



**IMPIEGO DI DERIVATI DELLE SCORIE DI  
FORNO AD ARCO ELETTRICO COME  
MATERIALE ECO-COMPATIBILE NELLA  
SOVRASTRUTTURA STRADALE**

**Marco Del Fabbro**

**Marco Stefanutti**

Dipartimento di Georisorse e Territorio - Università degli Studi di Udine

Via Cottonificio 114, 33100 Udine

Tel: +39 0432.558773 - Fax: +39.0432.558700

E-mail: [delfabbro@dgt.uniud.it](mailto:delfabbro@dgt.uniud.it)

[stefanutti@dgt.uniud.it](mailto:stefanutti@dgt.uniud.it)

**Carlo Ceschia**

Ferriere Nord S.p.A. – Gruppo Pittini

Zona Industriale di Rivoli di Osoppo (UD) – 33010 Osoppo (UD)

Tel: +39 0432.981850 - Fax: +39.0432.981811

E-mail: [cceschia@pittini.it](mailto:cceschia@pittini.it)

# **IMPIEGO DI DERIVATI DELLE SCORIE DI FORNO AD ARCO ELETTRICO COME MATERIALE ECO- COMPATIBILE NELLA SOVRASTRUTTURA STRADALE**

**MARCO DEL FABBRO** – Dipartimento di Georisorse e Territorio – Università degli Studi di Udine

**MARCO STEFANUTTI** – Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade - Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

**CARLO CESCHIA** - Ferriere Nord S.p.A. – Gruppo Pittini

## **SOMMARIO**

*Una consistente percentuale dell'acciaio prodotto annualmente in Italia proviene da forni ad arco elettrico (EAF), che unitamente agli altoforni rappresentano i principali sistemi utilizzati nella siderurgia italiana. Insieme all'acciaio dai forni ad arco elettrico italiani escono circa 2 milioni di tonnellate di scorie all'anno.*

*Nel rispetto della vigente normativa ambientale una quota di questo sottoprodotto dell'industria siderurgica, in alternativa allo smaltimento o ad altri tipi di recupero, viene lavorata per assumere caratteristiche di compatibilità ambientale idonee per un utilizzo in ambito stradale.*

*I prodotti della lavorazione delle scorie vengono normalmente suddivisi in tre frazioni granulometriche. Il presente studio si pone l'obiettivo di confrontare le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche delle tre frazioni, sia con i requisiti previsti dalle attuali normative ambientali, sia con le raccomandazioni tecniche del campo geotecnico-stradale.*

## **ABSTRACT**

Every year a great part of Italian steel is produced by electric arc furnaces (EAF), that together with blast furnaces represent the main steel making processes used in Italian iron metallurgy. Two million tons of slags are yearly produced together with steel by Italian electric arc furnaces.

With respect to environmental laws in force, a portion of this by-product of the iron industry is processed in order to take on proper technical features; therefore it is used in road construction as an alternative to disposal or to other kinds of recovery.

As far as particle-size analysis is concerned, these materials are divided and commercialised in three different fractions.

The main aim of the present study is to compare the physical-chemical and mechanical features of acceptability of the three different fractions (obtained through the processing of slags) and the requirements provided for by the present environmental set of rules together with the technical recommendations concerning geotechnical and road construction sectors.

## **1. INTRODUZIONE**

Il settore siderurgico rappresenta un'attività che potenzialmente è in grado di esercitare una notevole pressione sull'ambiente a causa delle quantità di materiali coinvolti o della loro natura. Nell'Unione Europea nel 1995 sono state colate circa 160 milioni di tonnellate di acciaio. Più della metà della massa utilizzata nel processo produttivo va a costituire emissioni gassose, rifiuti solidi o altri sottoprodotti [1]. Una parte consistente dell'acciaio prodotto in Italia proviene da forni ad arco elettrico (EAF), dai quali ogni anno, insieme all'acciaio, escono circa 2 milioni di tonnellate di scorie [2]. L'utilizzo diretto di questo sottoprodotto per l'elaborazione di materie prime di qualità raggiunge il doppio scopo di ridurre lo sfruttamento di risorse naturali limitate e contemporaneamente la formazione di potenziali rifiuti. Ancora oggi infatti nell'Unione Europea il 60% della scoria da EAF viene destinata allo smaltimento in discarica [3].

