

Regione Lombardia

Osservatorio per il Clima, l'Economia Circolare e la
Transizione Ecologica



Tavolo scorie di fusione

**Linee guida per la gestione delle scorie
bianche da metallurgia secondaria**

INDICE

Premessa	3
Introduzione	4
1. Descrizione ciclo produttivo da cui si origina la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS.....	5
2. Composizione chimica della scoria bianca.....	8
3. Caratteristiche chimico-fisiche della scoria bianca.....	13
4. Gestione del residuo scoria bianca	15
5. Utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS nella produzione del clinker di cemento	16
5.1. Il processo di produzione del cemento	16
5.2. Utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS come sottoprodotto nella produzione del clinker di cemento	17
5.2.1. Trattamenti considerabili “normale pratica industriale”	17
5.2.2. Verifica delle condizioni dell’art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/2006	18
5.3. Utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS come End of Waste nella produzione del clinker di cemento	23
5.3.1. Verifica delle condizioni dell’art. 184-ter del D.Lgs. n. 152/2006	23
5.4. Vantaggi derivanti dall’impiego della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS nella produzione del clinker di cemento	27
6. Utilizzi innovativi	28
6.1. Applicazione in matrici polimeriche come filler non convenzionale.	28
6.2. Applicazione in miscele cementizie	30
6.3. Sequestro CO ₂ : carbonatazione accelerata e utilizzo come aggiunte minerali.....	33

Premessa

Il presente documento è stato realizzato dal Tavolo Tecnico “Scorie di fusione”, istituito nell’ambito dell’Osservatorio per il Clima, l’Economia Circolare e la Transizione Ecologica attivato da Regione Lombardia, con l’obiettivo di fornire a tutti i soggetti coinvolti un quadro di riferimento tecnico/normativo chiaro e condiviso per la gestione circolare di alcuni dei principali residui delle attività siderurgiche/metallurgiche presenti sul territorio regionale.

Il documento risponde all’esigenza di favorire l’utilizzo sostenibile dei residui di produzione e la conseguente minimizzazione del ricorso alla discarica, supportando il passaggio dal concetto di “gestione di un rifiuto” a quello, oggi ineludibile, di “valorizzazione di una risorsa”, attraverso l’applicazione di criteri adeguati al progresso tecnico e in linea con i più recenti orientamenti UE.

Nell’ottica di una transizione energetica e circolare del sistema produttivo, la creazione di simbiosi industriali, in cui lo scarto di una produzione può diventare materia prima per un altro processo, porterà vantaggi oggettivi come la riduzione del consumo di risorse naturali e, in generale, degli impatti ambientali ed economici delle produzioni.

*Il presente documento è dedicato alla **scoria bianca da metallurgia secondaria SMS** generata dalla produzione di acciaio che rappresenta per quantità il secondo residuo, dopo la scoria nera, che si origina dai processi produttivi dell’acciaio presenti in Regione Lombardia.*

La stesura del documento, che si presenta come linea guida tecnica, ha preso spunto dagli esiti più recenti della ricerca scientifica e dalle esperienze di altri paesi UE, da cui emerge che la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS, opportunamente gestita e nel rispetto di precisi requisiti, possiede caratteristiche idonee dal punto di vista tecnico/prestazionale per poter essere validamente utilizzata in specifici impieghi in sostituzione di risorse naturali.

I criteri definiti nella presente linea guida tecnica intendono costituire un riferimento a livello regionale per tutti i soggetti coinvolti (produttori, recuperatori, Autorità competenti). La linea guida è destinata tanto ai produttori che scelgono di gestire il proprio residuo scoria bianca SMS come “sottoprodotto” (ai sensi dell’art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/06), quanto alle Autorità competenti che possono autorizzare in procedura ordinaria o in AIA il riciclo del materiale come “End of Waste caso per caso” (ai sensi dell’art. 184-ter del D.Lgs. n. 152/06). La presente linea guida tecnica non tratta la casistica in cui la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS viene utilizzata direttamente come rifiuto in processi industriali destinati alla produzione di beni, ai sensi del D.M. 5 febbraio 1998.

La linea guida tecnica si intende immediatamente applicabile nell’operatività della gestione del recupero della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS.

Introduzione

L'acciaio grezzo viene prodotto seguendo due distinti processi produttivi: il ciclo integrale (BF/BOF), che fa uso di materie prime quali principalmente il minerale di ferro e il carbon fossile, e il ciclo a forno elettrico (Electric Arc Furnace - EAF), che realizza la fusione del rottame ferroso, sfruttando le caratteristiche di completa riciclabilità dell'acciaio.

Dal ciclo integrale e dal ciclo a forno elettrico oltre al prodotto primario, vale a dire l'acciaio, si originano altri materiali quali le scorie siderurgiche, che possiedono caratteristiche e peculiarità differenti in base a molteplici fattori, che vanno dalle materie prime utilizzate alle tecnologie produttive adottate.

In base al ciclo tecnologico scelto e alla fase del processo in cui si generano, le scorie siderurgiche si distinguono in:

- *scoria da altoforno (granulata o raffreddata ad aria), detta comunemente loppa da altoforno;*
- *scoria da convertitore;*
- *scoria da forno elettrico, anche detta "scoria nera";*
- ***scoria da metallurgia secondaria, anche detta "scoria bianca".***

Il presente documento si riferisce nello specifico alla scoria generata dalla metallurgia secondaria per la produzione di acciaio mediante forno elettrico (scoria bianca da metallurgia secondaria SMS).

L'acronimo SMS indica appunto la categoria delle cosiddette "scorie da metallurgia secondaria" (Secondary Metallurgical Slags), ovvero il macrogruppo delle scorie derivanti dalla fase di affinazione fuori forno dell'acciaio, che avviene in siviera.

1. Descrizione ciclo produttivo da cui si origina la scoria bianca da metallurgia secondaria sms

Nel ciclo industriale per la produzione dell'acciaio mediante EAF si generano due tipologie di residui identificabili come scorie siderurgiche. Esse derivano dalle due fasi di processamento dell'acciaio liquido, che sono: fase primaria fusoria e fase successiva delle lavorazioni fuori forno o di affinazione.

La fase fusoria avviene nel forno elettrico ad arco propriamente detto e produce la base di bagno metallico liquido a partire dalla materia prima, che è sostanzialmente rottame ferroso, al quale vengono poi aggiunti materiali carboniosi per il controllo del tenore di ossigeno del bagno e calce per la formazione della scoria nera. Al termine del ciclo fusorio, dopo l'evacuazione della scoria nera galleggiante sul bagno attraverso una porta di scorifica, avviene lo spillaggio: il forno viene inclinato in modo tale da consentire all'acciaio fuso di colare in una siviera preparata sotto il foro di colata eccentrica (EBT – Eccentric Bottom Tapping). Dopo lo spillaggio, la siviera viene prelevata e trasferita nella postazione di trattamento di metallurgia secondaria.

Sulla siviera viene calata una volta costituita da pannelli raffreddati ad acqua e dotata nella parte centrale di un foro per il movimento degli elettrodi di grafite (LF - Ladle Furnace, forno siviera). Le complesse reazioni che si verificano nel forno siviera sono di grande importanza perché consentono al bagno liquido, derivante dalla fusione dei rottami e pochi altri additivi nel forno elettrico ad arco, di trasformarsi in un prodotto, vale a dire in un acciaio, di elevata qualità.

Le operazioni che vanno sotto il nome di affinamento fuori forno o in siviera, o più in generale di metallurgia secondaria, includono una varietà di possibili trattamenti finalizzati al perseguimento dei seguenti obiettivi:

- omogenizzazione della composizione chimica e della temperatura dell'acciaio liquido;
- disossidazione (rimozione dell'O₂);
- mantenimento della temperatura del bagno di acciaio ottimale ai fini della successiva operazione di colata continua;
- aggiunta di ferroleghe e carbonio;
- degasaggio a mezzo vuoto (rimozione di H₂ ed N₂);
- decarburazione (rimozione del carbonio per soddisfare i requisiti di composizione dell'acciaio);
- desolforazione (riduzione dello zolfo a concentrazioni inferiori a 0,002%);
- controllo delle impurezze (rimozione degli elementi non metallici indesiderati);
- controllo della morfologia delle inclusioni (cambiamento della composizione delle restanti impurezze per migliorare la microstruttura dell'acciaio);
- miglioramento delle proprietà meccaniche dell'acciaio finale.

Nella Figura 1 è riportato un diagramma a blocchi che mostra le possibili configurazioni processistico-impiantistiche che i trattamenti di metallurgia secondaria possono prevedere. A seconda del tipo di acciaio prodotto possono essere previsti uno o più di tali trattamenti. Alcuni di questi avvengono nel forno siviera, mentre altri possono necessitare di una seconda siviera. In alcuni casi è previsto un trattamento ulteriore sottovuoto per raggiungere specifici requisiti in termini di concentrazioni di idrogeno, azoto e ossigeno nel prodotto finale. Inoltre, al fine di ottenere un buon grado di omogeneizzazione del bagno, è prevista l'iniezione in siviera di gas inerti di mescolamento come Ar o N₂.

