dei canali rivestiti di materiale refrattario. Il tratto terminale della rigola ghisa è costituito dal sistema di caricamento (*tilting*) dei carri siluro.

I carri siluro sono dei contenitori a forma allungata rivestiti internamente di materiale refrattario, movimentati attraverso carri ferroviari, all'interno dei quali viene colata la ghisa fusa per il trasferimento in acciaieria.



Carri siluro

Periodicamente occorre verificare lo stato del rivestimento, per l'eventuale ripristino o rifacimento; ciò richiede che vengano eliminati gli eventuali residui depositatisi all'interno del carro; l'evacuazione è effettuata allo stato fuso (*sgrondo*) per rotazione quasi totale del carro siluro in modo da riversare il contenuto in una vasca e raffreddarlo con spruzzaggio di acqua.

In caso di necessità e/o per sopperire ad eventuali scompensi tra la produzione dell'altoforno e quella dell'acciaieria, la ghisa contenuta nei carri siluro può essere sottoposta a trattamento di solidificazione (granulazione, produzione di pani di ghisa o colaggio in campo di emergenza).

La granulazione della ghisa viene effettuato in vasca con spruzzaggio di acqua; l'evaporazione di quest'ultima può trascinare con sé del polverino, effetto che viene contenuto mediante irrorazione di acqua aggiuntiva nella vasca di granulazione.

La produzione di pani di ghisa avviene in apposita macchina a colare dove la ghisa viene solidificata in forme raffreddate con acqua.

In via eccezionale la ghisa può essere colata in un campo di emergenza, in tal caso il raffreddamento avviene per via naturale.

Le principali emissioni in atmosfera che si manifestano in normali condizioni durante le operazioni descritte, sono emissioni di particolato: In media le emissioni non abbattute sono nell'intervallo 400-1500 g/t di ghisa prodotta. Queste emissioni si generano principalmente dal contatto tra il metallo caldo e le scorie con l'ossigeno dell'ambiente.

## 5. Trattamento loppa

La loppa prodotta nel processo di riduzione dei minerali di ferro e che fuoriesce dall'altoforno allo stato fuso deve essere raffreddata.

Il sistema di raffreddamento utilizzato in ambito nazionale è quello della granulazione mediante spruzzaggio di acqua di mare o di acqua dolce ad alta pressione.

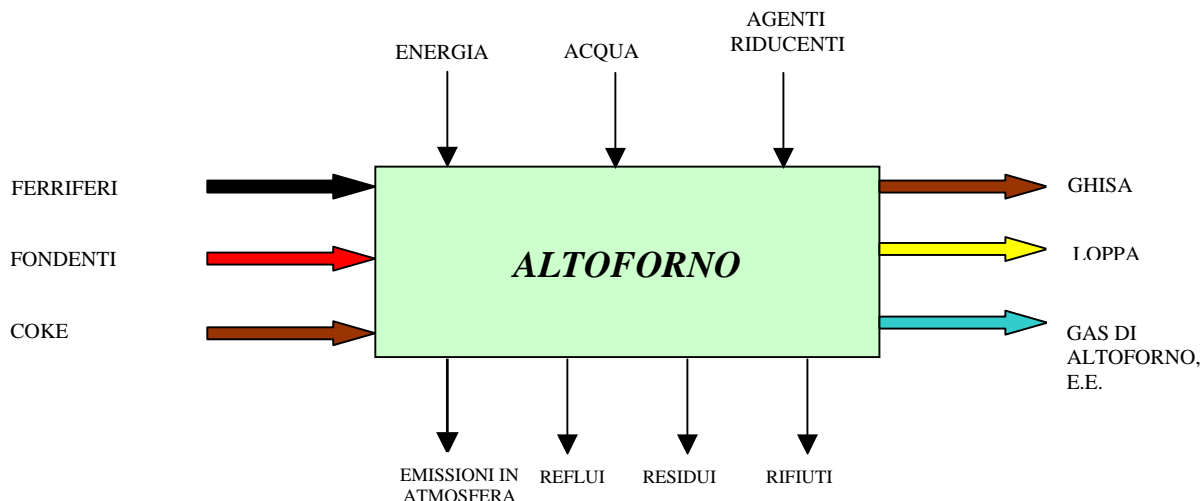
L'operazione può avvenire in bacino aperto o in bacino chiuso. In entrambi la loppa fusa viene convogliata, attraverso la rigola loppa, alla testa di granulazione in cui un forte getto di acqua permette il suo raffreddamento e nello stesso tempo dà origine a granuli di loppa che vengono trascinati insieme all'acqua utilizzata nel processo. Durante la granulazione si genera del vapore acqueo, contenente una limitata quantità di composti solforati, che viene emesso in atmosfera.