Risulta doveroso predisporre, mediante validi requisiti operativi e tecnici, procedure ed orientamenti volti a prevenire o ridurre il più possibile la quantità di materiale residuale dei processi produttivi. Operando in questo modo vengono minimizzate le ripercussioni negative sull'ambiente e sui costi.

Ciò si può ottenere sia mediante il riutilizzo o il recupero di materiali o sottoprodotti che, se non opportunamente trattati, sarebbero destinati alla discarica, sia controllando le variabili di processo al fine di ottenere prodotti residuali con caratteristiche prefissate.

Nell'ambito dell'ingegneria civile la normativa ambientale non indica chiaramente quali siano i materiali eco-compatibili e quali no. Si può ritenere che un materiale abbia un basso impatto globale sull'ambiente se la metodica del suo utilizzo riduce lo sfruttamento di risorse naturali, si pone come alternativa allo smaltimento e non causa un'alterazione negativa dell'ambiente in cui viene inserito o prodotto.

Il presente studio si pone l'obiettivo di confrontare le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche delle tre frazioni granulometriche che si ottengono dal processo di lavorazione delle scorie sia con i requisiti previsti dalle attuali normative ambientali sia con le raccomandazioni tecniche del campo geotecnico-stradale. In particolare si esamina la possibilità di impiego del materiale come aggregato per sottofondi, per strati di fondazione, per strati legati a bitume di una pavimentazione flessibile e per lastre in calcestruzzo di una pavimentazione rigida, seguendo le prescrizioni delle norme C.N.R. e le indicazioni fornite dalla letteratura internazionale sull'argomento.

## **2. I PRODOTTI DELLA LAVORAZIONE DELLE SCORIE DI FORNO AD ARCO ELETTRICO**

Il processo di trasformazione della scoria siderurgica in un prodotto utilizzabile in campo stradale inizia con la sua stabilizzazione. Questo materiale nasce infatti dal rapido raffreddamento che porta la fase liquida ossidata e superficiale presente nei forni ad arco elettrico da circa 1300 °C alla temperatura ambiente. La solidificazione in blocchi avviene all'aria o a volte accelerando il processo tramite spruzzi di acqua; in tal modo può tuttavia rimanere all'interno dei blocchi ancora una certa quantità di calce libera potenzialmente soggetta a idratazione o carbonatazione. Queste alterazioni possono essere causa di espansioni disomogenee del materiale e della sua disgregazione.

Per questo motivo la scoria da forno elettrico viene sottoposta ad una adeguata stagionatura (variabile anche in base alla pezzatura) durante la quale si realizza naturalmente la stabilizzazione della frazione di ossido di calcio non legato e di ossido di magnesio (MgO).

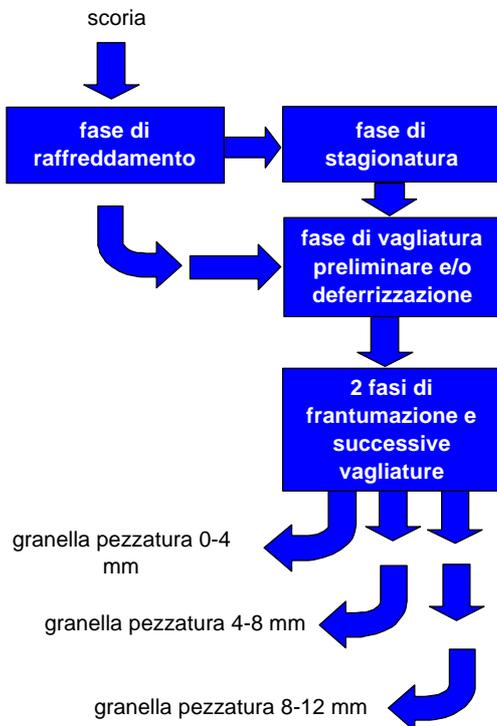


**Figura 1 – Le scorie di forno ad arco elettrico (in secondo piano) e prodotti della lavorazione.**



**Figura 2 – Fase finale della lavorazione delle scorie.**

Secondo la letteratura internazionale, onde evitare che si verifichino problemi di rigonfiamento delle scorie, la percentuale di calce libera presente deve risultare minore del 2%. Ultimato il processo di stagionatura il materiale può ancora possedere al suo interno una parte ferroso-metallica rappresentata da inclusioni di acciaio che vengono usualmente estratte tramite un deferizzatore magnetico ed eventuali fasi di frantumazione. In letteratura sono riportati solo pochi esempi di impianti che utilizzano, successivamente al raffreddamento, una maturazione umida del materiale mentre molti produttori invecchiano la scoria semplicemente esponendola alle condizioni climatiche per un periodo di almeno 2 mesi prima di poterla considerare utilizzabile in applicazioni più sensibili ad eventuali fenomeni di rigonfiamento [4].