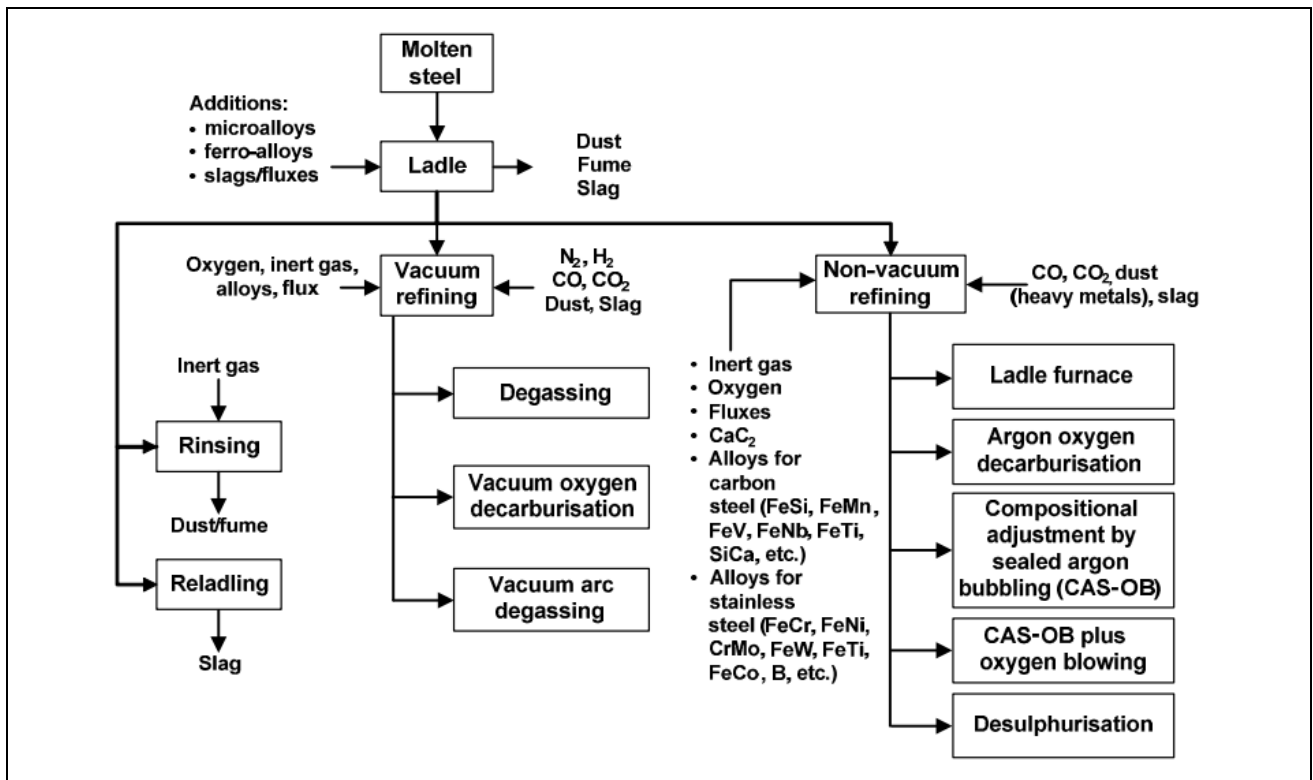


FIGURA 1 - SCHEMA A BLOCCHI DEI TRATTAMENTI DI METALLURGIA SECONDARIA PER DIFFERENTI TIPOLOGIE DI ACCIAIO (AL CARBONIO, INOSSIDABILI, ALTOLEGATI). FONTE "BEST AVAILABLE TECHNIQUES (BAT) REFERENCE – DOCUMENT FOR IRON AND STEEL PRODUCTION" (PAG. 425).

Tra le operazioni principali, comuni a tutti i processi di affinamento, vi sono:

- l'aggiunta nel forno siviera di additivi per la formazione della scoria bianca (tra questi, principalmente calce e allumina), di ferroleghie e di ricarburante, al fine di ottenere la composizione desiderata dell'acciaio finale;
- i cicli di riscaldamento mediante arco elettrico.

Di fondamentale importanza per la riuscita ottimale dei processi di affinamento è proprio il ruolo svolto dalla scoria bianca, che si forma sul bagno di acciaio a temperature elevate, superiori a 1.500°C.

Le funzioni a cui essa assolve sono di natura chimica, come l'intrappolamento dei prodotti delle reazioni di disossidazione, inglobando impurezze e inclusioni, e di natura fisica, fungendo da barriera protettiva per il bagno liquido dal contatto con l'aria (minimizzazione delle eventuali reazioni di ri-ossidazione oltre che delle perdite di calore).

Le operazioni di affinamento nel forno siviera consentono la produzione di un acciaio con elevati gradi di purezza se condotte controllando rigorosamente quantità e composizione della scoria che si produce.

In funzione degli esiti delle verifiche effettuate sulla composizione e della temperatura dell'acciaio liquido, si interviene con l'aggiunta di ulteriori additivi e con cicli di riscaldamento mediante arco elettrico.

Al termine del trattamento di metallurgia secondaria, vale a dire quando la miscela liquida ha raggiunto la composizione finale desiderata, la siviera viene prelevata e depositata in una postazione "esterna" della torretta girevole della macchina di colata continua, mentre su quella "interna" è già posizionata un'altra siviera che alimenta la colata in corso.

Una volta terminata l'operazione di svuotamento dell'acciaio liquido dalla siviera alla macchina di colata continua, o al carro di colata per il colaggio in blumi o alla colata in fossa, la scoria bianca SMS che rimane sul fondo della siviera viene versata insieme all'acciaio residuo (a temperature superiori a 1.500°C) in apposite paiole o in appositi box a terra e trasferita al parco scorie per la successiva fase di raffreddamento e lavorazione.

Nel parco scorie le due tipologie di scoria (scoria nera e scoria bianca) vengono mantenute in aree dedicate distinte, in quanto hanno composizione analitica e merceologica diversa. In particolare, la scoria bianca si differenzia chimicamente dalla scoria nera per il contenuto in ossidi di ferro (contenuto basso nella scoria bianca) e di calcio (contenuto alto nella scoria bianca). Data la presenza preponderante di ossidi di calcio e di magnesio, la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS dopo il raffreddamento subisce una trasformazione del reticolo cristallino che porta alla formazione di un prodotto a granulometria fine.

2. Composizione chimica della scoria bianca

In linea generale, la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS è un composto minerale caratterizzato da una composizione che consiste principalmente in una miscela quaternaria di ossido di calcio (CaO), triossido di alluminio (Al_2O_3), diossido di silicio (SiO_2) e ossido di magnesio (MgO), più altri componenti in percentuali minori.

La principale caratteristica che differenzia la scoria bianca rispetto alle scorie nere, come anticipato nel capitolo precedente, è la sua composizione chimica, e in particolare il contenuto di ossidi di ferro e di calcio: nelle scorie bianche il contenuto di ossidi di ferro è molto basso, mentre l'ossido di calcio CaO è molto alto (ordine di grandezza 50%). Gli altri elementi presenti, Al_2O_3 , SiO_2 , derivano dai formatori di scoria, dalla disossidazione dell'acciaio e dai refrattari (MgO).

Il più autorevole riferimento scientifico utilizzabile per descrivere analiticamente la scoria bianca SMS è l'esito delle attività condotte per la descrizione della scoria bianca stessa ai fini della sua registrazione ai sensi del Regolamento CE n. 1907/2006 (c.d. Regolamento REACH).

Ricordiamo che il Regolamento REACH, che riguarda la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche, e che non si applica ai rifiuti, ha imposto a produttori e importatori europei lo studio delle proprietà chimico-fisiche, tossicologiche ed ecotossicologiche delle sostanze da loro prodotte o importate, allo scopo di presentare un dettagliato dossier di registrazione all'ECHA, l'Agenzia Europea per le sostanze chimiche.

Il Regolamento REACH impone, quindi, di seguire un percorso preciso e di rilevante impegno tecnico e scientifico per giungere a conclusioni riferibili a tutte le scorie prodotte su scala industriale dalla siderurgia europea.

Tra i diversi criteri introdotti dal Regolamento REACH, il più rilevante è sicuramente quello relativo alla "identità della sostanza" (sameness), che viene rispettato quando i produttori dimostrano di possedere gli stessi requisiti per ciò che concerne:

- processo produttivo;
- componenti mineralogici;
- collocazione della composizione chimica all'interno del diagramma ternario (un diagramma ternario è una rappresentazione su un triangolo equilatero di un sistema costituito da 3 variabili, e viene in genere utilizzato per raffigurare la variazione delle proprietà chimico-fisiche di un sistema costituito da 3 componenti al variare della composizione del sistema).

Per poter soddisfare il criterio di "identità della sostanza", la famiglia delle scorie nere da forno elettrico è stata suddivisa in funzione della tipologia di acciaio prodotto (acciaio al carbonio o acciaio inossidabile/altolegato). In virtù delle sue caratteristiche chimico-fisiche, per la scoria bianca, invece, non è

stata fatta alcuna distinzione basata sulla tipologia di acciaio prodotto. Pertanto, la presente linea guida tecnica si applica sia alle scorie bianche derivanti dalla produzione di acciaio al carbonio, sia alle scorie bianche derivanti dalla produzione di acciaio inossidabile/altolegato.

Per ogni tipologia di scoria siderurgica, il Consorzio RFSC (REACH Ferrous Slag Consortium), scientificamente guidato dall'Istituto tedesco FEhS (Research Institute for Iron and steel slags), ha quindi definito i parametri qualitativi e quantitativi della sostanza tal quale e del suo eluato, in modo tale da rendere univoca la caratterizzazione della scoria sulla quale sono stati poi sviluppati gli studi richiesti dal Regolamento REACH.

Famiglia	Tipologia di scoria		Numero CAS	Numero EINECS
1	Scoria da altoforno granulate (Granulated Blast furnace Slag)	GBS	65996-69-2	266-002-0
	Scoria da altoforno raffreddata a aria (Air-cooled Blast furnace Slag)	ABS	65996-69-2	266-002-0
2	Scoria da convertitore (Basic Oxygen furnace Slag)	BOS	91722-09-7	294-409-3
3a	Scoria da forno elettrico dalla produzione di acciaio al carbonio (Electric Arc Furnace slag from Carbon steel production)	EAF-C	-	932-275-6
3b	Scoria da forno elettrico dalla produzione di acciaio inossidabile/altolegato (Electric Arc Furnace slag from Stainless/high alloy steel production)	EAF-S	-	932-476-9
4	Scoria da metallurgia secondaria (Steelmaking Slag)	SMS	65996-71-6	266-004-1

TABELLA 1 - PER CIASCUNA TIPOLOGIA DI SCORIA È RIPORTATO IL NUMERO EINECS (EUROPEAN INVENTORY OF EXISTING COMMERCIAL CHEMICAL SUBSTANCES), E L'EVENTUALE NUMERO CAS (CHEMICAL ABSTRACTS SERVICE), CHE LE IDENTIFICANO IN MODO UNIVOCO.

