

*Se il ferro viene raffinato col fuoco, si forma una pietra  
che è conosciuta con il nome di scoria.  
Questa pietra ha effetti portentosi nel cicatrizzare le ferite.*

*Aristotele, 350 a.C.*

# Indice

	Pagina
<b>Premessa</b> .....	4
<b>Capitolo 1 – Introduzione</b> .....	5
1.1 Stato dell’arte .....	5
1.2 Legislazione vigente .....	7
<b>Capitolo 2 – Produzione dell’acciaio e delle scorie</b> .....	9
2.1 Generazione della scoria e sue tipologie .....	9
2.2 Ciclo integrale .....	12
2.2.1 Altoforno (BF).....	12
2.2.2 Convertitore ad ossigeno (BOF).....	13
2.2.3 Scorie BF.....	14
2.3 Cenni sul ciclo elettrico .....	17
2.3.1 Forno elettrico ad arco (FEA) .....	17
2.3.2 Convertitore AOD .....	18
2.4 Scorie FEA e scorie BOF.....	18
2.4.1 Composizioni chimica e minerale .....	18
2.4.2 Proprietà tecniche .....	19
<b>Capitolo 3 – Riutilizzo delle scorie</b> .....	22
3.1 Rassegna delle possibili applicazioni delle scorie BF in Europa .....	22
3.2 Composizione del cemento Portland e confronto con le scorie BF e BOF .....	24
3.3 Un esempio applicativo .....	27
<b>Capitolo 4 – Conclusioni</b> .....	30
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	32
<b>Breve biografia dell’autore</b> .....	33

## Premessa

L'inizio del mio interesse verso ciò che io chiamo "il dilemma delle scorie" è nato, in un primo tempo, nel corso della preparazione della mia tesi di laurea sviluppata all'interno dell'acciaieria di Terni; ovvero, dalla curiosità di scoprire che fine facessero quelle cospicue quantità di prodotti di scarto che vedevo fuoriuscire, contemporaneamente all'acciaio, durante le varie fasi del suo processo di produzione; e dall'interrogativo se, in un secondo tempo, tali prodotti potessero essere recuperati. Se, cioè, le scorie potessero essere viste non propriamente come prodotti di scarto, ma come "risorsa" per l'azienda. In seguito, l'interesse si è definitivamente ridestato ascoltando, nel corso di quest'ultima edizione di *Steelmaster*, una delle lezioni dell'ingegner Domenico Capodilupo sulla tematica dello "Zero Wastes in siderurgia"; da qui l'idea di scrivere una tesina proprio su questo argomento.

Con questo breve scritto, quindi, si vuole solamente fornire una panoramica dello stato dell'arte nell'ambito del riciclo delle scorie provenienti dalla fabbricazione dell'acciaio nei paesi della "vecchia" Unione Europea e da quali leggi è regolamentato nei vari stati dell'Unione; infine, si vuole focalizzare l'attenzione sul reimpiego delle scorie stesse nel campo dei cementi (Portland).

# Capitolo 1 – Introduzione

## 1.1 Stato dell'arte

La produzione della ghisa e dell'acciaio è fortemente connessa alla produzione di sotto-prodotti; il principale di questi ultimi è la scoria. L'industria siderurgica è stata da sempre interessata al riutilizzo di questo materiale, fin dalla nascita dei due “metalli fondamentali” [1].

Oggi, le scorie della ghisa e dell'acciaio sono fortemente utilizzate in molteplici campi di applicazione. La scoria d'altoforno è stata introdotta come materiale di partenza per la produzione del cemento, non appena Emil Langen ha scoperto le sue proprietà idrauliche, nel 1862. Successivamente all'introduzione del processo Bessemer, nel 1878, S. G. Thomas studia il possibile utilizzo della scoria fosfatica nel campo dei fertilizzanti. Dopo di che, è Hoyerman, nel 1880, al quale dev'essere attribuito il successo del riutilizzo vero e proprio. Da quel momento, la “scoria Thomas” si è rivelata essere l'elemento principale per i fertilizzanti agricoli, fino alla metà degli anni '60. Nel 1965 sono state vendute, solo in Germania, qualcosa come 3,5 milioni di tonnellate di scoria Thomas [1].

Ma, nella metà del XX secolo, un ulteriore cambiamento si verificò nell'ambito della produzione dell'acciaio: l'introduzione del soffiaggio ad ossigeno nei convertitori, vale a dire il processo con forno BOF. Questo metodo, tuttora, utilizza ghisa a basso tenore di fosforo. Nello stesso tempo, la carica per l'altoforno venne migliorata. Fu aumentato il contenuto di ferro, con il risultato che la quantità di scoria prodotta venne diminuita. Sebbene tali cambiamenti, nel funzionamento dell'altoforno, produssero solo piccole variazioni nella composizione della scoria, le indagini sul riciclo della stessa si intensificarono [1].

Per il basso contenuto di fosforo nella scoria BOF, questa non poté più essere riutilizzata nel campo dell'agricoltura, per cui il riciclo divenne più impegnativo. Ancora oggi sono in cantiere diversi studi per questo tipo di scorie, come si vedrà in dettaglio nei successivi capitoli.

Da quel momento, il lavoro di ricerca proseguì principalmente in maniera nazionale; non ci fu, cioè, uno scambio reciproco d'informazioni tra i paesi della Comunità Economica Europea rispetto al problema delle scorie.

Fu nel 1976 che gli stati europei decisero, per così dire, di riunire i comuni sforzi di ricerca sul riutilizzo dei sotto-prodotti della ghisa e dell'acciaio sotto un'unica struttura dal nome di "Comunità Europea per l'Acciaio e il Carbone" (ECSC).

Per l'urgenza di trovare in breve tempo delle sicure soluzioni, gli studi vennero concentrati sulla possibilità di riciclare le scorie BOF. Il fattore limitante nell'uso dei reflui prodotti con tale processo consisteva nell'insufficiente stabilità del volume, dovuta alla presenza di una determinata percentuale di calce libera, nonostante la scoria presentasse eccellenti proprietà meccaniche ed un'elevata compatibilità ambientale. Il problema della stabilità del volume continua, ancora oggi, ad essere il principale obiettivo del lavoro di ricerca sulle scorie dell'acciaio (soprattutto nell'ambito del reimpiego della scoria per prodotti cementizi e bituminosi), che si è tentato di controllare studiando nuovi e sempre più evoluti test di prevenzione (*steam test, leaching test, ecc*) [1].

Grande importanza assunse, infine, il processo di fusione dell'acciaio tramite l'impiego del forno elettrico ad arco (FEA); quest'ultimo sostituì il processo Martin-Siemens utilizzando come carica circa il 100% del rottame di ferro.

La scoria prodotta utilizzando i forni elettrici è simile alla ben nota scoria BOF anche se, a differenza di quest'ultima, il problema della stabilità del volume è dato ora dall'alto tenore di MgO che reagisce con l'acqua in maniera simile alla calce libera. Le scorie FEA trovano impiego negli stessi campi d'applicazione dei sotto-prodotti BOF [2], come ad esempio sono gli aggregati per la costruzione delle strade e delle strutture idrauliche. Non hanno applicazione, invece, nel campo dei fertilizzanti.

In futuro sarà necessario scoprire nuove tipologie di trattamento delle scorie dell'acciaio per raggiungere l'obiettivo finale di una "*zero waste steelmaking*". Queste, probabilmente, comporteranno anche l'impiego di

soluzioni alternative tali da comportare delle modifiche nel processo di produzione dell'acciaio stesso.

## 1.2 Legislazione vigente

In Europa e negli altri maggiori continenti c'è una grande richiesta di sotto-prodotti e aggregati, principalmente dall'industria dell'ingegneria civile e, in modo particolare, nei campi delle costruzioni in calcestruzzo o delle strade, come pure per fini idraulici (consolidamento degli argini dei fiumi). Ma ci sono anche altri obiettivi, dichiarati dalla stessa Comunità Europea:

1. proteggere l'ambiente e migliorare la qualità;
2. preservare la salute dell'uomo;
3. garantire la tutela e usare in maniera efficiente le risorse naturali.

Queste dichiarazioni ci fanno ritenere responsabili della salvaguardia delle risorse naturali attraverso l'uso dei sotto-prodotti industriali e in modo tale da accrescere il loro tasso di riciclo ovunque le proprietà tecniche e ambientali lo rendano applicabile [2].

Anni fa, la Commissione Europea redasse un documento chiamato Catalogo Europeo dei Rifiuti (EWC), nel quale le scorie venivano incluse entro due livelli:

- I. 10 02 01: Rifiuti dalla trasformazione delle scorie
- II. 10 02 02: Scorie non trattate

Addirittura, per tutti gli stati membri della OECD, ossia l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), le scorie sono annoverate sotto la voce di "prodotto" [1]. Prima, però, che queste o qualsiasi altro sotto-prodotto possano essere riutilizzati come materiale secondario, devono essere stimate le qualità dei sotto-prodotti stessi. Ogni Paese utilizza le sue procedure e le sue legislazioni per tali accertamenti; generalmente sono valutate sia le caratteristiche tecniche che gli impatti ambientali [1].