**Figura 3 – Schema di flusso semplificato delle fasi di lavorazione delle scorie.**

Nel processo produttivo esaminato la scoria, dopo la stagionatura, subisce una doppia fase di frantumazione effettuata dapprima con un frantoio a mascelle e poi rifinita con un frantoio a cono. Dalle fasi di vagliatura vengono prodotte frazioni di diversa pezzatura che se non risultano conformi ai parametri stabiliti possono essere riprocessate fino all'ottenimento delle 3 linee visibili in figura 3.

Attraverso le fasi di stagionatura, di frantumazione e di vagliatura la scoria grezza viene trasformata in un prodotto generalmente suddiviso in 3 diverse frazioni granulometriche: sabbia e graniglia (pezzatura 0-4 mm), graniglia (4-8 mm) e graniglia e pietrischetto (8-12 mm) (figure 1 e 2). L'intero processo produttivo è strettamente integrato con quello siderurgico e gli utilizzi successivi a cui i derivati sono destinati risultano compatibili con la normativa ambientale italiana di riferimento (D. Lgs 22/97 [5], DM 471/99 [6], etc) e

concretizzano anche lo spirito dell'obiettivo "Zero Waste" che l'industria siderurgica ha iniziato a perseguire nell'ultimo decennio [7], [8].

### 3. CARATTERISTICHE CHIMICHE DEI PRODOTTI ESAMINATI E REQUISITI AMBIENTALI

La composizione chimica della scoria e dei suoi derivati è riconducibile principalmente a ossidi di calcio, ferro, alluminio, magnesio e silicio, i quali complessivamente raggiungono mediamente circa il 90 % del peso (tabella 1) del materiale esaminato. Il componente principale dal punto di vista quantitativo è sicuramente il ferro e ciò condiziona alcune caratteristiche fisico-meccaniche come il peso specifico, che dalle prove effettuate in laboratorio (§4) e da dati riportati in letteratura [1], risulta variabile da 32.5 a 39.8 kN/m<sup>3</sup>. La presenza del ferro nella scoria è dovuta all'azione del regime ossidativo del forno ad arco elettrico sul bagno liquido metallico. Tale elemento risulta principalmente presente come Fe<sup>2+</sup> (3.26%-25.08%) e secondariamente come Fe<sup>3+</sup> (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.71%-22.4%) o in maniera molto minore come Fe<sup>0</sup> (0.22%-0.6%) [1]. Fra i restanti componenti alcuni elementi come Ca o Si derivano da materie prime aggiunte al bagno come additivi, alcuni derivano in parte dall'attacco del bagno liquido ai refrattari di contenimento (Mg) ed altri ancora costituiscono impurità legate alla qualità del rottame ferroso utilizzato (Cr, Ti, Cu, etc). Le scorie di acciaieria sono in pratica da considerarsi a tutti gli effetti rocce ignee come i lapilli e le scorie delle eruzioni dei vulcani. Dal punto di vista mineralogico la scoria è composta per la quasi totalità da larnite (silicato bicalcico 2CaO\*SiO<sub>2</sub>), una soluzione solida di calcioalluminioferrite (2CaO\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2CaO\*2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e wustite (soluzione solida di composizione variabile a base di FeO, CaO, MgO, MnO). In misura minore è presente una soluzione solida bivalente di ioni metallici (Ca, Fe, Mn, Mg) e alite (silicato tricalcico 3CaO\*SiO<sub>2</sub>). Wustite e ferrite solidificano a temperature inferiori di quelle dei silicati e costituiscono il materiale interstiziale tra i silicati.