Per garantire il principio di sameness per i componenti mineralogici, la scoria bianca è stata analizzata con il metodo della diffrazione a raggi X (XRD) con sorgente radiante definita.

Ogni produttore ha pertanto fornito un diagramma XRD della propria scoria utilizzando un campione significativo e i metodi di campionatura e di analisi standard definiti dal Consorzio RFSC.

A titolo esemplificativo, nella Tabella 2 si riportano le componenti mineralogiche più frequentemente rilevate nella scoria bianca da forno elettrico dalla produzione di acciaio, cui la presente linea guida tecnica si riferisce.

Componenti minerali primari	Formula molecolare
gamma-dicalcium-silicate	gamma-Ca ₂ SiO ₄
larnite, beta-dicalcium-silicate	beta-Ca ₂ SiO ₄
calcium-magnesium-silicate (e. g., bredigite, merwinite, diopside)	e.g., Ca ₁₄ Mg ₂ Si ₈ O ₃₂ , Ca ₃ MgSi ₂ O ₈ , CaMgSi ₂ O ₆
mayenite, calcium-aluminium-oxide	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃
cuspidine, calcium-fluoride-silicate	Ca ₄ F ₂ Si ₂ O ₇
Spinel	Me ₂ +Me ₃ + 2O ₄
free lime, calcium-oxide	CaO
periclase, magnesium-oxide	MgO
melilite (solid solution between akermanite and gehlenite), calcium-aluminium-magnesium-silicate	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ – Ca ₂ Al ₂ SiO ₇
tricalcium aluminate	Ca ₃ Al ₂ O ₆
portlandite, calcium hydroxide	Ca(OH) ₂
calcite, calcium carbonate	CaCO ₃
brucite	Mg(OH) ₂

TABELLA 2 - COMPONENTI MINERALOGICHE PIÙ FREQUENTEMENTE RILEVATE NELLA SCORIA BIANCA DA METALLURGIA SECONDARIA SMS.

Riguardo al requisito dell'identità della composizione chimica, il Consorzio RFSC ha utilizzato, come detto, i diagrammi ternari per i quali sono state prese a riferimento tre fasi specifiche, ovvero per la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS [CaO+MgO], [SiO₂+Al₂O₃], [FeO_n+MnO].

Sul diagramma ternario relativo alla scoria bianca SMS (Figura 2), e analogamente per le altre famiglie di scorie, si è individuato, attraverso l'analisi di tutti i campioni rappresentativi di quel tipo di scoria sottoposti

a registrazione REACH, un'area indicativa dei range dei valori e al suo interno è stata scelta la composizione target sulla quale sono stati effettuati i test ecotossicologici e tossicologici richiesti dal protocollo REACH.

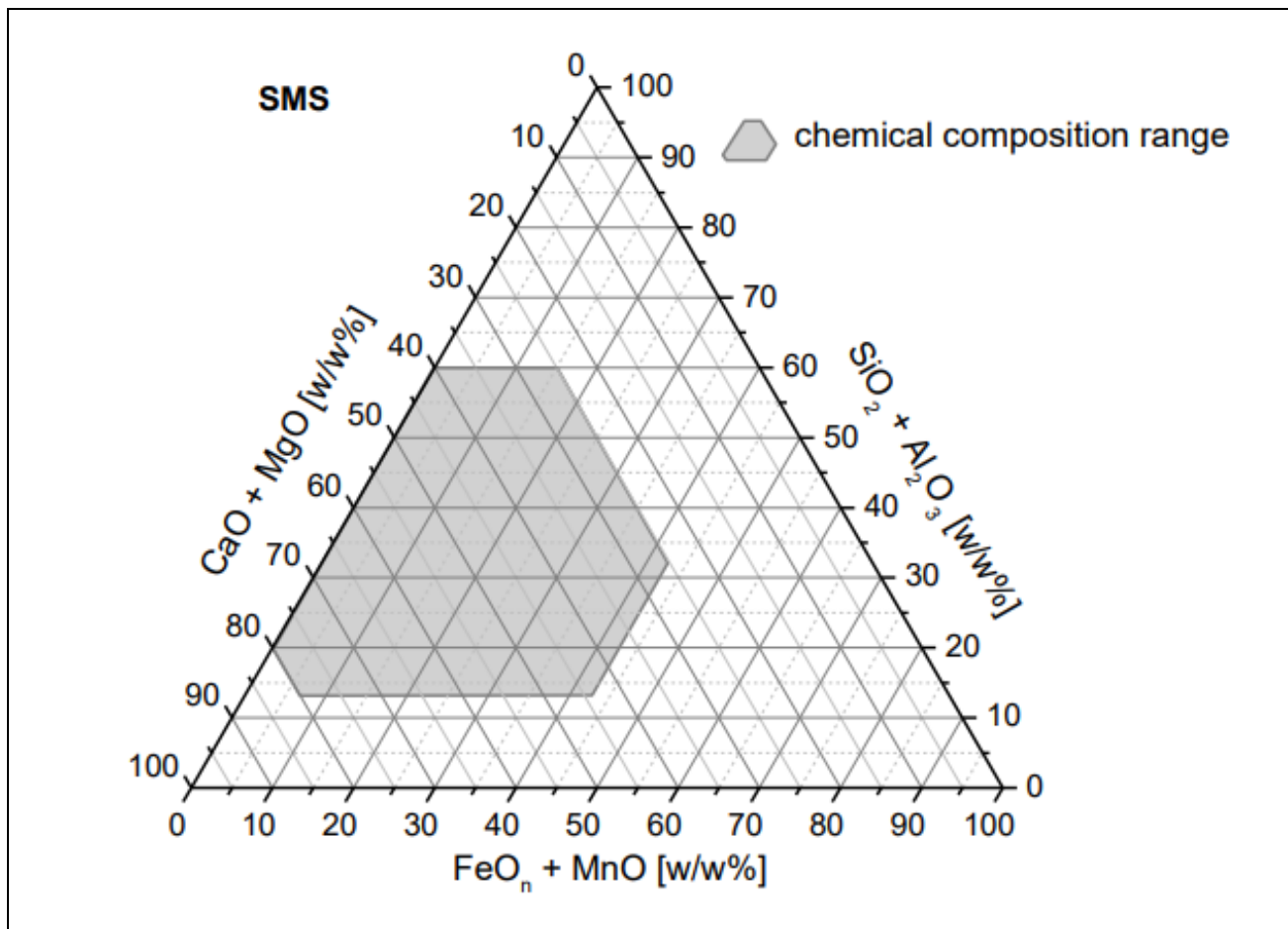


FIGURA 2 - DIAGRAMMA TERNARIO DELLA SCORIA BIANCA DA METALLURGIA SECONDARIA SMS.

Nota 1:

In ragione della complessità della composizione della scoria bianca, contraddistinta dalla presenza di diverse forme mineralogiche in quantità variabile (sostanza registrata come UVCB), il diagramma ternario dei tre gruppi di ossidi ($\text{CaO}+\text{MgO}$), ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$), ($\text{FeO}+\text{MnO}$), costituisce una semplificazione standardizzata utilizzata in ambito di registrazione REACH per caratterizzarne la composizione in riferimento agli elementi costituenti.

La sameness della scoria bianca può quindi essere comprovata secondo entrambe le seguenti modalità:

- **Verifica della composizione da diagramma ternario** (serve a confermare che la scoria bianca prodotta ricada nell'area di composizione identificata in sede di registrazione):
 - determinazione quantitativa dei costituenti principali Ca, Mg, Fe, Mn, Si, Al mediante tecnica spettroscopica ICP-OES o ICP-MS su soluzione ottenuta per dissoluzione completa (total digestion) del campione di scoria bianca.
 - Calcolo delle tre fasi specifiche convenzionali ($\text{CaO}+\text{MgO}$), ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$), ($\text{FeO}+\text{MnO}$) individuate in sede di registrazione come caratterizzanti la composizione della scoria bianca e riparametrate ciascuna al 100%

- *Rappresentazione del diagramma ternario per la verifica del rispetto dell'area di sameness.*
- **Verifica della presenza di fasi mineralogiche caratteristiche** (serve a confermare la presenza delle fasi mineralogiche tipiche, derivanti dal processo metallurgico):
 - *Determinazione qualitativa delle forme mineralogiche presenti con metodo per diffrazione a raggi X (XRD) con sorgente radiante definita.*

Nota 2

La presenza di forme carbonatiche nella scoria bianca (ad esempio carbonati di calcio e magnesio) è dovuta principalmente alla carbonatazione che avviene per azione della CO₂ atmosferica durante lo stoccaggio in bulk della scoria stessa. In ragione di ciò, la scoria bianca può contenere una % di CO₂ “catturata”, sotto forma di carbonati, variabile in funzione del tempo di stoccaggio e delle sue condizioni.

La possibile relazione di tale aspetto con le modalità di calcolo delle emissioni di CO₂ (ad esempio in ambito ETS - Emissions Trading Scheme o per la determinazione della Carbon Footprint) non rientra nello scopo delle presenti linee guida.

3. Caratteristiche chimico-fisiche della scoria bianca

Per descrivere le caratteristiche chimico-fisiche della scoria bianca è possibile assumere come riferimento il “Rapporto sulla Sicurezza Chimica” (CSR) elaborato in ambito REACH. Il CSR contiene, in particolare, il sommario dettagliato delle informazioni sulle proprietà della sostanza che possono costituire un pericolo per l’ambiente e per la salute umana e, ove necessario, una valutazione dell’esposizione e del rischio.