In Italia, ad esempio, vige il Decreto Ministeriale dello 05/02/1998, anche noto come Decreto Ronchi; in esso s'individuano, nell'Allegato 1 – Sub 1, ai

commi 13.12 e 13.13, i prodotti e si fissano i limiti che devono essere rispettati affinché i sotto-prodotti siano considerati non pericolosi.

Questo decreto fa seguito al “PIANO NAZIONALE PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE IN ATTUAZIONE DELL’AGENDA XXI”, approvato dal CIPE nella seduta del 28/12/1993 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 47, del 26/02/1994 [3].

Si fa inoltre riferimento alla norma europea CER in vigore dal 1° gennaio 2002.

## Capitolo 2 – Produzione dell'acciaio e delle scorie

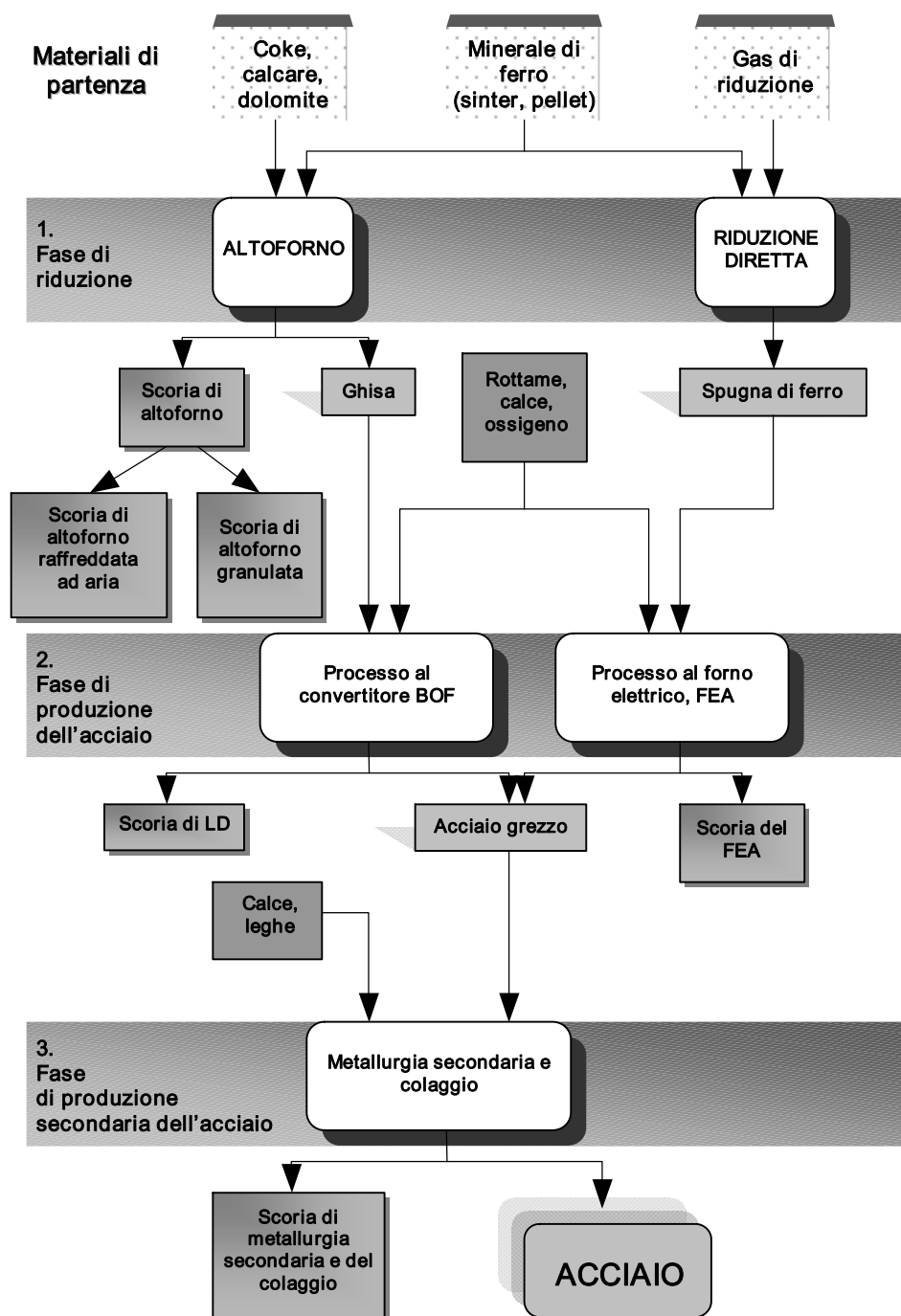
### 2.1 Generazione della scoria e sue tipologie

L'acciaio prodotto nel mondo, nel 2002, è stato di circa 900,5 Milioni di tonnellate [4]. Di questo, il 60% è stato prodotto partendo da minerale ed il 40% da cicli di produzione che fanno uso principalmente di rottame (il 33,9% circa, da ciclo elettrico), come può osservarsi dai dati nella tabella sottostante:

**Tabella 2. 1 – Produzione mondiale di acciaio grezzo nel 2002 [5]**

	Production million metric tons	Oxygen %	Electric %	Open Hearth %	Other %	Total %
Austria	6.2	89.5	10.5	-	-	100.0
Belgium	11.3	75.0	25.0	-	-	100.0
Finland	4.0	76.3	23.8	-	-	100.0
France	20.3	61.1	38.9	-	-	100.0
FR Germany	45.0	70.7	29.3	-	-	100.0
Italy	26.1	35.8	64.2	-	-	100.0
Luxembourg	2.7	-	100.0	-	-	100.0
Netherlands	6.1	98.0	2.0	-	-	100.0
Spain	16.4	25.6	74.4	-	-	100.0
Sweden	5.8	66.3	33.7	-	-	100.0
United Kingdom	11.7	75.1	24.9	-	-	100.0
Other EU	3.0	-	100.0	-	-	100.0
<b>European Union (15)</b>	<b>158.6</b>	<b>58.9</b>	<b>41.1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100.0</b>
Czech Republic	6.5	91.9	8.1	-	-	100.0
Hungary	2.1	80.5	19.5	-	-	100.0
Poland	8.4	69.3	30.6	0.1	-	100.0
Romania	5.5	52.7	47.3	-	-	100.0
Slovakia	4.3	93.0	7.0	-	-	100.0
Turkey	16.5	31.2	68.8	-	-	100.0
Others	4.9	39.0	60.9	-	0.1	100.0
<b>Other Europe</b>	<b>48.1</b>	<b>57.0</b>	<b>43.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>100.0</b>
Russia	59.8	61.4	14.9	23.7	-	100.0
Ukraine	33.4	49.9	3.0	47.2	-	100.0
Other former USSR	7.8	61.9	29.7	8.4	-	100.0
<b>former USSR</b>	<b>101.0</b>	<b>57.6</b>	<b>12.1</b>	<b>30.3</b>	<b>-</b>	<b>100.0</b>
Canada	16.0	59.7	40.3	-	-	100.0
Mexico	14.1	29.3	70.7	-	-	100.0
United States	92.2	49.3	50.7	-	-	100.0
<b>NAFTA</b>	<b>122.3</b>	<b>48.3</b>	<b>51.7</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100.0</b>
Argentina	4.4	41.9	58.1	-	-	100.0
Brazil	29.6	79.8	20.2	-	-	100.0
Chile	1.3	79.2	20.8	-	-	100.0
Venezuela	4.2	-	100.0	-	-	100.0
Others	2.6	23.7	76.3	-	-	100.0
<b>Central and South America</b>	<b>42.0</b>	<b>64.5</b>	<b>35.5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100.0</b>
Egypt	4.3	26.7	73.3	-	-	100.0
South Africa	9.1	54.6	45.4	-	-	100.0
Other Africa	2.3	20.2	79.8	-	-	100.0
<b>Africa</b>	<b>15.7</b>	<b>43.5</b>	<b>56.5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100.0</b>
Iran	7.3	29.8	70.2	-	-	100.0
Saudi Arabia	3.6	-	100.0	-	-	100.0
Other Middle East	1.3	-	100.0	-	-	100.0
<b>Middle East</b>	<b>12.2</b>	<b>17.9</b>	<b>82.1</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>100.0</b>
China	181.6	71.9	16.0	1.1	11.0	100.0
India	28.8	50.3	42.7	6.9	-	100.0
Japan	107.7	72.9	27.1	-	-	100.0
South Korea	45.4	54.8	45.2	-	-	100.0
Chinese Taipei	18.2	57.3	42.7	-	-	100.0
Other Asia	10.7	-	100.0	-	-	100.0
<b>Asia</b>	<b>392.4</b>	<b>66.0</b>	<b>27.8</b>	<b>1.0</b>	<b>5.1</b>	<b>100.0</b>
Australia	7.5	81.8	18.2	-	-	100.0
New Zealand	0.8	71.8	28.2	-	-	100.0
<b>World</b>	<b>900.5</b>	<b>60.0</b>	<b>33.9</b>	<b>3.8</b>	<b>2.2</b>	<b>100.0</b>

La figura 2.1, a pagina 10, mostra come la produzione dell'acciaio possa, fondamentalmente, essere divisa in tre fasi:



**Figura 2.1** – Descrizione delle fasi di produzione dell'acciaio e relative produzioni della scoria [1]

1. Riduzione nell'altoforno (BF) e processo di riduzione diretta;
2. Produzione dell'acciaio mediante il BOF e fusione nei FEA;
3. Affinazione dell'acciaio liquido mediante il trattamento metallurgico secondario [1].