	Scoria EAF Rif. BAT % in peso	Scoria EAF materiale analizzato % in peso		Scoria EAF Rif. BAT mg/kg	Scoria EAF materiale analizzato mg/kg
Fe <sub>tot</sub>	10-32	30,31	As	0,1-18	1-10
CaO	25-45	26,3	Cd	0,02-64	<0.1
CaO <sub>free</sub>	≤ 4	≤ 1,6	Co	n.d.	<0.5
SiO <sub>2</sub>	10-18	13,7	Cr	200-21000	5500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8	6,0	Cu	1,1-1890	250
MgO	4-13	3,4	Ni	n.d.	30
MnO	4-12	6,0	Pb	13-2400	30-150
TiO <sub>2</sub>	0,3	0,16	Se	0,1-18	<0.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,01-0,6	0,6	Sn	n.d.	<0.5
Na <sub>2</sub> O	0,46	0,30	V	n.d.	300-400
K <sub>2</sub> O	0,11	n.d.	Zn	n.d.	150-220
S	0,02	0,14			
C	0,33	n.d.			

**Tabella 1 – Composizione chimica della scoria di EAF confrontata con i valori di riferimento nelle Best Available Technologies (BAT) di settore per la produzione di acciaio al carbonio e basso legati.**

L'azione della calce nel bagno liquido contribuisce all'arricchimento in zolfo della scoria; tuttavia il processo in EAF, diversamente da quanto accade nel forno siviera, dove avviene la successiva affinazione dell'acciaio, mantiene il tenore di zolfo più basso che nelle loppe d'altoforno. Ciò rende i prodotti derivati dalle scorie idonei all'impiego come aggregati per il confezionamento di calcestruzzi.

Per la verifica della compatibilità ambientale non sono previsti particolari requisiti chimici se non per il materiale posto in opera a diretto contatto col terreno naturale, come nel caso dei sottofondi stradali in cui è applicabile la normativa sui siti inquinati (D.M. 471/99 [6]). Tale esigenza non è legata allo specifico utilizzo di questo materiale ma riguarda il possibile impiego di qualsiasi prodotto che comporti "contaminazione o alterazioni chimiche, fisiche o biologiche del suolo o del sottosuolo o delle acque superficiali o delle acque sotterranee tali da determinare un pericolo per la salute pubblica o per l'ambiente naturale o costruito". Nel caso della costruzione di una sovrastruttura stradale, sussistendo l'unitarietà del manufatto [2], va verificato unicamente il rispetto dei limiti previsti per l'eluato, che, nel caso del materiale esaminato, risulta soddisfatto non solo per la prevista frazione di granulometria superiore a 2 mm ma addirittura per la frazione fine [2].

Seppure non richiesto dalla normativa, dato che le fasi di lavorazione non hanno alterato sensibilmente la natura del materiale, è stata condotta anche un'indagine sull'eluato ricavato secondo i criteri previsti nell'ipotesi di scoria non sottoposta inizialmente a trasformazione ma configurata come rifiuto e recuperata direttamente secondo le procedure semplificate del D.M. 5/2/98 [9]. Anche in questo caso campioni appartenenti alle diverse granulometrie hanno soddisfatto pienamente i requisiti della norma [2].

#### 4. REQUISITI GEOTECNICO-STRADALI

In tre date differenti sono stati prelevati alcuni campioni delle frazioni di prodotto < 4 mm, 4-8 mm e 8-12 mm derivate dalle scorie di forno ad arco elettrico attraverso un processo di stagionatura di circa sei mesi e una successiva macinazione e vagliatura. Tali campioni sono stati sottoposti a prove geotecniche di laboratorio, sia di classificazione, sia di portanza.

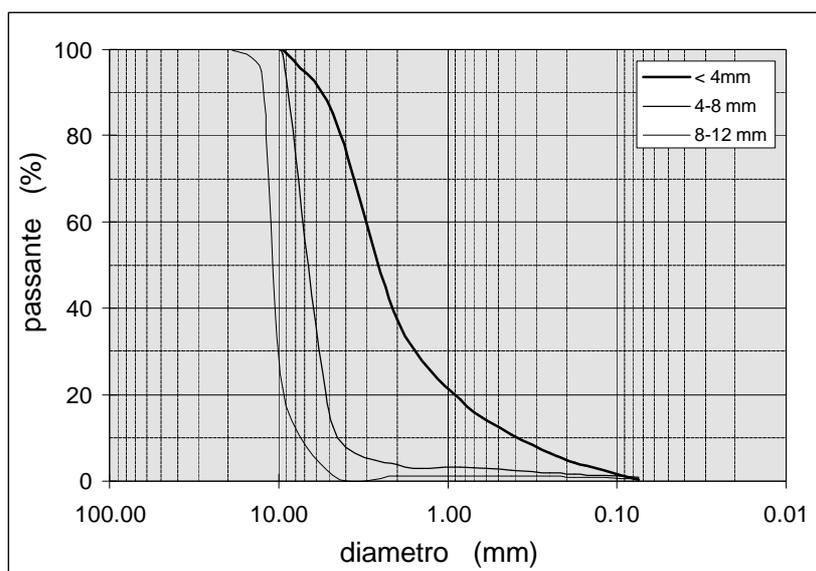


Figura 4 – Diagramma granulometrico delle tre frazioni.