Nel caso della scoria bianca, si tratta di un documento voluminoso, che ha raccolto il contributo della comunità scientifica e l’adesione del 97% dei produttori di scoria europei, depositato presso l’Agenzia Europea ECHA e disponibile per la consultazione e i commenti da parte dei soggetti interessati.

Nel CSR sono riportate le conclusioni derivanti dalla caratterizzazione delle scorie per quanto attiene non solo agli aspetti chimico-fisici, ma anche a quelli eco-tossicologici e tossicologici.

I risultati del CSR indicano che la scoria bianca non è da classificarsi ai fini del Sistema Globalizzato di Classificazione e Etichettatura delle Sostanze Chimiche (GHS) e della Direttiva per le sostanze pericolose e, pertanto, non le sono attribuite caratteristiche di pericolosità.

La scoria bianca si caratterizza soprattutto per la presenza di ossidi di calcio e, a oggi, tra gli utilizzi prevalenti si ha la reimmissione in acciaieria in sostituzione di materia prima in colata, oppure l’impiego come fonte di CaO e altri ossidi, in sostituzione degli inerti naturali, nella preparazione del clinker di cemento.

Inoltre, proprio la presenza di ossidi di calcio conferisce a questo materiale un carattere prettamente “idraulico” e le proprietà fisico-meccaniche che ne derivano suggeriscono un suo impiego anche come integrazione di cemento o calce in malte e miscele a legante idraulico, nonché come agente per la stabilizzazione dei terreni. Minore è l’utilizzo della scoria bianca nella sovrastruttura stradale, per esempio all’interno degli strati superficiali in conglomerato bituminoso.

Nella Tabella 3 si riportano le proprietà chimico-fisico delle scorie, come contenute nel database delle sostanze registrate sul sito web dell’ECHA (<https://echa.europa.eu/it/registration-dossier/-/registered-dossier/16143>) e parte integrante del CSR.

Summary of physicochemical properties of SMS slag	
Substance	SMS
Physical state at room temperature	Solid
Origin	Inorganic
Colour	Grey
Odour	Odourless
Melting point (°C)	> 1000
Boiling point	Boils above 2000 °C
Density (kg/L)	Approximately 3
Vapour pressure	< 0,000000001 Pa
Surface tension	Not intended to be a surfactant
Water solubility	< 1 g/l
K _{ow}	Inorganic UVCB
Flash-point	Inorganic
Flammability	Not flammable
Explosive properties	Not explosive
Self-ignition temperature	No spontaneous combustion
Oxidising properties	No oxidizing properties
Grain size fraction 1-4 µm (% w/w of total)	For example, SMS (0/11) <15%
Stability in organic solvents	Insoluble in organic solvents
Dissociation constant	Insoluble UVCB
Viscosity at room temperature	Solid

TABELLA 3 - PROPRIETÀ CHIMICO-FISICO DELLE SCORIE BIANCHE, CONTENUTE NEL DATABASE DELLE SOSTANZE REGistrate SUL SITO WEB DELL'ECHA E PARTE INTEGRANTE DEL CSR (CHEMICAL SAFETY REPORT).

4. Gestione del residuo scoria bianca

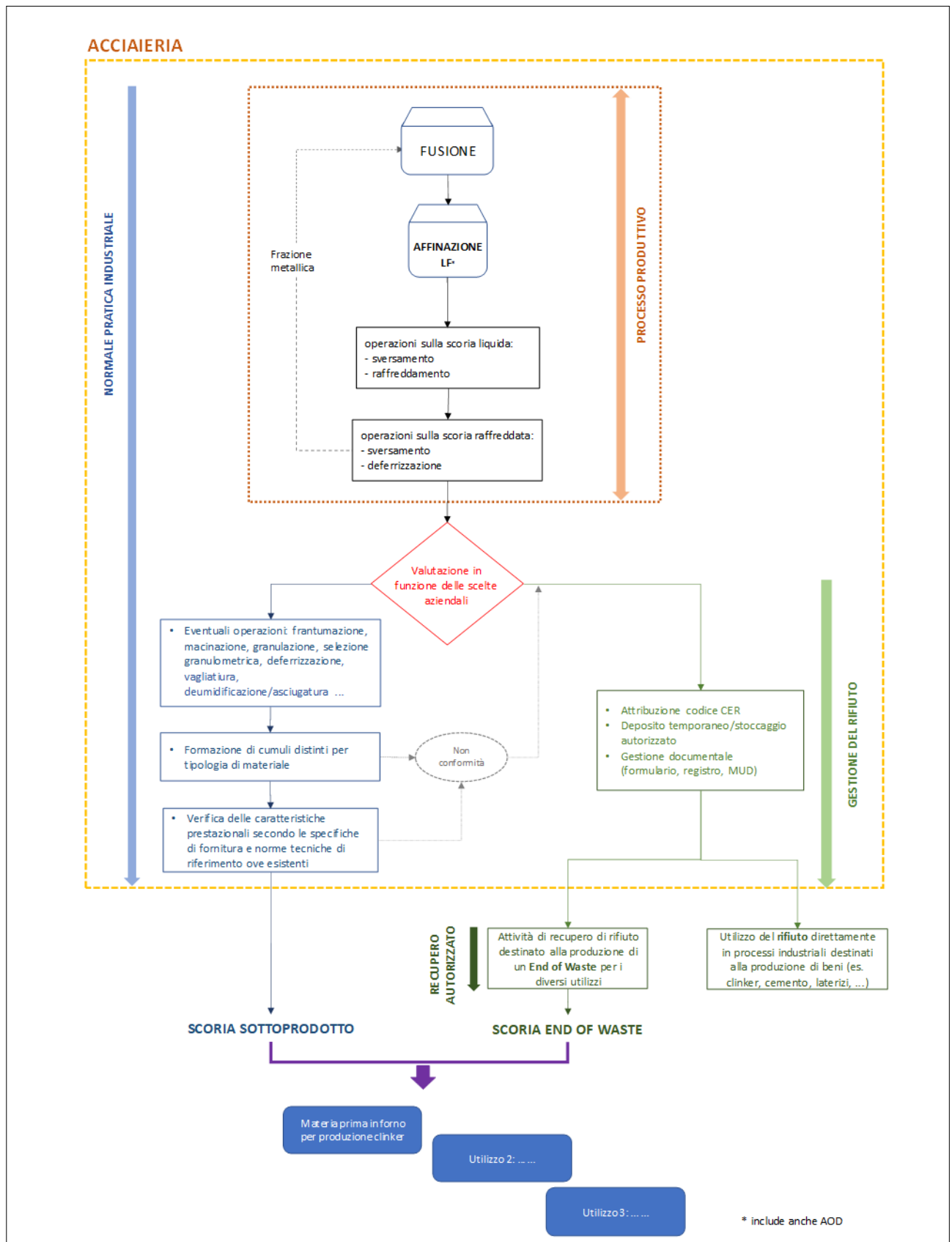


Figura 3 - Schema di flusso della gestione della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS.

5. Utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria sms nella produzione del clinker di cemento

5.1. Il processo di produzione del cemento

Il cemento è un legante idraulico il cui componente principale è rappresentato dal clinker. Il clinker è un minerale artificiale che, miscelato con acqua, ha la proprietà di acquisire consistenza lapidea. Esso è composto da:

- silicato bicalcico - $(\text{CaO})_2 \text{SiO}_2$;
- silicato tricalcico - $(\text{CaO})_3 \text{SiO}_2$;
- allumino ferrito tetracalcico - $(\text{CaO})_4 \text{Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$;
- alluminato tricalcico - $(\text{CaO})_3 \text{Al}_2\text{O}_3$.

I composti sopra elencati sono ottenuti da reazioni ad alta temperatura tra gli ossidi di Ca, Si, Fe e Al contenuti nelle materie prime naturali o materie prime secondarie di origine industriale (EoW) o sottoprodotti o rifiuti non pericolosi recuperati come materia prima (operazione R5 secondo D. Lgs. n. 152/06), che ne sono gli apportatori.

Le materie prime comunemente utilizzate sono: calcare, argilla, marna, pozzolana, minerale di ferro, silice, fluorite, caolino e feldspato.

Le scorie bianche da metallurgia secondaria SMS, oggetto della presente linea guida, possono essere utilizzate nel processo di produzione del clinker in parziale sostituzione di alcune materie prime naturali, in quanto contengono alcuni degli ossidi necessari, fra cui l'ossido di calcio CaO .

La percentuale di materie prime che possono essere sostituite, in particolare calcare e marna, dipende dalla qualità dei materiali naturali che si andranno a sostituire. Si può ipotizzare un utilizzo di scoria bianca da metallurgia secondaria SMS pari al 5% rispetto al totale delle materie prime.

Per poter formare i componenti del clinker, le materie prime devono essere finemente macinate (in modo tale da favorire il contatto chimico tra gli ossidi) secondo proporzioni tali da assicurare il corretto rapporto tra gli ossidi (c.d. moduli) e successivamente portate alla temperatura di circa 1.450°C per far avvenire il processo di clinkerizzazione.

Il processo di produzione prevede:

- approvvigionamento di materie prime e combustibili necessari;
- macinazione delle materie prime che, opportunamente dosate, sono ridotte a una polvere finissima, detta farina;
- macinazione del combustibile solido necessario alla fase di cottura;
- cottura della farina, che viene progressivamente portata alla temperatura prima di decarbonatazione del calcare ($800\div 900^\circ\text{C}$) e poi a quella di clinkerizzazione (1.450°C);

- raffreddamento del clinker fino alla temperatura di 100÷150°C, necessaria a stabilizzare le componenti mineralogiche formatesi e a consentirne la messa a deposito;
- macinazione del clinker prodotto per la formulazione dei cementi. Il clinker è macinato in miscela con il gesso, sottoprodotti apportatori di solfato di calcio per regolare i tempi di presa, e con altri componenti che conferiscono specifiche proprietà, per ottenere i cementi commercializzati come prodotti sfusi o insaccati. Oltre al clinker e al gesso i componenti comunemente utilizzati sono: calcare, loppa, pozzolana e ceneri volanti.