Nella parte sinistra della figura 2.1 è descritto il ciclo integrale o da minerale:

- Altoforno (BF)
- BOF
- Trattamento secondario

e, nella parte destra il ciclo elettrico:

- Riduzione diretta
- FEA
- Trattamento secondario

In quest'ultimo ciclo, la riduzione diretta non è necessaria se il rottame è l'unica risorsa per la fabbricazione dell'acciaio. In ognuna delle tre fasi è generato un certo tipo di scoria:

1. Scoria di altoforno (BF), le cui proprietà possono essere influenzate dalle condizioni di raffreddamento (figura 2.2);
2. Scorie di acciaio provenienti dal trattamento in BOF (o scorie LD) ed in FEA;
3. Scorie da trattamento secondario dell'acciaio.

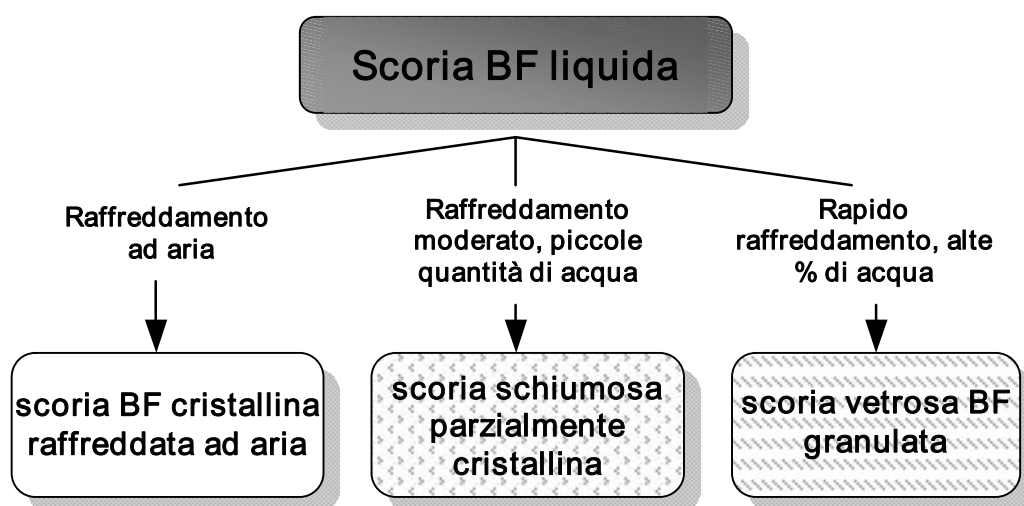


Figura 2.2 – Produzione dei tipi di scoria BF per diverse condizioni di raffreddamento [1]

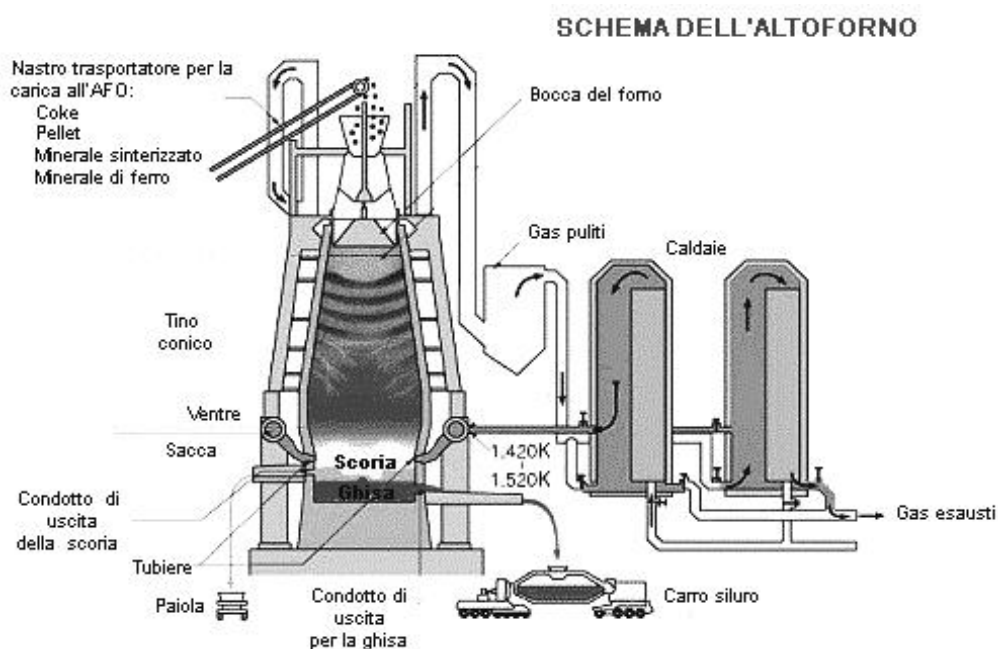
La formazione delle scorie è il risultato di complessi processi fisici e chimici tra la carica metallica (minerali, rottame, ecc.), quella non metallica (dolomite, calce, ecc.), le fonti energetiche (coke, ossigeno, ecc.), come pure i refrattari [1].

## 2.2 Ciclo integrale

### 2.2.1 Altoforno (BF)

L'altoforno è l'impianto attraverso il quale si produce la ghisa. Questo, altro non è che un forno a tino nel quale, dall'alto, sono introdotti i materiali di carica (minerale, coke, fondenti ed aggiunte) costituenti il cosiddetto *letto di fusione*, mentre nella parte bassa, attraverso gli ugelli, è insufflata aria calda (vento) che serve alla combustione del coke [6].

Nella figura sottostante è riportato lo schema di un altoforno; in esso sono evidenziate le seguenti parti che si susseguono procedendo dal basso:



**Figura 2.3** – Schema delle parti principali di un altoforno [7]

- Il crogiolo [6], avente forma cilindrica, nel quale si raccolgono la ghisa prodotta e le scorie fuse che la sovrastano; in esso sono praticati i fori per il passaggio degli ugelli ed i fori di colata per la ghisa e la

loppa (appena al di sopra del livello normale a cui arriva la ghisa); la temperatura passa da 1800–2000°C a 1600°C.

- La sacca; tronco di cono leggermente aperto verso l'alto, la cui temperatura oscilla tra i 1350 ed i 1600°C.
- Il ventre, che è la zona a massimo diametro e, normalmente, è costituita da un brevissimo tratto cilindrico.
- Il tino; è il secondo tronco di cono con altezza molto maggiore della sacca e conicità invertita. In esso le temperature variano tra i 400°C per la parte superiore, ai 1350°C per la parte prossima al ventre.
- La bocca, che è costituita da un breve tratto cilindrico. Attraverso essa avviene l'introduzione dei materiali di carica e la temperatura oscilla tra i 200 ed i 400°C [6].

### 2.2.2 Convertitore ad ossigeno (BOF)

I convertitori del processo LD, o BOF (Basic Oxygen Furnace), sono recipienti a cono simmetrico e a fondo chiuso; sono costituiti da un anellone di sostegno con perni, da cuscinetti d'appoggio e da un gruppo riduttore di rotazione. Internamente, sono rivestiti da materiale refrattario costituito da mattoni di magnesite e di dolomite cotta e catramata [6]. Per un esempio dei dettagli e delle tipologie di BOF basta osservare la figura seguente.

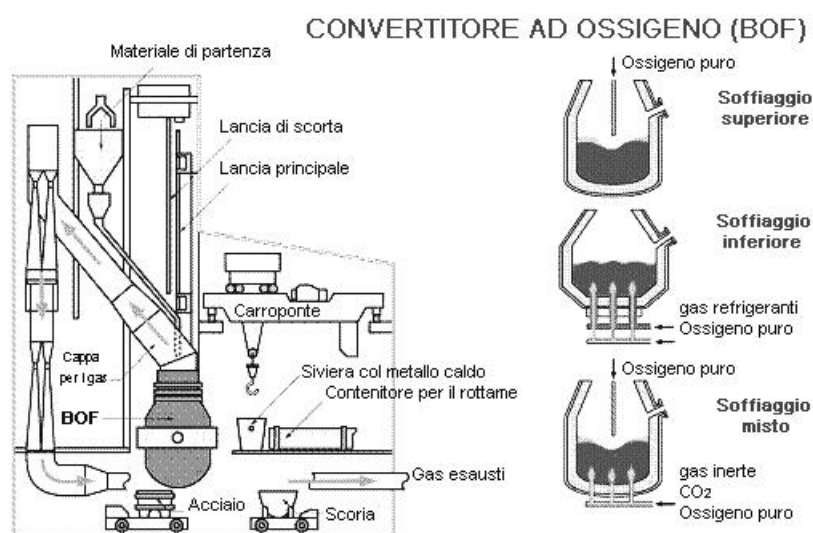


Figura 2.4 – Tipologie di convertitori BOF [7]

Nella fabbricazione dell'acciaio con il convertitore BOF le operazioni fondamentali sono: la carica della ghisa nel convertitore, il soffiaggio dell'ossigeno e la colata in siviera. Il processo, cioè, consiste nella decarburazione della ghisa mediante l'insufflaggio di ossigeno iniettato a velocità supersonica attraverso una lancia inserita dall'alto, attraverso la bocca del forno. L'acciaio che si ottiene con questo processo è un acciaio a bassissimo contenuto di fosforo (0,015%) e a basso o medio tenore di carbonio. Inoltre, il tenore di azoto è compreso tra 0,002 e 0,004%, che è inferiore a quello ottenuto al forno elettrico [6].

