

# Recupero delle scorie da termovalorizzatore

Per molto tempo le ceneri pesanti prodotte dagli impianti di termovalorizzazione sono state smaltite in discarica in quasi tutti gli Stati europei ed extraeuropei. Negli ultimi anni la crescita del costo di smaltimento in discarica dei residui e la scarsità di aree disponibili hanno reso maggiormente interessante, anche dal punto di vista economico, il recupero delle scorie. I trattamenti più applicati vanno dal semplice recupero dei metalli in esse contenuti al riutilizzo del materiale inerte nei sottofondi stradali o come additivo nella produzione di cemento, calcestruzzo o di materiale da costruzione.

Tra i trattamenti più utilizzati in Italia ed Europa vi sono: la separazione fisica; la separazione chimica; l'invecchiamento naturale.

## Trattamenti applicati Separazione fisica

La separazione fisica permette di rimuovere specifici materiali presenti nel flusso di scorie e incrementarne la possibilità di recupero.

Generalmente le scorie sono sottoposte a classificazione granulometrica che permette di isolare le frazioni più fini e contaminate e di separare parzialmente i materiali metallici presenti. Tale processo migliora le caratteristiche geotecniche del materiale inerte prodotto. La separazione può essere condotta a secco, con il tradizionale utilizzo di vagli a tamburo rotante o piani (con dimensione media delle maglie di 20-50 mm per separare le frazioni grossolane e 2-10 mm per separare la frazione più fine e contaminata), o ad umido, con il vantaggio di combinare la separazione fisica (basata su getti d'acqua ad alta velocità o sul principio della separazione per densità) all'estrazione in acqua delle frazioni più solubili. Inoltre i trattamenti ad umido migliorano le caratteristiche fisiche e di lisciviazione del materiale inerte ma hanno come svantaggio un'ingente quantità di materiale fine separato, oltre alla necessità di trattare il flusso liquido in uscita. La rimozione dei metalli può essere

condotta con maggiori efficienze utilizzando per i metalli ferrosi separatori magnetici e per i non ferrosi separatori a correnti indotte, il cui funzionamento è basato sul principio delle correnti generate da un campo magnetico alternato, rotante e ad elevata frequenza (300-1.000 Hz). La rimozione dei metalli ha il duplice vantaggio di recuperare rottami riciclabili come materia prima secondaria e limitare i problemi di corrosione, rigonfiamento ed espansione in fase di riutilizzo del materiale inerte in opere civili.

Mediamente le scorie contengono circa il 7-15% di metalli ferrosi e l'1-2% di non ferrosi. I metalli non ferrosi si presentano generalmente sotto forma di noduli di dimensione compresa tra i 5 e i 60 mm e sono composti per la maggior parte da alluminio (più del 60%) con una percentuale minoritaria di metalli pregiati come l'ottone e il rame.

Una volta separati dalle scorie, i noduli sono purificati dagli inerti e l'alluminio può essere separato dagli

**Questo articolo è parzialmente tratto dallo studio:  
 “Separazione e recupero dei metalli e valorizzazione delle scorie  
 di combustione dei rifiuti urbani” promosso da CiAI  
 (Consorzio Imballaggi Alluminio), con la collaborazione  
 di Federambiente. Allo studio si rimanda anche  
 per i riferimenti bibliografici riportati nel testo.**

altri metalli mediante separazione densimetrica (molto spesso utilizzando la flottazione). L'efficienza media del recupero di alluminio dalle scorie desumibile dagli studi di letteratura che sono stati analizzati è riportata in Tabella. Essa può essere espressa sia rispetto alla quantità di alluminio alimentato al forno dell'impianto di incenerimento, sia rispetto al peso delle scorie. Nel primo caso il rendimento complessivo del processo di estrazione dipende dalle perdite di materiale in camera di combustione, causate dall'ossidazione del metallo e riguardanti soprattutto la frazione sottile (< 50 µm), e dal rendimento del successivo impianto di trattamento delle scorie (Figura); ne deriva un rendimento complessivo pari a circa il 30% rispetto all'alluminio alimentato al forno. Nel secondo caso bisogna considerare il rendimento dell'impianto di trattamento delle scorie e la presenza di alluminio nelle scorie grezze; il rendimento complessivo che ne deriva è pari a circa l'1% rispetto al peso delle scorie. Tuttavia si osservano situazioni molto diversificate, a seconda della tecnologia utilizzata e della complessità delle linee di trattamento del residuo. Risultati interessanti, sia in termini di recupero dei metalli sia di efficienza delle fasi di classificazione dimensionale, sono emersi dalle prime esperienze di estrazione a secco delle scorie condotte in alcuni impianti in Svizzera. Il bagno in acqua, con cui generalmente vengono spente le scorie, favorisce infatti la loro agglomerazione peggiorando le efficienze in fase di vagliatura. Le scorie secche inoltre danno meno problemi di lisciviazione dei metalli

pesanti (Lamers, 2008).