Le diverse tipologie di cemento prodotte sono normate dalle Norme Tecniche Europee:

- UNI EN 197-1 – Cemento: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni;
- UNI EN 413-1 - Cemento da muratura: Composizione, specifiche e criteri di conformità.

5.2. Utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS come sottoprodotto nella produzione del clinker di cemento

5.2.1 Trattamenti considerabili “normale pratica industriale”

Nell’ambito della gestione della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS possono essere svolte sul materiale alcune operazioni considerabili di normale pratica industriale ai sensi della lettera c) dell’art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/2006.

Di seguito si riporta un elenco (non esaustivo) di tali operazioni di normale pratica industriale:

- **trasporto della scoria liquida all’area di lavorazione delle scorie;**
- **sversamento;**
- **raffreddamento;**
- **deferrizzazione;**
- **frantumazione;**
- **macinazione;**
- **granulazione;**
- **selezione granulometrica;**
- **vagliatura;**
- **deumidificazione/asciugatura;**
- **essiccazione;**
- **formazione di cumuli suddivisi per tipologia.**

Non si escludono, infine, altre particolari specifiche operazioni, anche innovative. In definitiva, la normale pratica industriale per il sottoprodotto scoria bianca SMS si traduce in una mera lavorazione meccanica atta a rendere idoneo dal punto di vista granulometrico/merceologico il materiale. Tale pratica è del tutto analoga a quella che si effettua sulla materia prima di origine naturale che il sottoprodotto va a sostituire, che può essere sottoposta ad esempio a operazioni di movimentazione, frantumazione, vagliatura, ecc.

5.2.2 Verifica delle condizioni dell'art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/2006

Nel presente capitolo viene analizzato e approfondito - a livello normativo - l'utilizzo della scoria bianca come sottoprodotto nel caso specifico della produzione del clinker di cemento.

Nel processo produttivo del clinker di cemento, infatti, vengono utilizzati, come materia prima naturale, minerali contenenti principalmente ossido di calcio, ossido di silicio, ossido di alluminio, ossido di ferro, ossido di magnesio e ossido di manganese. Le analisi dimostrano che tali ossidi sono presenti nella scoria bianca in percentuali idonee al suo impiego nella produzione del clinker in sostituzione, o integrazione, delle materie prime naturali.

Ciò premesso, nella Tabella 4 sono declinate le quattro condizioni previste dall'art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/2006 che devono essere soddisfatte dalla scoria bianca SMS per poterla utilizzare - come sottoprodotto - nella produzione del clinker di cemento.

Condizione prevista dall'art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/06	Applicazione alla scoria bianca SMS come sottoprodotto nella produzione del clinker
<i>La sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto.</i>	La scoria bianca da metallurgia secondaria SMS si origina contestualmente al processo metallurgico di produzione dell'acciaio, e ne è quindi parte integrante. Tuttavia, il prodotto primario dell'industria siderurgica è l'acciaio, e non la scoria bianca. Essendo quindi la scoria bianca parte integrante del processo produttivo dell'acciaio, ma non il suo scopo primario, risulta soddisfatta la prima delle condizioni previste dall'art. 184-bis del D.Lgs. n. 152/2006 per il sottoprodotto.
<i>È certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del</i>	La condizione relativa alla certezza dell'utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS nella produzione del clinker può essere dimostrata:

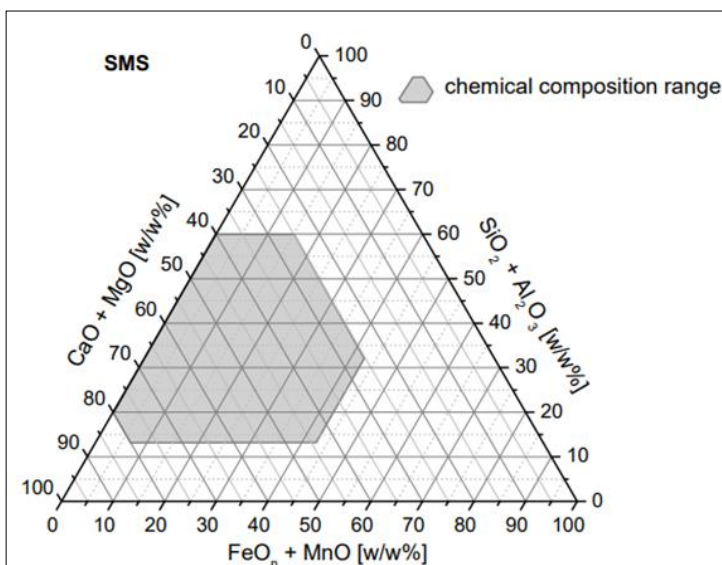
<p><i>produttore o di terzi.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - dall'esistenza di rapporti commerciali o contrattuali tra il produttore della scoria bianca e gli utilizzatori della stessa, o eventuali intermediari. I rapporti commerciali o contrattuali devono includere informazioni relative a caratteristiche tecniche e modalità di utilizzo della scoria bianca nella produzione del clinker; e/o in assenza di un rapporto commerciale o contrattuale: - dalla predisposizione di una documentazione tecnica, nella quale vengano indicate: <ul style="list-style-type: none"> - le tipologie di attività o impianti di utilizzo a cui viene destinato il sottoprodotto scoria bianca; - le modalità di gestione, incluse la raccolta e il deposito della scoria bianca; - i parametri chimico-fisici che rendono la scoria bianca idonea per la produzione del clinker.
<p><i>La sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale.</i></p>	<p>Nella Figura 3 sono riportati, seppure in modo non esaustivo, le principali operazioni e i principali trattamenti effettuati sulla scoria bianca da metallurgia secondaria SMS che rientrano nella normale pratica industriale (deferizzazione, eventuale frantumazione/macinazione/granulazione, ecc.).</p>
<p><i>L'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.</i></p>	<p>1. Requisiti di prodotto</p> <p>In assenza di una norma tecnica che indichi le caratteristiche chimico-fisiche e prestazionali che la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS deve possedere per la produzione di clinker, tali caratteristiche vengono definite - di prassi - nell'ambito degli accordi commerciali di fornitura tra produttore e utilizzatore. Gli accordi commerciali tengono conto sia del processo produttivo del clinker, che può essere adattato/controllato in funzione delle materie prime in ingresso, sia delle caratteristiche che il prodotto finale (clinker) deve possedere per uno specifico utilizzo.</p> <p>Come riportato nel cap. 5, la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS viene utilizzata in un processo industriale che si conclude con la produzione di un materiale (cemento), che rispetta le pertinenti</p>

normative tecniche europee:

- UNI EN 197-1 Cemento: Composizione, specificazioni criteri di conformità per cementi comuni;
- UNI EN 413-1 Cemento da muratura: Composizione, specifiche e criteri di conformità.

I criteri di cui all'art. 184-bis, lettera d) del D.Lgs. n. 152/2006 (requisiti pertinenti riguardanti i prodotti) si ritengono soddisfatti nel rispetto delle seguenti condizioni:

- la composizione della scoria bianca SMS deve ricadere all'interno di un'area ben definita, individuata su un diagramma ternario costruito prendendo a riferimento tre fasi specifiche: $[\text{CaO}+\text{MgO}]$, $[\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3]$, $[\text{FeO}_n+\text{MnO}]$. Si tratta del criterio della "identità della sostanza" (sameness) utilizzato, nell'ambito del Regolamento CE n. 1907/2006 sulle sostanze chimiche (Regolamento REACH), per la registrazione della sostanza Steelmaking Slag SMS;



- la scoria bianca SMS deve contenere più dell'80% in peso di SiO₂, CaO, Al₂O₃, MgO, FeO.
- cromo totale minore o uguale a 1.000 PPM¹;

¹ L'analisi sul Cr totale viene svolta secondo almeno una delle seguenti metodiche:

- UNI EN 13656:2021 "Suolo, rifiuti organici trattati, fanghi e rifiuti - Digestione con una miscela di acido fluoridrico (HF), acido nitrico (HNO₃) e acido cloridrico (HCl) per la successiva determinazione degli elementi";

	<ul style="list-style-type: none"> - pezzatura minore o uguale a 50 mm; - umidità minore o uguale al 20%. <p>2. Requisiti per la protezione di salute e ambiente</p> <p>La scoria bianca da metallurgia secondaria SMS è stata registrata ai sensi del Regolamento CE n. 1907/2006 (c.d. Regolamento REACH), che rappresenta il più autorevole riferimento scientifico utilizzabile per descrivere analiticamente tale materiale (scoria bianca). Infatti, il Regolamento REACH, che riguarda la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche, e che non si applica ai rifiuti, ha imposto a produttori e importatori europei lo studio delle proprietà chimico-fisiche, tossicologiche ed ecotossicologiche delle sostanze da loro prodotte o importate, allo scopo di presentare un dettagliato dossier di registrazione all'ECHA, l'Agenzia Europea per le sostanze chimiche. Inoltre, i risultati contenuti nel Chemical Safety Report (CSR) indicano che la scoria bianca non è da classificarsi ai fini del Sistema Globalizzato di Classificazione e Etichettatura delle Sostanze Chimiche (GHS) e della Direttiva per le sostanze pericolose e, pertanto, non le sono attribuite caratteristiche di pericolosità.</p> <p>Considerando poi la natura del materiale e il meccanismo di generazione nel processo metallurgico, il contenuto degli inquinanti organici persistenti risulta trascurabile e rientra comunque ampiamente nei limiti previsti dalla normativa².</p> <p>Per questa tipologia di impiego, direttamente come materia prima caricata nei forni per la produzione del clinker, non è richiesta la</p>
--	--

-
- UNI EN 13657:2004 "Caratterizzazione dei rifiuti - Digestione per la successiva determinazione della porzione solubile in acqua regia degli elementi contenuti nei rifiuti";
 - UNI EN ISO 11885:2009 "Qualità dell'acqua - Determinazione di alcuni elementi mediante spettrometria di emissione ottica al plasma accoppiato induttivamente";
 - UNI EN ISO 17294-2:2016 "Qualità dell'acqua - Applicazione della spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS) - Parte 2: Determinazione di elementi selezionati, compresi gli isotopi dell'uranio".