### 2.2.3 Scorie BF

Come schematizzato in figura 2.2, in dipendenza della modalità di raffreddamento, si avranno diversi tipi di fasi della scoria d'altoforno: il raffreddamento in aria genera, ad esempio, la scoria cristallina BF raffreddata ad aria (ABFS); mentre il rapido raffreddamento con acqua, o anche con aria, genera la scoria BF granulata, la cosiddetta GBS [1]. Tuttavia, la composizione chimica è la stessa in entrambi i materiali, come mostrato nella tabella sottostante:

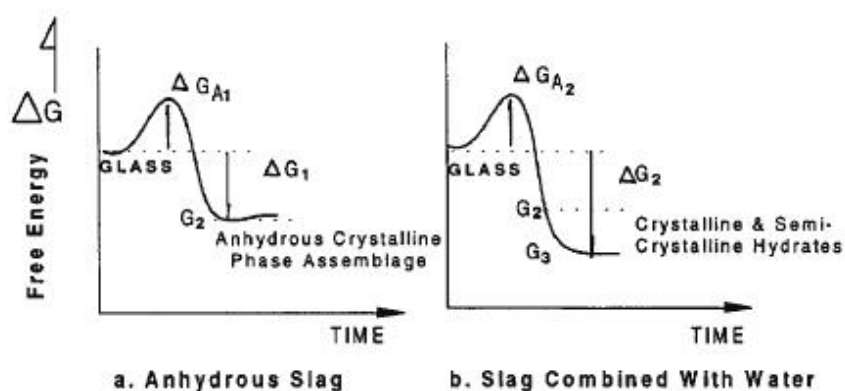
Tabella 2. 2 – Composizione chimica delle scorie BF [1]

Parametro	% in peso	Elementi traccianti	mg/kg
SiO <sub>2</sub>	33-40	As	<1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8-15	Cd	<0,5
CaO	34-43	Cr	10-100
MgO	7-16	Cu	<10
Fe <sub>tot</sub>	0,1-0,7	Hg	<0,1
Mn <sub>tot</sub>	0,1-0,8	Ni	<5
TiO <sub>2</sub>	0,3-2,5	Pb	<20
S <sub>tot</sub>	0,2-1,9	Zn	<100
CaO/SiO <sub>2</sub>	1-1,2		

Il contenuto degli elementi traccianti nelle scorie d'altoforno è molto basso; la maggior parte degli elementi è ridotta o addirittura sciolta nel metallo, oppure evapora, come fanno Zn, Pb e gli alcali.

**SCORIA BF GRANULATA (GBS):** Per il tipo di raffreddamento, quando solidifica, lo fa in maniera tale che la sua struttura diventi di tipo vetroso; la densità delle scorie GBS è, così, approssimativamente pari a  $2.9\text{g/cm}^3$  [1].

Questo tipo di scorie, normalmente, a temperatura ambiente, non gode di proprietà idrauliche, ma richiede una certa quantità di energia di attivazione affinché inizi il processo d'idratazione ed un meccanismo che favorisca il proseguimento dell'idratazione stessa. La fase vetroso, che costituisce circa il 95% della massa della scoria BF, è termodinamicamente metastabile rispetto all'unione di fasi cristalline aventi la stessa composizione totale; come si vede nella figura 2.5, cioè, da un elevato scambio di energia libera si ottiene la formazione delle fasi idratate, sia cristalline che semicristalline [8].



**Figura 2. 5** – Schema dei diagrammi di energia libera per le scorie GBS ( $\Delta G_{A1}$  e  $\Delta G_{A2}$  sono le energie libere di attivazione,  $\Delta G_1$  è il conseguente rilascio di energia libera potenziale dovuta alla cristallizzazione della scoria vetroso,  $\Delta G_1$  è il maggiore scambio di energia libera conseguente alla formazione delle fasi idratate [8])

L'idratazione della scoria inizia immediatamente dopo la miscelazione con l'acqua ed inizia a formarsi, sulla superficie della scoria stessa, anche uno strato protettivo che inibisce la penetrazione dell'acqua e, di conseguenza, un'ulteriore dissoluzione degli ioni della scoria [8].

Molto spesso [1], per caratterizzare le proprietà idrauliche di questo tipo di scorie d'altoforno è utilizzato il valore F, sviluppato da F. Keil e dato dalla seguente relazione:

$$F = \frac{(CaO + \frac{1}{2}S + \frac{1}{2}MgO + Al_2O_3)}{(SiO_2 + MnO)} \dots\dots\dots(1)$$

Quando  $F < 1,5$ , le scorie GBS hanno proprietà idrauliche regolari; mentre, quando  $F > 1,5$  le GBS hanno buone proprietà idrauliche. Il valore medio di  $F$  è approssimativamente pari a 1,62.

Proprio per le proprietà idrauliche descritte pocanzi le scorie GBS sono utilizzate come materiali di partenza per la produzione dei cementi [1].

**SCORIA BF RAFFREDDATA AD ARIA (ABFS):** Questa seconda tipologia di scoria d’altoforno è sfruttata, solitamente, negli aggregati per gli impieghi stradali. Come si vede nella figura qui sotto, le scorie ABFS aventi maggiore densità possono essere utilizzate in tutti gli strati di una strada; a differenza di quelle di tipo “D” che possono essere sfruttate unicamente per lo strato di fondazione, proprio per la loro scarsa resistenza a compressione [1].

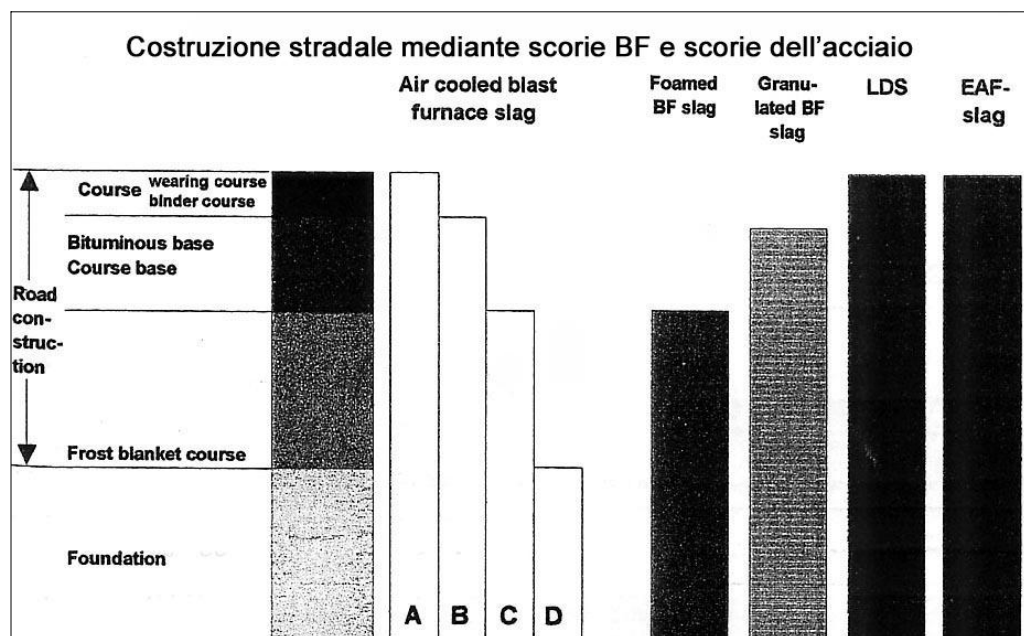


Figura 2. 6 – Uso delle ABFS e delle scorie dell’acciaio per gli impieghi stradali [1]

Ma le scorie ABFS trovano utilizzazione anche nel campo dei fertilizzanti, in agricoltura, e nella selvicoltura.

Per l’impiego in agricoltura la scoria deve subire un processo di macinazione tale da ridurre i granuli a dimensioni inferiori a 1 mm; invece, per

lo sfruttamento nella selvicoltura possono utilizzarsi materiali più scadenti, quindi scorie ABFS i cui granuli abbiano dimensione inferiore ai 3,15 mm, per il 97% della quantità totale [1].