I grani hanno dimensioni comprese fra i 12 mm ed i 0.074 mm, corrispondenti ai vagli ASTM1/2” e ASTM200. Le curve granulometriche delle tre frazioni sono rappresentate in figura 4.

Tutti i 3 tipi di prodotto rientrano nel gruppo A1-a della classificazione C.N.R.-U.N.I. 10006 [10] delle terre; da un punto di vista strettamente geotecnico (Raccomandazioni A.G.I. [11]) le due frazioni di dimensioni maggiori vengono definite come ghiaia, mentre la frazione più fine come ghiaia con sabbia.

Si può escludere un comportamento plastico del materiale dato che i limiti di Atterberg, eseguiti sulla parte più fine del materiale passante al vaglio ASTM40, sono risultati nulli.

I valori medi delle proprietà indici ricavate dalle prove di laboratorio sui campioni naturali non compattati vengono riassunte sinteticamente in tabella 2.

Il materiale presenta un peso di volume variabile tra 17.6 e 19.8 kN/mc ed un elevato peso specifico dei grani pari a circa 1.5 volte il peso specifico di un normale terreno naturale. Sia l’elevato indice dei vuoti medio delle tre frazioni, sia l’elevata porosità ed il basso contenuto d’acqua, sono indicativi del consistente volume dei vuoti presente e della capacità del materiale di drenare l’acqua.

Frazione analizzata	$\gamma$ (kN/mc)	$\gamma_d$ (kN/mc)	Gs (kN/mc)	e	n (%)	w (%)
8-12 mm	17.6	17.3	38.3	1.21	55	1
4-8 mm	19.0	18.5	38.5	1.09	52	3
< 4 mm	19.8	18.5	39.4	1.14	53	7

$\gamma$ =	peso di volume umido (kN/mc)	$e$ =	indice dei vuoti
$\gamma_d$ =	peso di volume secco (kN/mc)	$n$ =	porosità (%)
Gs =	peso specifico dei grani (kN/mc)	$w$ =	umidità naturale %

**Tabella 2 – Proprietà indici e contenuto d’acqua del materiale esaminato.**

Al tatto i grani sono molto ruvidi e abrasivi e visivamente presentano forma spigolosa e con notevole quantità di vuoti (figura 5).



**Figura 5 – Granella derivata dalle scorie di forno ad arco elettrico: le tre frazioni esaminate.**

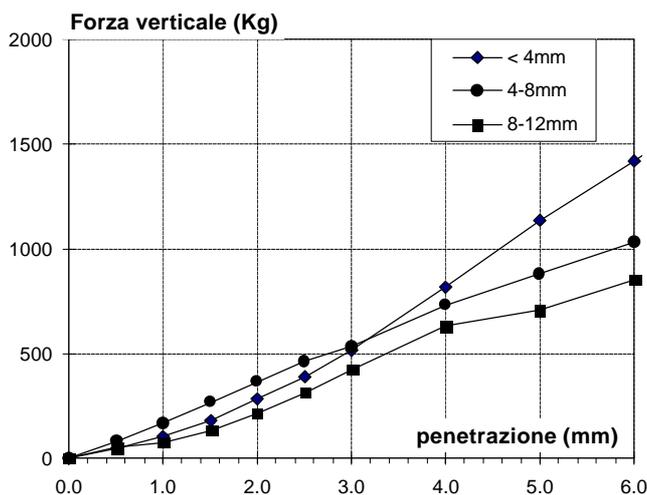
Dalle prove di costipamento eseguite sulla frazione più fine, caratterizzata da una curva granulometrica più eterogenea delle altre due, è emerso che la densità secca risulta pari a  $\gamma_d=27.2$  kN/mc, mentre il contenuto d’acqua optimum è del 3% circa.

Le prove di resistenza al taglio eseguite con l’apparecchio di Casagrande in condizioni drenate e di completa saturazione hanno evidenziato che il materiale presenta una elevata resistenza frizionale e un comportamento di tipo prevalentemente

contraente. L'angolo d'attrito al taglio della granella derivata dalle scorie risulta essere pari a  $\phi' = 39^\circ$  [2].