² Valore limite di concentrazione di Dibenzo-p-diossine e dibenzofurani policlorurati (PCDD/PCDF) e policlorobifenili diossina-simili (dl-PCB) pari a 5 µg/kg (Allegato IV del Regolamento UE 2019/1021 relativo agli inquinanti organici persistenti).

	<p>verifica di lisciviazione (materiale classificato per discarica per inerti), né altra attività di controllo analitica diversa da una normale analisi di caratterizzazione dei parametri di composizione.</p>
--	---

TABELLA 4 - IN TABELLA SONO RIPORTATE LE CONDIZIONI PREVISTE DALL'ART. 184-BIS DEL D.LGS. N.152/2006, E LA RELATIVA APPLICAZIONE ALLA SCORIA BIANCA UTILIZZATA PER LA PRODUZIONE DEL CLINKER.

5.3 Utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS come End of Waste nella produzione del clinker di cemento

Nel caso in cui l'acciaieria attribuisca alla scoria bianca da metallurgia secondaria SMS lo status di rifiuto, rifacendosi all'Elenco Europeo dei Rifiuti (European Waste Catalogue) Decisione 2000/532/CEE, le viene assegnato il codice EER 100202 "scorie non trattate". Il codice EER 100201 "rifiuti del trattamento delle scorie" può essere attribuito alle scorie-rifiuto derivanti da operazioni di trattamento.

Successivamente, la scoria-rifiuto può essere avviata a un impianto autorizzato al suo recupero End of Waste (EoW), oppure può essere recuperata come EoW dalla stessa acciaieria che l'ha prodotta, autorizzata in A.I.A. (Autorizzazione Integrata Ambientale) a svolgere tale operazione. Sarà compito dell'impianto di recupero EoW attenersi a quanto disposto dall'art. 184-ter del D. Lgs. n. 152/2006 "Cessazione della qualifica di rifiuto" (End of Waste) e dalle prescrizioni presenti nella propria autorizzazione.

5.3.1 Verifica delle condizioni dell'art. 184-ter del D.Lgs. n. 152/2006

Nel presente capitolo viene analizzato e approfondito - a livello normativo - l'utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS come End of Waste (EoW) nel caso specifico della produzione del clinker di cemento. Nel processo produttivo del clinker di cemento, infatti, vengono utilizzati, come materia prima naturale, minerali contenenti principalmente ossido di calcio, ossido di silicio, ossido di alluminio, ossido di ferro, ossido di magnesio e ossido di manganese. Le analisi dimostrano che tali ossidi sono presenti nella scoria bianca SMS in percentuali idonee al suo impiego nella produzione del clinker in sostituzione, o integrazione, delle materie prime naturali.

Ciò premesso, nella Tabella 5 sono declinati i quattro criteri previsti dall'art. 184-ter del D.Lgs. n. 152/2006 che devono essere soddisfatti dalla scoria bianca da metallurgia secondaria SMS per poterla utilizzare - come End of Waste - nella produzione del clinker di cemento.

Criterio previsto dall'art. 184-ter del D.Lgs. n. 152/06	Applicazione alla scoria bianca SMS come End of Waste nella produzione del clinker
<i>La sostanza o l'oggetto sono destinati a essere utilizzati per scopi specifici.</i>	L'utilizzo della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS nella produzione del clinker di cemento rappresenta la destinazione di maggiore interesse per i potenziali vantaggi sia in termini di riduzione del consumo di risorse naturali sia in termini di riduzione delle emissioni di gas serra. Gli accordi commerciali o contrattuali tra il produttore e l'utilizzatore
<i>Esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto.</i>	

	<p>dell'End of Waste scoria bianca da metallurgia secondaria SMS definiscono - in maniera puntuale - quali sono le caratteristiche chimico-fisiche che il materiale deve possedere per poter essere impiegata nella produzione del clinker di cemento e dimostrano, pertanto, l'esistenza di uno specifico mercato a cui tale EoW è destinato.</p>
<p><i>La sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti.</i></p>	<p>In assenza di una norma tecnica che indichi le caratteristiche chimico-fisiche e prestazionali che la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS deve possedere per la produzione di clinker, tali caratteristiche vengono definite - di prassi - nell'ambito degli accordi commerciali di fornitura tra produttore e utilizzatore. Gli accordi commerciali tengono conto sia del processo produttivo del clinker, che può essere adattato/controllato in funzione delle materie prime in ingresso, sia delle caratteristiche che il prodotto finale (clinker) deve possedere per uno specifico utilizzo.</p> <p>Come riportato nel cap. 5, la scoria bianca da metallurgia secondaria SMS viene utilizzata in un processo industriale che si conclude con la produzione di un materiale (cemento) che rispetta le pertinenti normative tecniche europee, vale a dire:</p> <ul style="list-style-type: none"> - UNI EN 197-1 Cemento: Composizione, specificazioni criteri di conformità per cementi comuni; - UNI EN 413-1 Cemento da muratura: Composizione, specifiche e criteri di conformità. <p>Inoltre, i provvedimenti autorizzatori degli impianti che svolgono operazioni di recupero End of Waste della scoria-rifiuto devono includere:</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'indicazione delle caratteristiche merceologiche che l'End of Waste deve possedere; - requisiti affinché i sistemi di gestione degli impianti di recupero dimostrino il rispetto dei criteri relativi alla cessazione della qualifica di rifiuto, compresi il controllo della qualità, l'automonitoraggio e l'accreditamento, se del caso; - un requisito relativo alla dichiarazione di conformità del prodotto da recupero della scoria.

	<p>I criteri di cui all'art. 184-ter, lettera c) del D.Lgs. n. 152/2006 si ritengono soddisfatti nel rispetto delle seguenti condizioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> - la composizione della scoria bianca SMS deve ricadere all'interno di un'area ben definita, individuata su un diagramma ternario costruito prendendo a riferimento tre fasi specifiche: $[\text{CaO}+\text{MgO}]$, $[\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3]$, $[\text{FeO}_n+\text{MnO}]$. Si tratta del criterio della "identità della sostanza" (sameness) utilizzato, nell'ambito del Regolamento CE n. 1907/2006 sulle sostanze chimiche (Regolamento REACH), per la registrazione della sostanza Steelmaking Slag SMS; <div data-bbox="699 705 1433 1238"> </div> <ul style="list-style-type: none"> - la scoria bianca SMS deve contenere più dell'80% in peso di SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO, FeO; - cromo totale minore o uguale a 1.000 PPM³; - pezzatura minore o uguale a 50 mm; - umidità minore o uguale al 20%.
<p><i>L'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi</i></p>	<p>La scoria bianca da metallurgia secondaria SMS è stata registrata ai sensi del Regolamento CE n. 1907/2006 (c.d. Regolamento REACH),</p>

³ L'analisi sul Cr totale viene svolta secondo almeno una delle seguenti metodiche:

- UNI EN 13656:2021 "Suolo, rifiuti organici trattati, fanghi e rifiuti - Digestione con una miscela di acido fluoridrico (HF), acido nitrico (HNO_3) e acido cloridrico (HCl) per la successiva determinazione degli elementi";
- UNI EN 13657:2004 "Caratterizzazione dei rifiuti - Digestione per la successiva determinazione della porzione solubile in acqua regia degli elementi contenuti nei rifiuti";
- UNI EN ISO 11885:2009 "Qualità dell'acqua - Determinazione di alcuni elementi mediante spettrometria di emissione ottica al plasma accoppiato induttivamente";
- UNI EN ISO 17294-2:2016 "Qualità dell'acqua - Applicazione della spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS) - Parte 2: Determinazione di elementi selezionati, compresi gli isotopi dell'uranio".

<p><i>sull'ambiente o sulla salute umana.</i></p>	<p>che rappresenta il più autorevole riferimento scientifico utilizzabile per descrivere analiticamente tale materiale (scoria bianca da metallurgia secondaria SMS). Infatti, il Regolamento REACH, che riguarda la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche, e che non si applica ai rifiuti, ha imposto a produttori e importatori europei lo studio delle proprietà chimico-fisiche, tossicologiche ed ecotossicologiche delle sostanze da loro prodotte o importate, allo scopo di presentare un dettagliato dossier di registrazione all'ECHA, l'Agenzia Europea per le sostanze chimiche. Inoltre, i risultati contenuti nel Chemical Safety Report (CSR) indicano che la scoria bianca non è da classificarsi ai fini del Sistema Globalizzato di Classificazione e Etichettatura delle Sostanze Chimiche (GHS) e della Direttiva per le sostanze pericolose e, pertanto, non le sono attribuite caratteristiche di pericolosità.</p> <p>Considerando poi la natura del materiale e il meccanismo di generazione nel processo metallurgico, il contenuto degli inquinanti organici persistenti risulta trascurabile e rientra comunque ampiamente nei limiti previsti dalla normativa⁴.</p> <p>Per questa tipologia di impiego, direttamente come materia prima caricata nei forni per la produzione del clinker, non è richiesta la verifica di lisciviazione (materiale classificato per discarica per inerti), né altra attività di controllo analitica diversa da una normale analisi di caratterizzazione dei parametri di composizione.</p>
---	--

TABELLA 5 - IN TABELLA SONO RIPORTATI I CRITERI PREVISTI DALL'ART. 184-TER DEL D.LGS. N.152/2006, E LA RELATIVA APPLICAZIONE ALLA SCORIA BIANCA UTILIZZATA PER LA PRODUZIONE DEL CLINKER.