## 2.3 Cenni sul ciclo elettrico

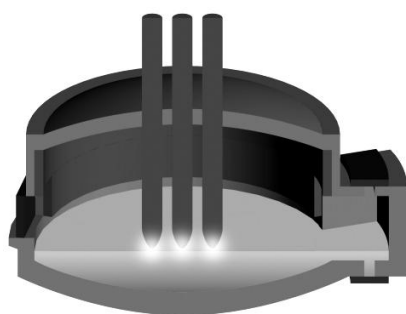
### 2.3.1 Forno elettrico ad arco (FEA)

La fonte principale che costituisce la carica del forno elettrico è il rottame. La sua introduzione nel forno è effettuata dall'alto, dopo aver contemporaneamente sollevato, spostato lateralmente gli elettrodi e ruotato la volta, utilizzando apposite ceste con fondo apribile visibili nella figura a lato; in tal modo si raggiungono una notevole rapidità nella carica del forno ed un'ottima distribuzione della stessa all'interno del crogiuolo [9]. In genere, sono alimentati a corrente alternata e sono trifasi; hanno a disposizione tre elettrodi di grafite opportunamente trattata e lavorata, così che abbiano elevate proprietà elettriche e meccaniche.



**Figura 2. 7** – Carica del rottame nel FEA [5]

Nel FEA l'arco si stabilisce direttamente tra l'estremità dell'elettrodo e la carica metallica; la fusione del rottame avviene principalmente per effetto del



**Figura 2. 8** – Sezione del FEA [10]

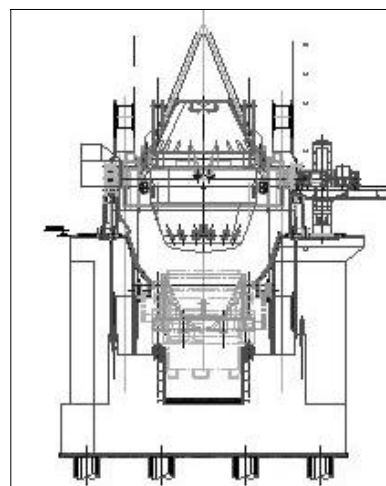
calore irraggiato dall'arco. Il riscaldamento del metallo è dovuto sia alla trasmissione del calore per convezione, conduzione ed irraggiamento che ha luogo nel punto caldo della colonna d'arco in contatto con la carica solida, sia all'irraggiamento dell'arco direttamente sul bagno e per riflessione sulla volta del forno, sia, ancora, ad un effetto di

convezione dovuto alla colonna d'arco che proietta intorno gas ad elevatissima temperatura (circa 2000°C). Inoltre, il passaggio della potenza elettrica al bagno metallico avviene attraverso lo strato di scoria disposta sopra il bagno [6].

Il primo importante passo per l'evoluzione del forno elettrico è stata l'introduzione della tecnologia di trattamento secondario dell'acciaio in apposite postazioni fuori forno (tecnologia al convertitore, trattamenti in siviera). Ciò ha consentito al FEA di specializzarsi unicamente nella fusione del rottame.

### ***2.3.2 Convertitore AOD***

L'acciaio fuso proveniente dal FEA è riversato in un contenitore detto vessel nel quale, attraverso una serie di reazioni chimiche, l'acciaio diventa inossidabile. Questo è installato all'interno di un anello in carpenteria saldato, come si nota a lato, detto anello di sospensione, che ne consente il movimento di rotazione tramite i due perni ai quali è collegato.



Nella parte inferiore del convertitore sono sistemate sei tubiere per l'insufflazione dei gas inerti. Il processo d'affinazione in AOD è caratterizzato da cinque fasi operative:

- ✓ Fase di decarburazione;
- ✓ Fase di riduzione;
- ✓ Fase di desolfurazione;
- ✓ Fase di degasaggio;
- ✓ Aggiunte finali [11].

## **2.4 Scorie FEA e scorie BOF**

### ***2.4.1 Composizioni chimica e minerale***

Le scorie del convertitore ad  $O_2$  e quelle del forno elettrico sono generalmente confrontabili. Le differenze derivano dall'uso della dolomite nel primo piuttosto che della calce, con l'effetto di un maggior contenuto di  $MgO$  nella scoria [2].

La tabella seguente mostra l'intervallo della composizione chimica delle scorie BOF e FEA:

**Tabella 2.3** – Composizione chimica delle scorie BOF e FEA (%) [2]

Component	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>total</sub>	CaO <sub>free</sub>
BOF-slag low MgO-content	45-55	12-18	<3	<3	<5	<2	14-20	<10
BOF-slag high MgO-content	42-50	12-15	<3	5-8	<5	<2	15-20	<10
EAF-slag low MgO-content	30-40	12-17	4-7	4-8	<6	<1.5	18-28	<3
EAF-slag high MgO-content	25-35	10-15	4-7	8-15	<6	<1.5	20-29	<3

Le scorie suddette sono composte da silicati di calcio aventi un tenore di CaO compreso tra il 42 ed il 55% ed una percentuale di SiO<sub>2</sub> tra 12 e 18%. Come si vede, sempre dalla tabella 2.3, le scorie provenienti dal forno elettrico hanno un tenore di CaO compreso tra 25 e 40% e di SiO<sub>2</sub> compreso tra 10 e 17%. Il loro contenuto di MgO potrebbe essere maggiore per le reazioni con il rivestimento in refrattario [2].

Le principali fasi minerali delle scorie BOF e FEA sono il silicato dicalcico, la ferrite dicalcica e la wustite. Il primo silicato è stabilizzato dal contenuto di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> della scoria stessa, che ne impedisce la disintegrazione se a contatto con altre scorie.

Il contenuto di calce libera e dello MgO libero sono i componenti più importanti per lo sfruttamento di questo tipo di scorie nell'ambito dell'ingegneria civile, proprio per la loro stabilità di volume. Infatti, a contatto con l'acqua queste fasi minerali tenderanno a reagire per formare gli idrossidi; in dipendenza del tasso di calce libera e/o di MgO libero, questa reazione genera un incremento del volume dei frammenti di scoria e, di conseguenza, una perdita di resistenza. Perciò la stabilità del volume è un criterio chiave per lo sfruttamento delle scorie BOF e FEA come materiali da costruzione (cementi) [2].

### ***2.4.2 Proprietà tecniche***

Le forze statiche e dinamiche e le sollecitazioni ambientali, come la pioggia, il calore, il gelo e il disgelo, richiedono un adeguato comportamento a lungo termine sotto queste condizioni per tutte le strutture che debbono essere edificate. Perciò, le proprietà tecniche degli aggregati prodotti per scopi edili sono di fondamentale importanza [2].

Le proprietà più importanti sono:

- La densità di massa;
- La forma;
- La resistenza alla frammentazione (resistenza all'impatto e alla compressione);
- La resistenza;
- L'assorbimento dell'acqua;
- La resistenza al gelo e al disgelo;
- La stabilità del volume;
- La resistenza all'abrasione.

Negli ultimi 30 anni, il più famoso centro ricerche tedesco, lo FEhS, ha studiato queste proprietà sia negli aggregati ottenuti con le scorie BOF e FEA, sia in quelli naturali (ghiaia e granito). La tabella sottostante mostra i valori medi delle proprietà appena elencate ricavati da questi studi [2].

**Tabella 2. 4** – Proprietà tecniche delle scorie BOF e FEA lavorate, confrontabili con quelle degli aggregati naturali [2]

Characteristics	BOF-slag	EAF-slag	Granite	Flint gravel
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	3.3	3.5	2.5	2.6
Shape — thin and elongated pieces (%)	< 10	< 10	< 10	< 10
Impact value (%/wt.)	22	18	12	21
Crushing value (%/wt.)	15	13	17	21
10% fines (KN)	320	350	260	250
Polishing (PSV)	58	61	48	45
Water absorption (%/wt.)	1.0	0.7	< 0.5	< 0.5
Resistance to freeze-thaw (%/wt.)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 1
Binder adhesion (%)	> 90	> 90	> 90	> 85

L'alto valore della densità di massa delle scorie BOF e FEA,  $>3,2 \text{ g/cm}^3$ , qualifica queste scorie come materiali da sfruttare nel campo delle costruzioni dell'ingegneria idraulica. In Germania, 400'000 tonnellate all'anno, circa, di aggregati sono utilizzati per opere di consolidamento degli argini dei fiumi e dei letti degli stessi contro l'erosione. Tutte le altre proprietà tecniche sono comparabili e addirittura migliori rispetto a quelle che presentano gli aggregati naturali; in particolare, l'elevato livello di resistenza espresso dai valori d'impatto e di compressione sono preponderanti. Entrambi i valori PSV e quello relativo all'adesione agglomerante, quest'ultimo  $>90\%$ , qualificano

queste scorie come ottimi aggregati per impieghi stradali, specialmente nel campo degli asfalti [2].

Tutte queste applicazioni per le scorie BOF e FEA sono comunque praticabili se è verificata la condizione della stabilità di volume.

Rispetto a questa fondamentale proprietà, per garantirne un valore sufficiente, le aziende siderurgiche europee impiegano vari test di prova; tra questi, quello più importante, annoverato tra i metodi standard europei EN 1774-1, è il cosiddetto *steam test*, schematizzato qui di seguito.