L'efficienza di recupero dei metalli ferrosi, riportata sempre in Tabella, è invece mediamente superiore a quella raggiungibile per l'alluminio. Si osserva, infatti, un tasso di recupero medio superiore all'80% rispetto al peso di metalli ferrosi alimentati al forno e di circa il 6% rispetto al peso delle scorie.

#### **Separazione chimica**

Il lavaggio in acqua è il processo più semplice a cui possono essere sottoposte le scorie dopo la separazione fisica e permette di rimuovere le sostanze solubili in esse presenti. Generalmente vengono rimossi soprattutto cloriti, sodio e solfati mentre l'efficienza di rimozione nei confronti dei metalli è piuttosto bassa, poiché il pH alcalino delle scorie in sospensione acquosa (9,5-12) corrisponde all'intervallo di solubilità minimo della maggior parte dei metalli. In alcuni casi per migliorare la solubilità di alcuni composti, soprattutto dei solfati, si dosa nell'acqua del bicarbonato di sodio (NaHCO<sub>3</sub>) o della CO<sub>2</sub> che favoriscono la precipitazione del calcio e dei carbonati al posto dei solfati.

Per quanto concerne i metalli, una certa capacità di estrazione con acqua è stata mostrata per il rame, il cromo e il piombo ma raramente le efficienze raggiunte permettono di soddisfare i limiti normativi per la lisciviazione. Migliori risultati vengono raggiunti utilizzando come soluzione estraente acqua deionizzata con insufflazione di CO<sub>2</sub>. Ragaglia (2004) e Poletti et al. (2005) hanno dimostrato che sottoponendo le scorie a lavaggio in tale soluzione per 24 e 48 h si possono estrarre circa 7-9

mg/kg di rame, nichel e zinco; tuttavia, l'anidride carbonica ha un effetto mobilizzante sul cromo, il rame e il nichel favorendone la lisciviazione successiva.

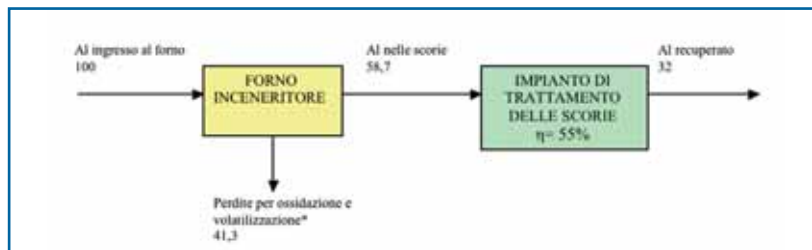
Separazioni chimiche più efficienti possono essere implementate utilizzando al posto di acqua acidi inorganici, inclusi l'acido solforico, nitrico e idroclorico o agenti chelanti.

Generalmente adottando più stadi è possibile raggiungere buone efficienze di estrazione dei metalli pesanti, tuttavia la lisciviazione delle scorie trattate non risente talvolta positivamente dell'incremento del numero di stadi di estrazione. Un miglioramento del comportamento delle ceneri pesanti in questo senso può essere raggiunto facendo seguire alla fase di Ocquo con acqua, in modo da eliminare eventuali residui dell'agente chelante.

#### **Invecchiamento naturale**

L'obiettivo di tale trattamento è di promuovere la formazione di composti minerali a bassa solubilità caratterizzati da un'elevata stabilità termodinamica e geochimica al fine di limitare i processi di lisciviazione.

Le ceneri pesanti vengono stoccate all'aperto su di una superficie impermeabile e vengono lasciate esposte all'aria e alle precipitazioni atmosferiche per un periodo variabile tra i 3 e i 12 mesi, eventualmente irrigate mediante acqua nel caso in cui le precipitazioni atmosferiche non fossero sufficientemente abbondanti. In tal modo le reazioni che si sviluppano dal contatto tra le ceneri e gli agenti atmosferici favoriscono l'alterazione mineralogica del materiale e l'abbassamento del pH tale da ridurre i fenomeni di lisciviazione in fase di recu-



*Figura  
Illustrazione del  
destino dell'alluminio  
alimentato  
ad un impianto  
di incenerimento  
le cui scorie sono  
sottoposte a recupero.*

pero o smaltimento delle scorie (pH da 11-12 a 8-10). Le principali modifiche della composizione, delle caratteristiche geotecniche e della lisciviazione avvengono nei primi cinque mesi, durante i quali si opera l'ossidazione biologica della sostanza organica solubile residua, il dilavamento dei cloruri, la diminuzione del pH e la precipitazione dei carbonati. Molto spesso il processo viene condotto in due stadi: un primo periodo di maturazione che permette di ottenere una significativa riduzione della lisciviazione del piombo seguito da una fase di vagliatura e separazione dei metalli ed un secondo stadio di maturazione che aumenta la stabilità delle scorie (Marchese *et al.*, 2005).