Oltre alle prove di costipamento sono state eseguite anche quelle relative alla determinazione dell'indice di portanza C.B.R. (figura 6) in condizioni di completa saturazione, come indicato dalle norme C.N.R.-U.N.I. 10009 [12].

Il campo di variabilità dei valori dell'indice C.B.R. per le tre frazioni è compreso fra il 40 e il 74%: il valore maggiore si ottiene sulla frazione < 4 mm; i valori più bassi si ottengono sulle altre frazioni, che sono più grossolane e quasi monogranulari.



**Figura 6 – Valori della forza verticale in funzione della penetrazione rilevati nelle prove C.B.R.**

Per completezza sono stati eseguiti anche tre test di rigonfiamento monitorando lo spostamento verticale dei campioni contenuti in fustelle Proctor e C.B.R. immersi in acqua per quattro giorni; dai test non è emerso alcun comportamento dilatante.

Per stabilire l'idoneità del materiale come aggregato nella sovrastruttura stradale sono state effettuate le diverse prove previste dalle norme C.N.R. N. 139/92 [13]. I risultati ottenuti sono riportati in tabella 3.

Dal confronto tra i risultati delle prove e i requisiti di accettabilità forniti dalle norme per i diversi strati di una pavimentazione flessibile o rigida emerge quanto segue:

- I valori dell'indice C.B.R. permettono di considerare le tre frazioni come un ottimo sottofondo. Nello strato di fondazione, ove è previsto un C.B.R. minimo del 50%, si può impiegare una miscela delle tre frazioni. Infatti la frazione fine (<4 mm) presenta un indice C.B.R. molto elevato, mentre le frazioni più grossolane, con una grande quantità di vuoti, tendono ad assestarsi maggiormente sotto l'azione del carico. Per gli strati di fondazione la norma, allo scopo di ottenere un materiale con le giuste proporzioni di scheletro e di matrice, indica un fuso granulometrico che può essere facilmente rispettato tramite la miscelazione, in opportuni rapporti, delle tre frazioni.

- L'equivalente in sabbia (ES=93.4 %) risulta di molto superiore al minimo stabilito dalle norme per tutti gli strati di una pavimentazione, sia essa flessibile o rigida, e per qualunque condizione di traffico.

- I risultati delle prove di resistenza all'usura per attrito Los Angeles e Micro-Deval Umida dimostrano che tutti i materiali analizzati possono essere impiegati in ogni strato della pavimentazione, anche in condizioni di traffico molto pesante. Dalle prove si ottengono percentuali di polveri (13.3÷16.6 % nella Los Angeles, 6.6÷8.6 % nella

Micro Deval Umida) generalmente minori di quelle ricavabili con i migliori materiali naturali. La prova di resistenza al gelo fornisce altresì ottimi risultati.

- Le prove di spogliamento in H<sub>2</sub>O, eseguite alle temperature di 25 e di 40° con un bitume di tipo 50-70, mostrano che l'accoppiamento tra inerte e legante è ottimo (non si verifica alcun distacco di pellicole). L'aggregato è quindi particolarmente adatto per il confezionamento del conglomerato bituminoso.

Prova – Riferimenti normativi	Frazione < 4 mm	Frazione 4 - 8 mm	Frazione 8 – 12 mm
C.B.R. (C.N.R. - U.N.I. 10009)	74 %	43 %	40 %
Equivalente in sabbia (C.N.R. N. 27/72)	94.3 %	-	-
Los Angeles (C.N.R. N. 34/73)	-	16.62 % (classe C); 13.27 % (classe B)	
Sensibilità al gelo (C.N.R. N. 80/80)	-	1 % (classe C)	
Micro Deval umida (C.N.R. N. 109/85)	-	6.6 %	8.6 %
Spogliamento in acqua a 25° (C.N.R. N. 138/92)	-	0 %	0 %
Spogliamento in acqua a 40° (C.N.R. N. 138/92)	-	0 %	0 %
Porosità (C.N.R. N. 65/78)	-	0.50 %	0.76 %
Indice di appiattimento (C.N.R. N. 95/84)	-	5.2 %	4.95 %
C.L.A. (C.N.R. N. 140/92)	-	0.56 (miscela con 8-12)	0.59
Contenuto di solfati solubili in H <sub>2</sub> O (UNI-EN 1744-1/10)	0.03 % (SO <sub>3</sub> )	0.02 % (SO <sub>3</sub> )	0.01 % (SO <sub>3</sub> )
Contenuto di solfati solubili in acido (UNI-EN 1744-1/12)	0.15 % (SO <sub>3</sub> )	0.05 % (SO <sub>3</sub> )	0.02 % (SO <sub>3</sub> )
Contenuto di cloruri (UNI-EN 1744-1/8)	0.002 %	0.002 %	0.0015 %
Contenuto di sostanze organiche (UNI-EN 1744-1/15)	Più chiara	Più chiara	Più chiara
Potere rigidificante (C.N.R. N. 122/88)	Filler/ Bitume	ΔPA (°C)	
	1.00	8.5	
	1.50	20.5	
	2.04	42.0	
Espansione (UNI-EN 1744-1/19)	0.2 %		
Calce libera (UNI-EN 1744-1/18)	0.75 % (CaO)	1.25 % (CaO)	1.45 % (CaO)
Passante al setaccio 0.075 mm (C.N.R. N. 75/80)	<1 %	<1 %	<1 %