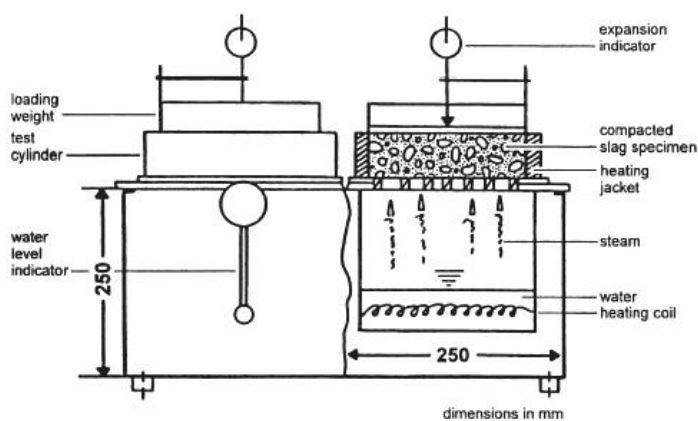


Figura 2. 10 – Principio di funzionamento dello *steam test* [2]

Come si nota in figura il provino (agglomerato), posto in un apposito alloggio, è fatto lambire da un flusso di vapore a circa 100°C, a pressione ambiente. L'umidità, necessaria per la reazione della calce libera e dello MgO libero, è continuamente convogliata verso il provino. L'aumento di volume causato da questa reazione è letto da un indicatore posto proprio sulla superficie dell'agglomerato. La figura a lato mostra la forma dei risultati che scaturiscono da questo tipo di test; la curva, in funzione del tempo, è quella tipica per una scoria BOF o FEA. La pendenza della curva dipende dal tipo di scoria e, principalmente, dal contenuto di calce libera o di MgO libero presente nella scoria stessa [2].

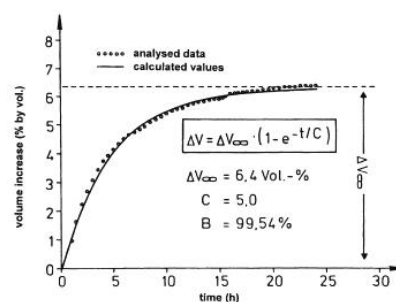


Figura 2. 11 – Tipico andamento per l'aumento di volume nelle scorie BOF e FEA attraverso lo *steam test* [2]

## Capitolo 3 – Riutilizzo delle scorie

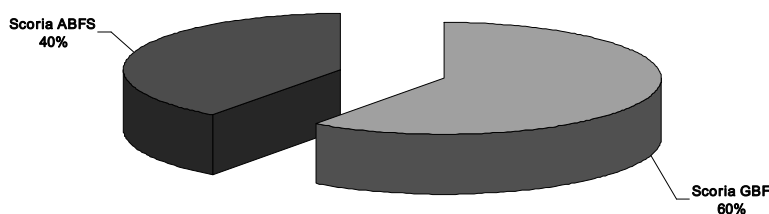
### 3.1 Rassegna delle possibili applicazioni delle scorie BF in Europa

La scoria d’altoforno è stata utilizzata da subito, ossia fin da quando fu avviato il processo BF. Già inizialmente era riutilizzata nel campo delle costruzioni; ma, dopo aver scoperto che poteva trovare impiego anche nella produzione del cemento, quest’ultima applicazione divenne quella di capitale importanza [1]. Le successive ed intense attività di ricerca sulle proprietà delle scorie d’altoforno granulate (GBF), il miglioramento delle condizioni di raffreddamento ed il raggiungimento di una ben precisa composizione per la scoria stessa, hanno fatto delle scorie GBF il materiale di partenza più importante per la fabbricazione del calcestruzzo. Il loro riciclaggio è altresì favorito dai sempre maggiori problemi che presentano le altre tipologie di scorie BF: vale a dire, il problema della formazione della polvere e della parallela emissione di esalazioni.

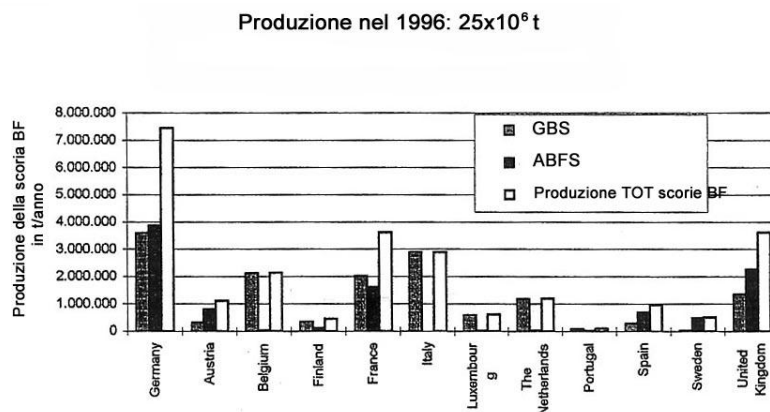
Nel 1996, in Europa, sono state prodotte circa 25 milioni di tonnellate di scorie d’altoforno. Il 60% circa di queste scorie ha subito il processo di pellettizzazione o di granulazione per la riduzione in granuli della scoria stessa, favorendo la produzione di sotto-prodotti per cementi, come si vede dal diagramma a torta seguente [1]:

#### Produzione delle scorie GBF ed ABFS in Europa

Produzione del 1996: 25 Mln di tonnellate

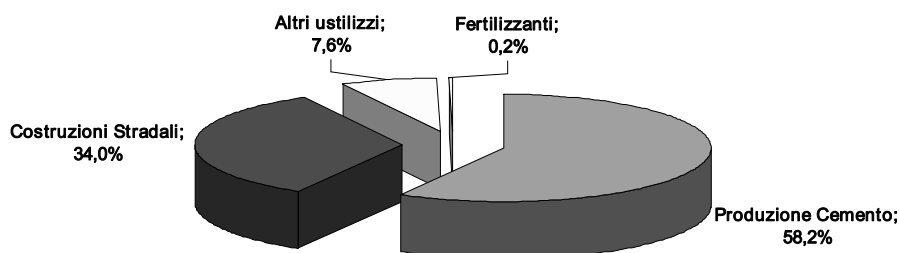


Tuttavia, la percentuale di scoria GBF prodotta differisce nei vari stati della EU. In alcuni Paesi, come ad esempio l'Italia, tutta la scoria d'altoforno viene granulata; mentre in altri stati è principalmente utilizzata come ABFS e, di conseguenza, riciclata per le costruzioni stradali [1]:



La figura sottostante mostra le principali applicazioni della scoria d'altoforno in Europa:

### Uso delle scorie BF in Europa Produzione del 1996: 25 milioni di tonnellate



Si distinguono tre gruppi principali: il riutilizzo delle scorie BF nel campo dei cementi e delle malte, con circa il 58% della produzione; il 34% è riutilizzato per gli aggregati nelle costruzioni stradali e come materiali da costruzione e una parte minore dello 8% circa per il riciclaggio; infine, lo 0,2% come impiego per i fertilizzanti.

Come visto pocanzi, anche l'uso delle scorie BF varia da stato e stato in Europa:

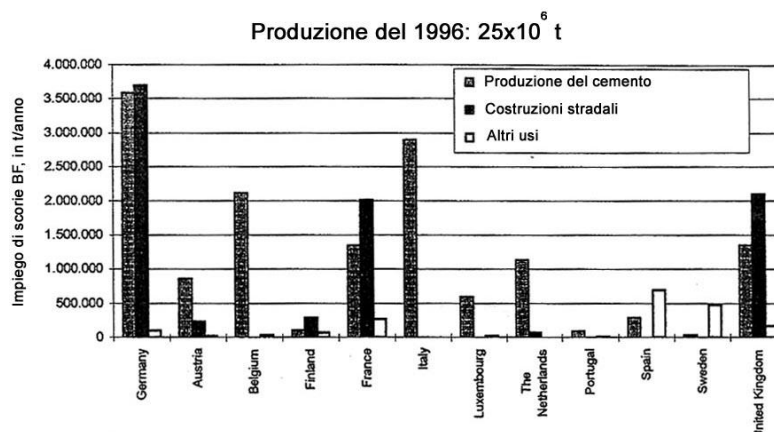


Figura 3. 4 – Utilizzi della scoria BF nei vari Paesi della UE [1]

### 3.2 Composizione del cemento Portland e confronto con le scorie BF e BOF

Un confronto immediato tra le composizioni di differenti tipi di scorie e i cementi è dato nella tabella seguente:

Tabella 3. 1 – Percentuale in peso dei costituenti chimici [8]

Constituent	Portland cement	Blast furnace slag	Steel slag†	High alumina	Erz cement
CaO	64.1	36–45	35	37.7	64
SiO <sub>2</sub>	22	33–42	18	5.3	22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5	10–16	3.6	38.5	2.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.0	0.3–2.0	8.8	12.7	6.2
MgO	1.4	3–12	11.5	0.1	0.9
SO <sub>3</sub>	2.1	—	—	0.1	1.8
MnO	—	0.2–1.5	6.5	—	—
FeO	—	—	18	3.9	—

La scoria che deriva dalla produzione dell'acciaio (scoria BOF), come la maggior parte delle scorie metallurgiche, ha una composizione chimica simile a quella del cemento Portland [8]. Tuttavia, ci sono significative differenze, non solo in tutta la composizione, ma soprattutto nelle specie mineralogiche presenti in ogni materiale, come si nota dai valori riportati nella tabella 3.2 a pagina 25.