Per rendere più veloce tale processo è possibile ricorrere alla carbonatazione accelerata che prevede l'utilizzo di un flusso di gas ad alta concentrazione di anidride carbonica immesso sul fondo dei cumuli di scorie da trattare oppure in controcor-

rente sopra un sottile strato di scorie distese su un nastro trasportatore. Una soluzione interessante potrebbe essere l'utilizzo diretto dei fumi emessi dall'impianto di



emissioni di anidride carbonica in ambiente (Arickx *et al.*, 2006; Sivula *et al.*, 2008).

**Materiali recuperabili**

I materiali recuperabili dal trattamento delle scorie sono il materiale

granulare inerte e i metalli ferrosi e non ferrosi.

**Recupero dei metalli non ferrosi**

La fusione dei noduli di alluminio estratti dalle scorie avviene in

incenerimento che genera le stesse ceneri pesanti oppure l'utilizzo del biogas, ricco di zolfo e di anidride carbonica, prodotto nelle discariche. Ciò ha il duplice vantaggio di accelerare il processo di invecchiamento riducendo gli spazi adibiti allo stoccaggio e ridurre le

forni salini. Se il materiale alimentato presenta caratteristiche eterogenee, si utilizzano forni di tipo rotativo al cui interno assieme al rottame viene alimentato del fondente, in genere cloruro di sodio, che fondendo ad una temperatura poco più bassa dell'alluminio forma

una crosta, detta salt cake, che circonda il fuso di alluminio riducendone il contatto con l'aria e quindi la sua ossidazione. Inoltre ingloba al suo interno gli ossidi di alluminio presenti ed altri sottoprodotti che si formano nel corso del processo di fusione, come solfuri e nitruri di alluminio.

Mediamente, durante il processo di fu-

sione dei rottami di alluminio, circa il 12% del metallo viene ossidato e circa il 10% viene perso poiché si mescola con le scorie rimosse dalla superficie del metallo fuso. Una parte di questo alluminio viene recuperato dal successivo trattamento delle scorie di fusione. Le perdite nette sono irreversibili e possono raggiungere il 38% se la fusione avviene in fornaci a gas o a gasolio anziché in forni a induzione. La causa principale di tali perdite è la bassa densità dell'alluminio che ne determina il suo galleggiamento per



tempi prolungati sulla superficie dei metalli fusi e ne causa l'elevata ossidazione.

A ciò vanno aggiunte tutte le perdite preliminari legate alle fasi di selezione, che possono raggiungere l'8%.

Recupero dei metalli ferrosi.

La fusione dei rottami ferrosi avviene invece in forni elettrici. I più impiegati sono quelli ad arco, nei quali il calore viene apportato dalla radiazione dell'arco elettrico che si forma tra gli elettrodi di grafite e di bagnò. La temperatura raggiunta è di circa 3.500°C. Meno utilizzati sono i forni ad induzione, nei quali il riscaldamento è prodotto dalla corrente elettrica indotta nel corpo da riscaldare

tramite una bobina induttrice. Questi ultimi vengono utilizzati quando si vuole procedere ad una rifusione. I principali settori industriali che recuperano i rottami di metalli ferrosi sono gli altiforni per la produzione della ghisa, le acciaierie per la produzione dell'acciaio e le fonderie di seconda fusione per la produzione di manufatti in ghisa. La maggiore criticità nel recupero dei rottami ferrosi è la presenza di stagno, che rappresenta un inquinante del processo.

#### Recupero del materiale inerte

Il materiale inerte ottenuto può essere utilizzato per la produzione di cemento e di calce-

struzzo, per la fabbricazione di ceramiche e fibre vetrose e come materiale da riempimento in aree degradate, in pavimentazioni stradali e massicciate ferroviarie.

#### Produzione di cemento

Il materiale inerte ottenuto dal trattamento delle scorie può essere recuperato come materia prima da utilizzarsi per la preparazione della farina cruda alimentata al forno dei cementifici.