La separazione dell'acqua dalla loppa, nel sistema a bacino aperto, avviene in un letto drenante che consente il filtraggio e lo scarico dell'acqua, ed trattiene in superficie la loppa; in bacino chiuso la miscela di acqua e loppa può essere inviata ad un sistema di separazione acqua-loppa di tipo statico con sili drenanti, oppure può essere inviata ad un sistema dinamico di separazione a tamburo rotante (processo INBA), dove la loppa separata viene evacuata a mezzo nastro trasportatore.

La loppa granulata così prodotta, che ha una umidità residua di ca. il 10%, viene stoccata in cumuli per essere poi destinata al riutilizzo (cementerie, costruzione di strade, ecc...). Nel caso di granulazione con acqua dolce si ha un sistema a riciclo, con reintegro dell'acqua persa per evaporazione; mentre nel caso di utilizzo di acqua di mare si ha un sistema aperto in cui l'acqua separata dalla loppa viene filtrata e scaricata dal sistema di drenaggio.

## Bilancio complessivo di materia ed energia

Lo schema di flusso di materia ed energia in ingresso ed in uscita dall'altoforno è sinteticamente di seguito rappresentato:



I residui solidi determinati nelle fasi del processo di produzione descritto sono in larga misura recuperati con operazioni di riciclo; la loppa prodotta nel normale esercizio degli impianti viene riutilizzata nell'industria del cemento, per la costruzione di strade, ecc.; i fanghi derivanti dai sistemi di depurazione ad umido e dalle polveri raccolte dai sistemi di depurazione a secco vengono in gran parte riciclati negli impianti di agglomerazione e/o bricchettaggio. Altri residui di natura ferrosa, come rottame, spuntature, crostoni, ecc. sono riciclati in acciaieria; in pratica, sono soprattutto i rifiuti derivanti da attività di manutenzione, come i refrattari non riciclabili, ad essere indirizzati allo smaltimento in discarica.



## **B) Migliori tecniche e tecnologie disponibili**

### **1. Caricamento materiali**

- Adozione di sistemi di captazione delle emissioni di polveri durante la vagliatura dei materiali nella stock-house e successivo trattamento con sistemi di abbattimento ad umido o a secco (filtri a tessuto). Nel caso di depolverazione con sistemi ad umido, il trattamento delle acque reflue può essere effettuato congiuntamente con il trattamento delle acque derivanti dalla depurazione ad umido del gas di altoforno.

### **2. Generazione del vento caldo.**

La produzione di vento caldo a mezzo di cowpers avviene con la combustione di gas d'altoforno, spesso arricchito; le emissioni raggiungibili nei fumi di combustione, in condizioni normali, sono:

- concentrazione di polveri :  $\leq 10$  mg/Nmc (3% O<sub>2</sub>)
- concentrazione di NO<sub>x</sub> :  $\leq 350$  mg/Nmc (3% O<sub>2</sub>)

A riguardo, si possono adottare vari sistemi per ottimizzare l'efficienza energetica:

- Recupero del calore sensibile dei fumi con preriscaldamento dell'aria comburente e/o del combustibile, ove possibile.  
Tale tecnica non è economicamente e tecnicamente applicabile, generale, sugli impianti esistenti, se la temperatura dei fumi è troppo bassa (< 250 °C). Il preriscaldamento dell'aria e/o del combustibile alimentato ai cowper determina in ogni caso un aumento della formazione di NO<sub>x</sub>.
- Miglioramento del processo di combustione; può essere vantaggioso, ove possibile, l'impiego di idonei bruciatori ed il controllo del processo di riscaldamento.

### **3. Processo di riduzione in altoforno**

- Iniezione diretta di agenti riducenti in altoforno. In particolare l'iniezione di idrocarburi, come ad esempio carbon fossile polverizzato o granulare, olio combustibile, residui oleosi, catrame, residui plastici o gas naturale, permette la sostituzione di parte del coke utilizzato in altoforno, con conseguente effetto di riduzione delle emissioni e dei consumi energetici associati alla produzione di coke.