**Tabella 3 – Risultati sperimentali ottenuti dalle prove eseguite sulle tre diverse frazioni.**

- I valori del coefficiente di levigabilità accelerata (CLA=0.56÷0.59) sono ampiamente maggiori dei minimi indicati dalla normativa e paragonabili o superiori a quelli

ottenibili con i migliori materiali naturali (porfido e basalto). Ciò dimostra che i prodotti derivati dalle scorie sono ottimi inerti per lo strato di usura, per le lastre in calcestruzzo e per i trattamenti superficiali e di irruvidimento.

- Si sono effettuate anche prove che permettono di valutare la tendenza del materiale a rigonfiare, che è legata al contenuto di calce libera presente. La prova di espansione, effettuata in condizioni particolarmente severe e ad alta temperatura, fornisce un risultato dello 0.2 %, inferiore al massimo indicato in letteratura [1]. Il contenuto di calce libera è compreso tra lo 0.75 % e l'1.45 % ed è confrontabile con i valori tipici riportati in letteratura [14].

- Anche gli altri parametri e indici (porosità, indice di appiattimento, contenuto di solfati, di cloruri e di sostanze organiche, potere rigidificante, passante al setaccio da 0.075 mm) soddisfano ampiamente i requisiti delle norme.

In tabella 4 sono riassunti alcuni dei requisiti di accettabilità degli inerti per la costruzione delle sovrastrutture stradali flessibili e rigide. Nelle caselle è rappresentato l'intervallo dei valori limite forniti dalla normativa; un estremo dell'intervallo vale nell'ipotesi di traffico leggero, l'altro estremo nell'ipotesi di traffico molto pesante. Con carattere inclinato è indicata l'unica verifica che non è soddisfatta dal materiale esaminato (l'indice di portanza C.B.R. per uno strato di base in misto granulare non legato); i prodotti della lavorazione delle scorie non possono pertanto essere impiegati da soli per costituire uno strato di base; uno strato di base costituito da inerti non legati non è comunque ammesso nel caso in cui il traffico previsto sia pesante e molto pesante.

Sebbene nell'ambito del presente studio non siano state effettuate prove Marshall sul conglomerato bituminoso con differenti tipi e percentuali di bitume, si può asserire, sulla base di esperienze condotte in diversi paesi [1], che con l'impiego di prodotti dalla lavorazione delle scorie è possibile ottenere valori di Stabilità Marshall dell'ordine di 1400-1500 kg o superiori.

In sintesi dalle prove effettuate emerge che tutte le frazioni soddisfano i requisiti di accettabilità degli inerti, per ciascuno degli strati di una pavimentazione flessibile o rigida e per ogni condizione di traffico.