Tabella 3. 2 – Fasi minerali predominanti associate alla scoria dell'acciaio [8]

Formula	Name	Synonym	Melting point (C)
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Alite	Tricalcium silicate	1900
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Belite	Dicalcium silicate	2130
$\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Belite		
$\alpha\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Bredigite		
$2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Dicalcium ferrite	Calcium ferrite	1430
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Brown millerite		1410
FeO	Wustite	Iron oxide	
MgO	Periclase	Magnesia	2800
CaO	Lime	Calcia	2570

Le principali differenze con i cementi, per quanto riguarda la composizione di una scoria dell'acciaio, consistono in un elevato contenuto di ossido di ferro, che esiste in entrambi gli stati di ossidazione, ovvero nei suoi stati bi- e trivalente; e nella presenza di una sostanziale percentuale di calce libera [8].

Per quanto riguarda i minerali, invece, in un comune cemento Portland sono presenti: l'*alite* ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) o silicato tricalcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), la *belite* ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) o silicato dicalcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), la *celite* ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o alluminato tricalcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e la ferrite alluminio tetracalcica ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), abbreviata molto spesso con la scrittura ( $\text{C}_4\text{AF}$ ). Ognuno di questi composti gioca un ruolo specifico nella produzione di qualità del cemento [8]. Spesso, sono poi aggiunti alla composizione suddetta altri silicati e l'ossido di ferro, proprio per bilanciare la composizione stessa; così che il contenuto degli ossidi nel cemento giunge ad essere pari al 62–68% di CaO, al 21–24% di  $\text{SiO}_2$ , al 4–8% di  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ed al 2–5% di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Composizione che conduce al 45–65% di  $\text{C}_3\text{S}$ , al 15–35% di  $\text{C}_2\text{S}$ , al 4–14% di  $\text{C}_3\text{A}$  e al 10–18% di  $\text{C}_4\text{AF}$ . Altri ossidi possono influenzare negativamente la qualità del cemento. Lo MgO, quando miscelato con acqua, causa la formazione di cricche successivamente all'indurimento del cemento; quindi, non dovrebbe mai eccedere il 5%. Inoltre la presenza di ossidi alcalini come  $\text{K}_2\text{O}$  o  $\text{Na}_2\text{O}$  possono causare guasti nel cemento. La calce libera (CaO), inoltre, agisce allo stesso modo dello MgO portando alla formazione di cricche in corrispondenza alla presa del cemento [12].

I cementi Portland sono divisi in varie tipologie: esiste il tipo *ordinario* (I tipo), il tipo *modificato* (II tipo), quello *a indurimento rapido* (III tipo), uno di IV tipo ed infine quello *resistente ai solfati* (V tipo); ma ne esistono anche di altri tipi. Il cemento Portland BF, ad esempio, (tipo IS) viene prodotto per macinazione o miscelazione del clinker del Portland insieme con la scoria GBF. L'idratazione della scoria inizia nel momento in cui la calce, liberata nell'idratazione del cemento Portland, fornisce la corretta alcalinità. La successiva idratazione, poi, non dipende dalla calce. Il cemento prodotto utilizzando la scoria BF è comparabile al Portland del I tipo per le eccellenti caratteristiche e gli ottimi valori d'indurimento, anche se le resistenze iniziali sono più basse. Tipicamente, viene utilizzato nel calcestruzzo proprio per il più basso calore d'idratazione e nelle costruzioni a contatto con l'acqua di mare per la maggiore resistenza ai solfati, cioè proprio per il più basso contenuto di C<sub>3</sub>A [12].

Quando la ghisa è convertita in acciaio tramite il processo con forni BOF, si ha un'enorme produzione di scoria da convertitore. Questa, però, come ho già anticipato all'inizio della pagina precedente, non viene utilizzata nel cemento Portland ed ha trovato solo qualche applicazione nel campo delle costruzioni e delle pavimentazioni stradali, nelle dighe, nelle banchine e in agricoltura. Il problema fondamentale nell'utilizzo della scoria BOF nel campo dell'ingegneria civile sta proprio nella possibile presenza di calce libera poiché, quando questa idrata, il suo volume aumenta e il rigonfiamento può causare il parziale o totale sollevamento degli strati superficiali della struttura [12].

Per di più, si hanno anche le soluzioni solide di *wustite*, che sono le fasi minerali predominanti nella scoria dell'acciaio, ma che non sono presenti nei cementi Portland. Queste soluzioni solide non possiedono naturali proprietà cementizie e non si combinano a formare minerali idraulici durante il raffreddamento del fuso. La wustite ha, però, la proprietà d'innalzare il tenore di calcio nella soluzione fino al 27%, in maniera tale che questo possa combinarsi a formare silicato tricalcico idraulico [8].

Esiste, tuttavia, un approccio per l'incorporazione di questo tipo di scorie nel cemento. Ciò consiste nell'aggiungere la scoria suddetta a valle del processo

di produzione del clinker, attraverso la miscelazione con il clinker del cemento Portland, il gesso e, possibilmente, anche la scoria d'altoforno. Le miscele cementizie che si ottengono attraverso un processo di tal genere prendono il nome di SSC ed hanno un chiaro vantaggio economico dato, sostanzialmente, dal risparmio dei costi dell'energia [8].

### 3.3 Un esempio applicativo

Per concludere questa breve rassegna sul riutilizzo delle scorie d'altoforno e quelle derivanti dai processi LD o BOF voglio riportare i risultati relativi ad un caso applicativo, ossia quelli di uno studio condotto da un gruppo di ricerca cinese proprio sugli SSC descritti pocanzi e, quindi, mostrare la validità delle ricerche condotte fino ad oggi sulle scorie BOF.

I ricercatori cinesi hanno studiato un particolare SSC (tipo 525#) costituito da scorie BOF e BF, clinker, gesso ed una particolare miscela A. Impiegando quest'ultima, lo SSC di tipo 525# può essere fabbricato facilmente e può essere risolto il principale problema connesso al processo di produzione di questi materiali, ovvero il basso valore della resistenza iniziale [13], come pure quello correlato al lento indurimento del cemento. La struttura porosa e la resistenza dello SSC dopo 28 giorni sono simili a quelle del cemento Portland; inoltre hanno riscontrato proprietà ultime addirittura superiori. Per di più, il continuo confronto con le proprietà del cemento Portland ha portato a riscontrare per lo SSC buone proprietà di durabilità, buone resistenze alle sostanze nocive per i cementi quali i solfati ed i carbonati e una evidente riduzione delle reazioni degli aggregati alcalini [13].

La tabella a fianco riporta i risultati delle prove di resistenza condotte sulle malte cementizie SSC. K0 indica il cemento Portland, mentre K1÷K8 sono gli SSC aventi composizioni differenti.

**Tabella 3. 3** – Risultati dei test di resistenza delle malte cementizie [13]

NO.	Compressive Strength						flexural strength		
	3D	7D	28D	90D	180D	360D	3D	7D	28D
k0	37.0	50.2	69.1	79.3	80.2	86.6	6.6	7.3	8.0
k1	30.8	46.1	65.0	71.2	78.1	79.2	5.1	5.8	8.0
k2	23.7	39.4	55.9	63.5	71.7	73.2	3.7	5.1	6.5
k3	18.2	29.9	49.9	66.6	64.8	67.6	3.4	4.7	6.2
k4	34.8	50.5	65.3				5.6	6.3	7.8
k5	32.5	49.5	65.3				5.4	6.9	8.1
k6	44.5	49.2	61.7				7.4	8.8	9.3
k7	40.8	49.7	60.8				6.9	9.1	9.2
k8	38.7	50.2	66.6				6.6	8.3	9.7

I risultati sperimentali indicano che la resistenza degli SSC dopo 28 giorni è simile a quella del cemento Portland, benché la quantità di clinker utilizzata per gli aggregati sia solamente del 30%. Le resistenze iniziali e le ultime, per alcuni aggregati (K6÷K8), sono addirittura migliori di quelle del Portland [13].

Per quanto riguarda la resistenza chimica, i risultati sperimentali hanno evidenziato il fatto che le resistenze del Portland diminuiscono a contatto con varie soluzioni corrosive (acqua, acqua di mare, 3%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3%MgSO<sub>4</sub>), mentre quelle degli SSC si mantengono inalterate o, addirittura, tendono ad aumentare.