L'agente riducente maggiormente utilizzato, ed iniettato a livello tubiere, è il carbon fossile polverizzato, opportunamente preparato attraverso processi di macinazione ed essiccamento (P.C.I. – Powdered Coal Injection).

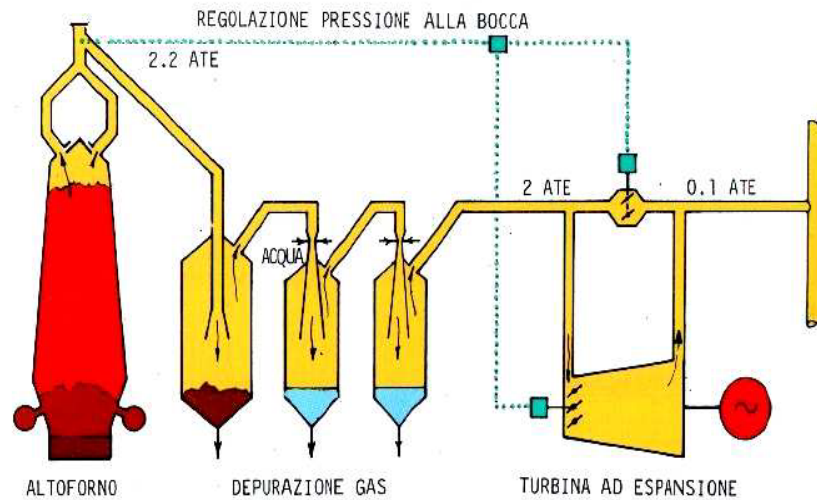
Il coke è un componente insostituibile nel processo di produzione della ghisa in altoforno, per cui la sua parziale sostituzione con agenti riducenti non può essere eccessivamente spinta e comunque non può superare determinati livelli.

Il livello provato di iniezione di carbon fossile polverizzato in altoforno è di 180 Kg/t ghisa; tuttavia è da tenere presente che tale livello di iniezione è strettamente legato alla marcia dell'altoforno, alla stabilità del processo, alla qualità dei materiali alimentati, nonché alla qualità della ghisa e della loppa prodotti.



Sistema P.C.I.(Powdered Coal Injection)

- Recupero del gas di altoforno (Bfgas); un apposito sistema di collettori di raccolta posizionati nella parte alta, in prossimità della bocca, con relativo sistema di sicurezza per le eventuali sovrappressioni che possono verificarsi all'interno dell'altoforno, consente di convogliare verso la depurazione e poi allo stoccaggio un gas che contiene un 20-28 % di ossido di carbonio (CO) ed 1-5 % di idrogeno. Anche se il contenuto energetico del Bfgas è relativamente basso (2,7-4,0 MJ/Nm<sup>3</sup>) ed il suo impiego come combustibile prevede un arricchimento con gas di cokeria o gas naturale, il recupero energetico è molto significativo, per le alte quantità in gioco (1200-2000 Nm<sup>3</sup>/t di ghisa) e può aggirarsi sui 5 GJ/t di ghisa.
  - Depolverazione del gas di altoforno recuperato, mediante un preabbattimento delle polveri grossolane con sistema di separazione a secco (*sacca a polvere*) e successivo trattamento di depurazione ad umido o, più raramente, con elettrofiltri.
  - Adozione di un sistema di recupero energetico della pressione di bocca dell'altoforno mediante turbina ad espansione collegata a un turboalternatore per la produzione di energia elettrica.  
Questa tecnica può essere applicata su nuovi altoforni, che operano con un'elevata pressione di bocca (2-2,5 bar) e con sistemi di depurazione gas opportunamente dimensionati con una ridotta perdita di carico. Su impianti esistenti non sempre sussistono i suddetti prerequisiti e quelli di realizzabilità (disponibilità del lay-out, vantaggio del recupero, ecc...).
- Negli impianti moderni si fa particolare attenzione anche alla caduta di pressione lungo tutto il sistema di depurazione, poiché essa determina l'efficienza del recupero energetico dalla pressione del gas.