Strati	Prova					
	C.B.R.	LA	G	MDU	ES	CLA
Strati di fondazione in misto granulare o corretto	> 50 %	< 30-40 %	< 30 %	...	> 40 %	...
Strati di base in misto granulare	> 80 %	< 30 %	< 30 %	< 20-25 %	> 50 %	...
Strati di base in misto bitumato o conglomerato bituminoso aperto	...	< 25-40 %	< 30 %	< 20-35 %	> 35-50 %	...
Strati di base in misto cementato	...	< 30-40 %	< 30 %	< 20-35 %	> 35 %	...
Strati di collegamento in conglomerato bituminoso	...	< 22-40 %	< 30 %	< 20-35 %	> 40-50 %	...
Strati di usura in conglomerato bituminoso	...	< 18-25 %	< 30 %	< 15-20 %	> 40-80 %	> 0.37-0.45
Strati di usura - trattamenti superficiali e di irruvidimento	...	< 18-25 %	< 20 %	< 12-20 %	...	> 0.42-0.45
Lastre in calcestruzzo	...	< 20-30 %	< 30 %	< 15-25 %	> 70-80 %	> 0.40-0.45

**Tabella 4 – Requisiti di accettabilità degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali secondo le norme C.N.R.-U.N.I. 10009 e le norme C.N.R. N. 139/92.**

## 5. CONCLUSIONI

Lo studio ha esaminato la possibilità di impiego nella costruzione delle sovrastrutture stradali dei prodotti ottenuti dalla lavorazione delle scorie di forno ad arco elettrico.

E' infatti possibile ottimizzare e integrare le diverse fasi dell'attività produttiva per ridurre la quantità di materiali configurabili come rifiuti e proporre al mercato prodotti competitivi, minimizzando le ripercussioni negative sull'ambiente e sui costi.

Il materiale esaminato è compatibile con i requisiti fisico-chimici prescritti dalle recenti normative ambientali. Dal punto di vista geotecnico, le prove eseguite sulle tre diverse frazioni in cui il materiale viene comunemente suddiviso hanno dimostrato le ottime proprietà meccaniche di resistenza e le buone proprietà indici di caratterizzazione.

I risultati ottenuti dalle prove di accettazione degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali hanno mostrato che il materiale nel suo complesso soddisfa ampiamente tutti i requisiti, presentando prestazioni migliori o paragonabili a quelle degli inerti di derivazione basaltica. Pertanto i prodotti della lavorazione delle scorie possono costituire una valida alternativa ai materiali naturali per la costruzione di tutti gli strati delle pavimentazioni flessibili o rigide.

## 6. BIBLIOGRAFIA

[1] AAVV (1999) - Libro Blanco para la minimization de residuos y emisiones. Escorias de aceria. Ihobe, SA. Febrero 1999.

[2] Del Fabbro M., Stefanutti M., Ceschia C. (2001) – Nuovi prodotti derivati dalla lavorazione delle scorie di forni ad arco elettrico: caratteristiche fisico-chimiche e possibili impieghi in campo geotecnico-stradale. – Quarry & Construction, Agosto 2001.

[3] AAVV (2000) - Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel. March 2000.

[4] Engel R., Butterworth P., Matsuoka S. (1999) - Towards environmentally friendly steel making processes. In: EAF Technology, State of the art and its future evolution. Seminar IISI in Pittsburgh on 15 November 1999. Pp. 37-50.

[5] Decreto Legislativo del Governo n° 22 del 05/02/1997 - Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi e sui rifiuti di imballaggio. Pubblicato/a su: Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 38 del 15/02/1997.

[6] Decreto Ministeriale n° 471 del 25/10/1999 - Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni. pubblicato/a su : Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 293 del 15/12/1999.

[7] Aumonier J., Juckes L. M., Traice F. B. (1996) - Towards zero landfill. Seminar on the processing, utilization and disposal of waste in the steel industry. Balatonszeplak (Hungary), 3-6 June 1996.

[8] Maegden D.R., Hunt H.D. (1998) – An update on project STAR: zero waste program at Chaparral Steel. Iron & Steelmaker, vol. 25, n° 1: 29-33.

[9] Decreto Ministeriale del 05/02/1998 - Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del

decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22 pubblicato su: Gazz. Uff. Suppl. Ordin. n° 88 del 16/04/1998.

[10] C.N.R.-U.N.I. 10006 (1963) – Costruzione e manutenzione delle strade – Tecnica di impiego delle terre.

[11] Associazione Geotecnica Italiana (1994) - Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio.

[12] C.N.R.-U.N.I. 10009 (1964) – Prove sui materiali stradali – Indice di portanza C.B.R. di una terra – Roma.

[13] C.N.R. (1992) – Norme sugli aggregati. Criteri e requisiti di accettazione degli aggregati impiegati nelle sovrastrutture stradali – Bollettino ufficiale N. 139 - Roma.

[14] Holliday K. A. (1997) - Steel slag: the high performance industrial aggregate. Steel world, vol. 2 n° 1, pp. 11-14.