**Tabella 3. 4** – Risultati dei test di resistenza chimica [13]

Cement	water	Sea water	3%Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3%MgSO <sub>4</sub>
PC	10.2/58.4	9.2/58.4	9.2/53.6	8.5/53.3
SSC1	6.4/55.3	10.2/55.7	9.2/53.8	7.8/52.6
SSC2	6.4/56.3	9.1/59.6	8.1/57.7	8.7/59.9

La carbonatazione è il risultato della permeabilità di CO<sub>2</sub> all'interno dei pori che costituiscono la superficie del cemento e può condurre ad un abbassamento delle proprietà meccaniche del cemento. Dai risultati sperimentali i ricercatori hanno constatato che la resistenza degli SSC aumenta considerevolmente successivamente a questo processo. La tabella 3.5 mostra, inoltre, che l'espansione generata dalla reazione degli aggregati alcalini negli SSC è molto più bassa di quella mostrata dal cemento Portland [13].

**Tabella 3. 5** – Valori di espansione per la reazione degli aggregati alcalini [13]

	PC	SLC1	SLC2
Opal	1.324	0.704	0.362
Chert	0.170	0.060	0.080

La porosità dei pori sulla superficie del cemento, la forma e la distribuzione dei pori stessi influiscono non solo sulla resistenza della malta cementizia, ma anche sulla durabilità del cemento; in generale, se i pori capillari diminuiscono, anche la porosità della superficie diminuirà. Dai risultati sperimentali, riportati nella tabella 3.6, i ricercatori hanno osservato che la grandezza pericolosa per il poro (>100nm) praticamente scompare a

distanza di 3 anni. Questo significa che la struttura porosa degli SSC migliora, probabilmente per il ritardo del processo d'idratazione; cioè, i prodotti d'idratazione riempiono gradualmente gli spazi liberi nel cemento portando ad un aumento della densità della struttura. Tutto ciò tende a migliorare la durabilità degli SSC [13].

**Tabella 3. 6** – Risultati dei test sulla porosità [13]

Age Sample	7 days			28 days			3 years	
	PC	SSC- 1	SSC- 2	PC	SSC- 1	SSC- 2	SSC- 1	SSC- 2
porosity (%)	14.8	15.9	15.7	13.6	14.8	15.1	7.64	10.8
Volume of pores (mm <sup>3</sup> %)	70.1	77.2	74.3	65.3	76.8	76.3	35.8	50.2
(>100nm%)	13.8	12.5	11.8	10.0	18.4	14.3	4.3	0.0
100-50nm	3.8	15.1	12.9	6.2	18.3	7.8	12.8	17.9
50-10nm	60.1	53.3	60.8	69.1	40.5	58.6	56.9	64.8
<10nm	21.9	18.8	14.4	14.5	22.6	9.1	26.6	17.3
Medium size(nm)	21.7	29.2	28.7	26.4	31.0	25.0	9.9	14.5

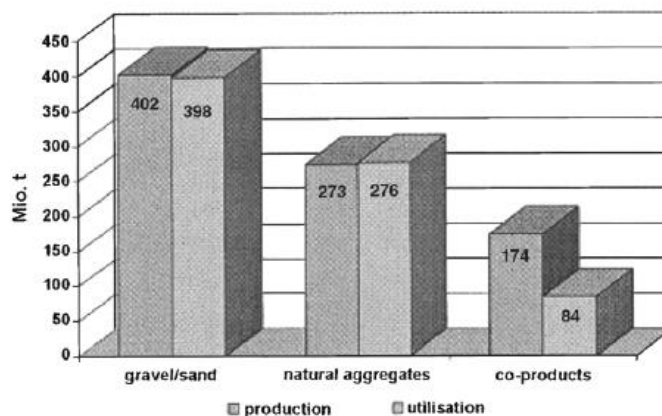
## Capitolo 4 – Conclusioni

In Europa e negli altri maggiori continenti c'è una grande richiesta di sotto-prodotti e aggregati, principalmente dall'industria dell'ingegneria civile e, in modo particolare, nei campi delle costruzioni in calcestruzzo o delle strade, come pure per fini idraulici (consolidamento degli argini dei fiumi). Ma ci sono anche altri obiettivi, dichiarati dalla stessa Comunità Europea:

4. proteggere l'ambiente e migliorare la qualità;
5. preservare la salute dell'uomo;
6. garantire la tutela e usare in maniera efficiente le risorse naturali.

Queste dichiarazioni ci rendono responsabili della salvaguardia delle risorse naturali attraverso l'uso dei sotto-prodotti industriali, in modo tale da accrescere il loro tasso di riciclo ovunque le proprietà tecniche e ambientali lo rendano applicabile [2].

Riguardo alla situazione in Germania, come si osserva in figura, circa 675



**Figura 4. 1** – Produzione ed utilizzo degli aggregati naturali e dei co-prodotti industriali [2]

milioni di tonnellate di aggregati quali ghiaia, sabbia ed altri tipi di rocce vengono prodotte e sono richieste nell'ambito industriale, ogni anno. Contrariamente a questa situazione di bilancio con gli aggregati naturali, il tasso di utilizzazione dei co-prodotti è molto più basso (circa 174 milioni di tonnellate) ove, per co-prodotti industriali s'intendono le scorie ed i residui d'estrazione del carbone (81 milioni di tonnellate), i materiali di riciclaggio

come, ad esempio, le demolizioni delle costruzioni in cemento (50 milioni di tonnellate) ed altri materiali di estrazione (43 milioni di tonnellate). Il loro impiego differisce a seconda delle proprietà tecniche e ambientali dei materiali stessi. In Germania ed in altri Paesi europei l'industria si è concentrata sull'aumento del tasso di utilizzazione di questi co-prodotti e sul riciclaggio dei materiali [2]. Addirittura, il massimo istituto di ricerca tedesco sulle scorie d'altoforno e di acciaio, il Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e. V. (FEhS), sta portando avanti uno studio per modificare il processo di produzione della ghisa e dell'acciaio in base alle proprietà ed alle caratteristiche delle rispettive scorie.

In Italia, con il decreto Ronchi del 5/2/1998, si è data la possibilità teorica di riutilizzare le scorie; tuttavia nell'ambito della ricerca si sta facendo molto poco e le risposdenze ecologica ed economica nel riciclaggio dei sotto-prodotti non è stata ancora recepita dai potenziali utilizzatori, che preferiscono ancora impiegare materiali da estrazione per le costruzioni di tipo civile [3].

In Europa, ogni anno, sono prodotte quasi 12 milioni di tonnellate di scorie. E per l'intenso lavoro di ricerca condotto negli ultimi 30 anni, oggi circa il 65% delle scorie d'acciaio prodotte sono riutilizzate su qualificati campi di applicazione. Il restante 35% di queste scorie, tuttavia, sono ancora totalmente inutilizzabili e destinate alla discarica; sarà necessario un forte lavoro da parte dei ricercatori di tutto il mondo per cercare di diminuire questa percentuale.

Contrariamente a tutti gli altri stati europei, in definitiva, in Germania, il tasso di sotto-prodotto inviato in discarica è solo del 7%; ben il 93% delle scorie sono riciclate e trovano impieghi in numerosi campi di applicazione che vanno dai fertilizzanti utilizzati nell'agricoltura e nella selvicoltura, agli impieghi nei fondi stradali e nelle superfici di pavimentazione, all'utilizzo nelle malte cementizie, fino alle applicazioni idrauliche (dighe, consolidamento dei letti e degli argini dei fiumi) [2].

## Riferimenti bibliografici

- [1] Dr. N. Balcázar, Dr. Ing. M. Künn, Dr. J. M. Baena, Dr. A. Formoso, Mr. J. Piret, *Summary Report on RTD in Iron and Steel Slags: Development and Perspectives*, 1996
- [2] H. Motz, J. Geiseler, *Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural resources*, *Waste Management* 21 (2001), pp. 285–293
- [3] Domenico Capodilupo, *Zero Wastes in Siderurgia. Un Progetto solo per l'Ecologia?*, Quaderni Steelmaster, N° 1, anno 2000
- [4] Appunti di una lezione dello Steelmaster dell'ing. D. Capodilupo, 13/09/2004
- [5] D. Capodilupo, *VIII Edition Steelmaking*, Presentazione Powerpoint del 13/09/2004
- [6] Walter Nicodemi, *Siderurgia – Processi e Impianti*, Associazione Italiana di Metallurgia
- [7] indirizzo INTERNET: <http://www.jfe-21st-cf.or.jp>
- [8] J. N. Murphy, T. R. Meadowcroft, P. V. Barr, *Enhancement of the Cementitious Properties of Steelmaking Slag*, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 36, No. 5, pp. 315-331, 1997
- [9] A. Cigada, *Struttura e Proprietà dei materiali metallici*, Città Studi
- [10] indirizzo INTERNET: [www.schoolscience.co.uk/](http://www.schoolscience.co.uk/)
- [11] *Metallurgia del Processo AOD*, Corso di Formazione degli Operatori AOD, 2001
- [12] Ahmad Monshi, Masoud Kasiri Asgarani, *Producing Portland Cement from Iron and Steel Slags and Limestone*, *Cement and Concrete Research*, No. 29 (1999), pp. 1373–1377
- [13] Li Dongxue, Fu Xinhua, Wu Xuequan, Tang Mingshu, *Durability of Steel Slag Cement*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 983–987, 1997