*Schema di flusso sistema di recupero e trattamento del gas di altoforno con preabbattitore a secco e venturi ad umido*

- Trattamento delle acque reflue derivanti dalla depurazione ad umido del Bfgas; con:
  - riciclo, per quanto possibile, delle acque trattate;
  - coagulazione e sedimentazione dei solidi sospesi; le prestazioni raggiungibili in condizioni normali, sono le seguenti:
    - concentrazione di solidi sospesi dopo trattamento :  $\leq 50$  mg/l (media giornaliera);  
:  $\leq 20$  mg/l (media annuale).
  - Riciclaggio, per quanto possibile, all'impianto di agglomerazione dei fanghi precipitati e trattamento della parte non direttamente riciclabile; questi fanghi sono caratterizzati da presenza di zinco, che è di ostacolo al processo in altoforno. Se la parte di fanghi non riciclabile ha una distribuzione granulometrica tale da permettere una separazione rappresentativa delle particelle fini (più ricche in zinco) da quelle più grossolane (più povere di zinco), può essere operata l'idrociclonatura dei fanghi. La frazione più grossolana può quindi essere avviata a riciclo mentre la frazione fine viene inviata in discarica.  
Per la tipologia di fanghi prodotti non sempre è adottabile il processo di idrociclonatura in quanto non si otterrebbe un ragionevole e vantaggioso effetto di separazione e quindi un significativo incremento delle quantità di fanghi da poter riciclare.

#### 4. Colaggio ghisa e loppa

- Adozione di un sistema di captazione delle emissioni che si generano dalle operazioni di colaggio della ghisa e della loppa e loro relativa depolverazione mediante filtro a tessuto o elettrofiltro.

Le prestazioni raggiungibili dopo depolverazione in condizioni normali, sono le seguenti:

- concentrazione di polveri : 1÷15 mg/Nmc.
- Riduzione delle emissioni durante la colata nelle rigole. Si può raggiungere questo obiettivo con le seguenti attività:
    - adozione di materiale refrattario non legato con catrame, per il rivestimento delle rigole;
    - copertura delle rigole; questa tecnica può essere adottata laddove la tipologia di ghisa prodotta lo consenta; infatti per alcune campagne di ghisa caratterizzate da maggiore viscosità (con conseguente difficoltà di deflusso nelle rigole), si rende necessario disporre di canali aperti per poter intervenire meccanicamente al fine di agevolare il deflusso del materiale.
    - adozione di un sistema di inertizzazione dei prodotti fusi con azoto per la riduzione della formazione dei fumi durante le operazioni di colaggio, in alternativa alla installazione di sistemi di captazione e depolverazione, nel caso in cui il design dell'impianto permetta la sua adozione e se vi è una sufficiente disponibilità di azoto. La captazione e depolverazione delle emissioni dal foro di colata resta comunque necessaria. L'insufflaggio di azoto, che si diffonde nell'ambiente di lavoro, può determinare problemi di sicurezza per il personale (asfissia), per cui l'eventuale adozione di tale tecnica necessita di misure aggiuntive tese ad assicurare un'adeguata ventilazione degli ambienti di lavoro ed il loro monitoraggio.

## 5. Trattamento loppa

- Adozione di un sistema di granulazione della loppa, con raffreddamento ad acqua di mare se a circuito aperto o ad acqua dolce con relativo riciclo.
- Condensazione dei vapori di granulazione della loppa, nel caso vi siano problemi di odori (da H<sub>2</sub>S o SO<sub>2</sub>).

La tecnica è applicabile soprattutto nella realizzazione di nuovi altoforni; negli stabilimenti esistenti problemi di lay-out, di compatibilità con l'impiantistica esistente ed elevati costi di realizzazione, rendono in genere impraticabile la realizzazione dell'intervento, i cui benefici devono essere valutati anche in relazione ai consumi energetici richiesti dal circuito dell'acqua ed alle emissioni conseguenti alla produzione di energia.

## 6. Gestione dei residui

Per i rifiuti solidi, le seguenti tecniche sono considerate BAT:

- la minimizzazione della produzione di rifiuti;
- il riciclaggio dei residui e dei sottoprodotti riutilizzabili, tra cui principalmente le polveri derivanti dalle depolverazioni a secco, i fanghi derivanti dai sistemi di abbattimento ad umido, ecc...,tal quali e/o tramite bricchettaggio; il riutilizzo della loppa (ad es.: in cementeria, per la costruzione di strade, ecc...);
- lo smaltimento in idonea discarica dei residui non riciclabili.

### 4.2.4 Acciaieria ad ossigeno e Colata Continua