⁴ Valore limite di concentrazione di Dibenzo-p-diossine e dibenzofurani policlorurati (PCDD/PCDF) e policlorobifenili diossina-simili (dl-PCB) pari a 5 µg/kg (Allegato IV del Regolamento UE 2019/1021 relativo agli inquinanti organici persistenti).

5.4 Vantaggi derivanti dall'impiego della scoria bianca da metallurgia secondaria SMS nella produzione del clinker di cemento

Di seguito sono riportati i principali vantaggi che derivano dall'utilizzo della scoria bianca nella produzione del clinker di cemento in sostituzione dei minerali di origine naturale. Tali vantaggi non riguardano solo gli aspetti ambientali (riduzione dello sfruttamento delle risorse naturali, riduzione del consumo di suolo, ecc.), ma coinvolgono anche aspetti caratteristici dell'economia circolare e della simbiosi industriale.

Driver	Scoria bianca	Minerali di origine naturale	Note
Economia circolare Simbiosi industriale	***	*	Attuazione delle buone pratiche di Economia Circolare e di Simbiosi Industriale, in quanto la scoria bianca, residuo di produzione derivante dal ciclo produttivo dell'acciaio, diviene risorsa per un altro e diverso ciclo produttivo industriale (produzione del clinker), e non viene così destinata a smaltimento in discarica.
Protezione delle risorse naturali	***	*	Riduzione del consumo di risorse naturali provenienti da cava, in quanto la scoria bianca è assimilabile per caratteristiche chimico-fisiche ai minerali utilizzati nella produzione del clinker.
Emissioni di gas serra	***	*	Nell'ambito dell'Emission Trading Scheme (ETS), l'utilizzo di un prodotto già decarbonato (scoria bianca da metallurgia secondaria SMS) contribuisce a ridurre le emissioni di gas serra del processo produttivo del clinker di cemento.
Consumi energetici	***	*	L'utilizzo della scoria bianca SMS nel processo produttivo del clinker di cemento ha la potenzialità di ridurre i consumi energetici, in quanto viene spesa meno energia per far avvenire la scissione del carbonato di calcio e biossido di carbonio per ottenere ossido di calcio.

6. Utilizzi innovativi

6.1 Applicazione in matrici polimeriche come filler non convenzionale

I materiali polimerici possono essere additivati con cariche minerali (filler) rinforzanti o non rinforzanti con il fine di migliorare le proprietà meccaniche e/o tecnologiche nel primo caso, oppure di abbassare il costo finale. L'impiego della scoria bianca come alternativa alle cariche minerali convenzionali può rappresentare un approccio innovativo e sostenibile, sia per le proprietà chimico-fisiche del residuo, sia per la sua granulometria particolarmente fine, richiesta per questa specifica applicazione (inferiore a 0,1 mm). A tal proposito, si evidenzia che la composizione chimica delle cariche minerali e additivi maggiormente utilizzati nel campo dei materiali polimerici è costituita da ossido di calcio, carbonato di calcio, allumina e silice. Per quanto riguarda la granulometria, la tendenza della scoria bianca a polverizzarsi, di solito considerata un problema di gestione, può trasformarsi in questo contesto in un vantaggio significativo anche nel recupero del particolato più fine.

Come per l'applicazione nel caso del clinker, la possibilità di utilizzo come filler di inerte in queste matrici polimeriche, non richiede l'esecuzione di test di lisciviazione/digestione. Nonostante ciò, si ritiene comunque rilevante sottolineare che da studi scientifici [1-5] è emerso che la matrice polimerica svolge un effetto schermante, inibitore della lisciviazione di elementi pesanti nell'eventualità di una presenza accidentale di questi ultimi all'interno della scoria. Inoltre, anche l'instabilità volumetrica, dovuta al rigonfiamento per idratazione tipica delle scorie bianche non stagionate, nell'applicazione come filler in materiali polimerici non rappresenta un problema come nel caso di altre matrici, sempre grazie all'effetto schermante del polimero.

Dal punto di vista delle proprietà dei materiali, studi sperimentali ancora in corso mettono al confronto la scoria bianca con il carbonato di calcio, carica non rinforzante più comunemente impiegata nelle matrici polimeriche. I primi risultati hanno dimostrato come i compositi additivati con scoria bianca mostrino proprietà simili, se non addirittura superiori in alcuni casi, rispetto a quelle ottenute con il carbonato di calcio [6]. Inoltre, studi di implementazione dell'interazione scoria/matrice, come ad esempio la funzionalizzazione, potrebbero ottimizzare il nuovo composito in termini di proprietà meccaniche dello stesso.

Nello specifico, la miscelazione di scoria trattata, resina polimerica (tipicamente epossidica, poliestere, vinilestere, acrilica) e altri possibili additivi (come catalizzatori, acceleranti o rinforzi) deve generare un composto omogeneo in grado di garantire uniformità nelle proprietà del prodotto finito. Il vantaggio dell'utilizzo della scoria bianca come carica inorganica si manifesta attraverso un incremento delle proprietà meccaniche, in particolare durezza, rigidità e resistenza all'usura, e della resistenza al calore del

composito durante i successivi processi di modellazione mediante stampaggio a compressione, iniezione o estrusione. Tali effetti appaiono particolarmente desiderabili in applicazioni industriali, dove la resistenza meccanica rappresenta un aspetto critico, aprendo all'impiego in una varietà di settori quali l'edilizia, l'automotive, l'aerospaziale e il design di prodotto.

In conclusione, sebbene appaia essenziale condurre ulteriori ricerche per ottimizzare i processi di trattamento e miscelazione e per comprendere appieno le interazioni tra scoria e matrice polimerica, allo scopo di assicurare la consistenza dei materiali compositi prodotti sia in termini prestazionali che di qualità e affidabilità, l'impiego della scoria bianca come filler non convenzionale in matrici polimeriche rappresenta non solo un'opportunità per ridurre l'impatto ambientale e i costi di materiali di varia natura (termoplastici, termoindurenti ed elastomerici) senza limitarne le prestazioni [6], ma anche un'ottima opportunità di simbiosi industriale con indiscussi vantaggi per l'economia circolare del territorio lombardo.

Fonti:

- [1] A. Gobetti, G. Cornacchia, S. Agnelli, M. Ramini, G. Ramorino, A novel and sustainable rubber composite prepared from electric arc furnace slag as carbon black replacement, *Carbon Resour. Convers.* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2024.100230>.
- [2] A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino, Innovative reuse of electric arc furnace slag as filler for different polymer matrixes, *Minerals* 11 (2021) 832. <https://doi.org/10.3390/min11080832>.
- [3] A. Gobetti, G. Cornacchia, M. La Monica, A. Zacco, L.E. Depero, G. Ramorino, Assessment of the influence of electric arc furnace slag as a non-conventional filler for Nitrile Butadiene Rubber, *Results Eng.* 17 (2023) 100987. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100987>.
- [4] A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino, Reuse of Electric Arc Furnace Slag as Filler for Nitrile Butadiene Rubber, *JOM* 74 (2022) 1329–1339. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11837-021-05135-6>.
- [5] A. Gobetti, G. Cornacchia, G. Ramorino, A. Riboldi, L.E. Depero, EAF slag as alternative filler for epoxy screeds , an example of green reuse, *Sustain. Mater. Technol.* 29 (2021) e00324. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00324>.
- [6] A. Gobetti, G. Cornacchia, M. Gelfi, G. Ramorino, White steel slag from ladle furnace as calcium carbonate replacement for nitrile butadiene rubber : A possible industrial symbiosis, *Results Eng.* 18 (2023) 101229. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101229>.

6.2 Applicazione in miscele cementizie

La scoria da siviera è caratterizzata dalla formazione di ossidi cristallini durante il raffreddamento, quali ad esempio ossido di calcio, ossido di magnesio e ossido di ferro. Detti ossidi risultano il principale ostacolo nell'utilizzo diretto in miscele cementizie delle scorie da siviera, in quanto reagiscono con l'acqua producendo idrossidi di calcio, magnesio e ferro che agiscono come sostanze espansive rovinando i materiali cementizi che le contengono [1]. Inoltre, la trasformazione del reticolo cristallino che avviene se il raffreddamento è condotto in modo naturale (lento), attraverso lo sversamento della scoria a terra, porta alla formazione di un materiale fine e polveroso, che ne complica notevolmente la gestione ambientale e logistica o implica l'utilizzo di sistemi di abbattimento sostanzialmente costituiti da spray ad acqua e aggiunta di additivi [2].

Numerosi sono i sistemi ed i processi che sono stati proposti per risolvere le problematiche sopra menzionate, con l'obiettivo di rendere più sostenibile la gestione della scoria da siviera sia dal punto di vista ambientale, riducendo o eliminando la formazione di polvere, che economico, valorizzando la scoria come prodotto [3].

Sono, in questo senso, noti processi di raffreddamento veloce della scoria con lo scopo di ottenere un materiale amorfo, prevenendo la trasformazione cristallina e la disgregazione della matrice [1], e conseguentemente di ridurre la polverosità. Tali processi possono essere effettuati tramite scambio diretto [6-7] oppure indiretto tra la scoria e un fluido raffreddante, in particolare utilizzando aria (figura 4) oppure acqua o la loro combinazione.

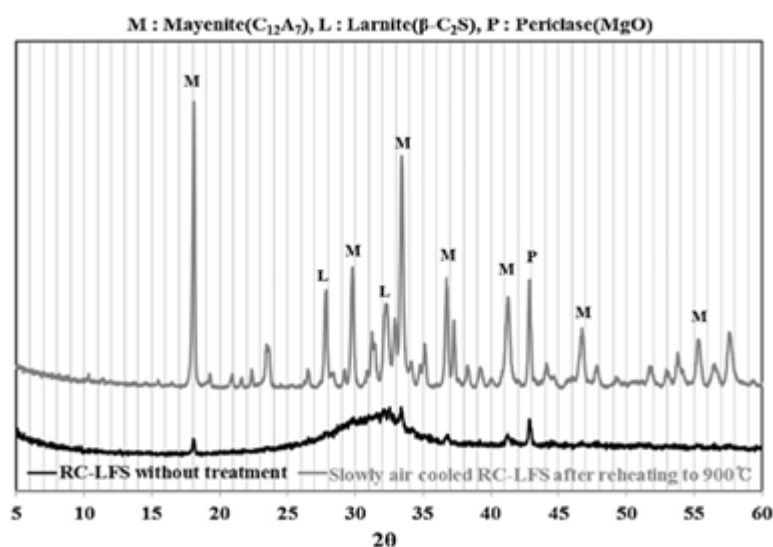


Figura 4 - XRD per una scoria da siviera raffreddata rapidamente con aria (curva inferiore) e raffreddata lentamente (curva superiore) [1]

In analogia con quanto avviene per la scoria di altoforno, tra i processi di raffreddamento con scambio diretto vi è la granulazione della scoria allo stato liquido con acqua oppure a secco [4-5]. La scoria da siviera viene raffreddata in pochi secondi da 1600°-1500°C alla temperatura ambiente e trasformata in granuli a struttura vetrosa e amorfa con diametro compreso tra 1 e 5 mm, acquisendo caratteristiche idrauliche. In particolare, la granulazione a secco può essere realizzata attraverso un processo centrifugo attraverso un disco rotante [6] oppure mediante un getto di aria ad alta velocità [7]. Altri processi consentono di effettuare un raffreddamento veloce, ottenendo un materiale amorfo, tramite scambio termico indiretto tra la scoria allo stato liquido e un fluido di raffreddamento, per esempio acqua.

Queste tecniche di trattamento consentono di:

- evitare il consumo di una risorsa comunque preziosa come l'acqua e la conseguente necessità di trattamento;
- non modificare la composizione della scoria, evitando la formazione di idrossidi di calcio, magnesio e ferro, indesiderata in diverse potenziali applicazioni;
- consentire il recupero diretto del metallo eventualmente contenuto nella siviera, permettendone il riciclo direttamente nella filiera produttiva senza ulteriori trattamenti e determinando, così, una diminuzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra;
- aprire la possibilità del recupero termico del calore.

La scoria bianca granulata ed opportunamente deferrizzata, grazie alla sua composizione e alla struttura amorfa, si presenta come un potenziale valido complemento nelle miscele per una vasta gamma di prodotti, tra cui calcestruzzo, cemento, malte, intonaci e altri materiali usati come leganti e additivi nel settore edilizio [8-9].

Inoltre, l'implementazione di questo processo di valorizzazione offre diversi vantaggi:

- eliminazione della generazione di polveri;
- eliminazione dell'uso di acqua;
- riduzione delle emissioni odorose;
- diminuzione dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra, grazie alla riduzione delle attività di estrazione di materie prime da cave e della loro lavorazione per la produzione di calce;
- diminuzione delle emissioni di CO₂, in quanto il materiale può essere utilizzato direttamente come legante senza dover passare dal processo di clinkerizzazione.

Questi benefici contribuiscono a ridurre gli impatti legati alle filiere produttive dell'acciaio e dei materiali cementizi, in termini sia di consumo di risorse, sia di produzione di gas serra e di consumi energetici [10].

Ai trattamenti di granulazione della scoria metallurgica secondaria (SMS) presentati sopra si possono associare processi di mineralizzazione della CO₂ volti a diminuire l'impronta carbonifera della SMS, che

contribuiscono a ridurre le emissioni di gas serra del processo produttivo del materiale in cui la SMS è riutilizzata. Tali processi sono volti a sottoporre a carbonatazione gli ossidi di calcio, CaO, e magnesio, MgO, mediante iniezione di CO₂ recuperata da altri processi industriali in appositi reattori dove la SMS è in soluzione acquosa in determinate condizioni di temperatura e pressione [11].

Fonti:

- [1] J.M. Kim et al., Improving the mechanical properties of rapid air-cooled ladle furnace slag powder by gypsum, *Construction and Building Materials* (2016) vol. 127, p. 93-101.
- [2] P. P. Sahoo, Prevention of Ladle Furnace Slag Disintegration Through Different Slag Additives, *Journal of Sustainable Metallurgy* (2021) 7:115–125.
- [3] A. Dash et. Al, A Review on Stabilization of Ladle Furnace Slag-Powdering Issue, *Journal of Sustainable Metallurgy* (2022) 8:1435–1449 <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00597-7>.
- [4] P. Yu et Al, A Review of Granulation Process for Blast Furnace Slag MATEC Web of Conferences 6, 0 07 (2016) DOI: 10.1051/mateconf/20166 ICIEA 2016.
- [5] C. Nexhip et al., Dry' Granulation of Slags for Producing Cement Binder Green Processing Conference Fremantle, WA, 10 - 12 May 2004.
- [6] R. Dhirhi et al., Experimental study of rotating dry slag granulation unit: Operating regimes, particle size analysis and scale up, *Applied Thermal Engineering* 107 (2016) 898–906.
- [7] M. Guzzon, et Al., SECONDARY METALLURGICAL SLAG GRANULATION BY FORCED AIR, Euroslag 2019.
- [8] O. Najim et Al., Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production* Volume 288, 15 March 2021, 125584.
- [9] K. Fang et Al., Use of ladle furnace slag as supplementary cementitious material before and after modification by rapid air cooling: A comparative study of influence on the properties of blended cement paste, *Construction and Building Materials* Volume 314, Part A, 3 January 2022, 125434.
- [10] M. Falsafi et al., Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi-criteria decision making, *Journal of Cleaner Production* 402 (2023) 136838.
- [11] C. DiGiovanni, O. A. Hisseine, A. N. Awolayo, Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways, *Journal of CO2 Utilization* 81 (2024) 102736.

6.3 Sequestro CO₂: carbonatazione accelerata e utilizzo come aggiunte minerali

Le scorie bianche da metallurgia secondaria SMS possiedono sì proprietà idrauliche che le caratterizzano come un potenziale materiale cementizio supplementare (SCM), tuttavia contengono normalmente anche delle fasi mineralogiche - ossidi liberi di calcio e magnesio - che si rendono protagonisti di espansioni volumetriche incontrollate con ripercussioni sul manufatto [1].

Per ovviare a questi inconvenienti, un approccio potrebbe essere quello di sottoporre il materiale a processi di macinazione e maturazione, con notevole dispendio di tempo, energia e denaro.

Contemporaneamente, la sensibilizzazione sul tema del riscaldamento globale e sulla riduzione delle emissioni di CO₂ ha portato la comunità scientifica a ricercare substrati adatti ad essere utilizzati per soluzioni di cattura e stoccaggio della CO₂ [2]. In questo contesto, le scorie di acciaieria costituiscono uno dei substrati perfetti per questo tipo di applicazione. La loro composizione chimica e la loro alcalinità, infatti, le rende adatte allo scopo [3]. La loro valorizzazione è ancora di più motivata dal loro essere, attualmente, uno scarto che non viene valorizzato. La proposta per un percorso di circolarità, quindi, si articola sull'utilizzo delle scorie per la cattura di CO₂ e la successiva valorizzazione come aggregato inerte [4]. Infatti, catturando CO₂ si può intervenire contestualmente sulla frazione di ossidi liberi che causano i fenomeni espansivi menzionati in precedenza, rendendo il prodotto finalmente più appetibile per le applicazioni civili [5,6].

In questo ambito sono stati sviluppati trattamenti di carbonatazione accelerata, le cui peculiarità permettono di agire sulla scoria andando contemporaneamente a mineralizzare la CO₂ e a frantumare le particelle, andando a stanare la reattività che normalmente rimarrebbe confinata all'interno delle particelle e che potrebbe manifestarsi in fase di utilizzo.

È bene dire che la mineralizzazione della CO₂ agisce non solo sugli ossidi liberi, ma anche sulle frazioni allumino-silicatiche; la completa conversione di queste fasi, normalmente caratterizzate da attività idraulica più o meno pronunciata, comporta quindi un cambio di connotazione del materiale da aggiunta reattiva a inerte. Con questo tipo di trattamento è possibile controllare l'evoluzione del processo di mineralizzazione, avendo quindi una forma di controllo sulle proprietà finali del materiale. Risultati preliminari mostrano che le scorie trattate con questo processo continuano ad avere un'attività idraulica residua, mentre i fenomeni espansivi a breve termine vengono notevolmente ridotti, se non totalmente soppressi.

Fonti:

- [1] C. Shi, «Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production», *Cement and Concrete Research*, 2002.
- [2] S. Pan, «CO₂ mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction», *Nature Sustainability*, 2020.
- [3] Y. Yi, «Accelerated carbonation of ladle furnace slag and characterization of its mineral phase», *Construction and Building Materials*, 2021.

- [4] Q. Song, «Use of steel slag as sustainable construction materials: a review of accelerated carbonation treatment», *Resources, Conservation and Recycling*, 2021.
- [5] B. Xu, «Treatment of ladle furnace slag by carbonation - Carbon dioxide sequestration, heavy metal immobilization, and strength enhancement», *Chemosphere*, 2022.
- [6] RESILCO - "Scorie bianche di acciaierie a forno elettrico nuovi utilizzi e prospettive" - Convegno: «Il contributo ed il potenziale della Simbiosi Industriale per la transizione ecologica» - ECOMONDO, 27 ottobre 2021.