Le scorie sono costituite per lo più da silice amorfa, allumina, ossido di ferro e ossido di calcio che possiedono un comportamento pozzolanico e, aggiunte alla farina cruda, partecipano alla creazione della microstrut-

<b>Alluminio (&gt; 60% non ferrosi)</b>		
Contenuto nelle ceneri pesanti		1-2 % in peso
Efficienza di recupero	Tecnologie tradizionali	30 % in peso (Al recuperato/Al ingresso al forno)
		1 % in peso (Al recuperato/scoria)
	Tecnologie avanzate	70 % in peso (Al recuperato/Al ingresso al forno)
<b>Metalli ferrosi</b>		
Contenuto nelle ceneri pesanti		7-15 % in peso
Efficienza di recupero		80 % in peso (ferrosi recuperati/ferrosi ingresso al forno)
		6 % in peso (ferrosi recuperati/scoria)

*Tabella - Percentuali di recupero dell'alluminio e del ferro dalle scorie degli impianti di termovalorizzazione di rifiuti urbani [CiA, 2010].*

tura della matrice cementizia idratata. Inoltre le alte temperature raggiunte nei forni permettono di catturare la maggior parte dei metalli pesanti nel clinker limitandone i processi di rilascio durante l'utilizzo del cemento. Generalmente le scorie vengono utilizzate in sostituzione della marna necessaria per la produzione della farina cruda. Tuttavia, poiché le scorie hanno un contenuto di carbonato di calcio inferiore rispetto a quello della marna, è necessario aggiungere più calcare in modo tale che le caratteristiche del clinker rimangano invariate. I principali problemi che emergono aggiungendo le scorie alla farina cruda sono legati all'ossidazione dell'alluminio in esse contenuto, con produzione di idrogeno che può condurre al degrado della struttura solida del cemento favorendo le infiltrazioni di acqua. Per tale motivo la rimozione dei metalli dagli inerti, prima del loro recupero, dovrebbe essere condotta con elevate efficienze. Un ulteriore problema che è emerso in alcuni cementifici è l'elevata presenza di cloruro che non dovrebbe superare le 100 ppm nel materiale di scarto usato per produrre la farina cruda. Ciò limita la quantità di scorie addizionabili alla farina cruda a piccole percentuali di circa il 3,5% (Pan *et al.*, 2008). Per quanto riguarda la qualità del prodotto ottenuto, non si osservano variazioni rispetto al cemento realizzato senza addizionare le scorie alla farina cruda, né in termini di distribuzione granulometrica, né di resistenza a compressione. Si osserva, invece, il rallentamento della cinetica di idratazione (Quenée *et al.*, 2000) e, di conseguenza, il ritardo del tempo di presa, nonché la produzione di portlandite, ettringite, gesso e anidrite durante la fase di idratazione.

**Produzione di calcestruzzo**

Affinché le scorie possano essere utilizzate per la produzione di calcestruzzo è spesso necessario che siano sottoposte, oltre che alla rimozione dei metalli ferrosi e non ferrosi,

anche a processi di lavaggio per migliorarne le caratteristiche ambientali.

L'utilizzo di scorie e ceneri volanti nella produzione di calcestruzzo è largamente diffuso grazie alla loro composizione e alle proprietà pozzolaniche. Le percentuali di utilizzo delle scorie nel calcestruzzo sono molto variabili: Bertolini *et al.* (2004) indicano quantitativi fino al 30% in peso se le scorie addizionate sono umide.

Il principale problema di tale pratica è legato, ancora una volta, alla presenza di alluminio che deve essere ridotta al minimo per evitare la formazione di idrogeno che può, in fase di utilizzazione, alterare la struttura del calcestruzzo e favorire le infiltrazioni di umidità (Pecqueur *et al.*, 2001; Pera *et al.*, 1997).

Le conseguenze negative legate alla produzione di idrogeno si riducono quando le ceneri vengono spente in acqua ed addizionate al calcestruzzo umide (come slurry).

La reazione dell'alluminio inizia già durante la formazione dello slurry e si esaurisce prima che venga unito al resto del materiale (Bertolini *et al.*, 2004).

**Realizzazione dei sottofondi stradali**

Interessante è il recupero delle scorie nel settore dei sottofondi stradali, a causa delle ingenti quantità di materiali utilizzati in questo campo.

Le scorie, principalmente quelle di granulometria inferiore a 4 mm e superiore a 80 mm, vengono utilizzate come inerte da aggiungere alla miscela di sabbia, bitume ed acqua, per la realizzazione dello strato di collegamento o massetto che

deve garantire un adeguato assorbimento degli sforzi trasmessi, ad esempio, dai carichi ai vari strati del corpo stradale. Tuttavia le scorie devono essere trattate per ridurre gli impatti ambientali legati al loro utilizzo.

Studi effettuati da Bruder-Hubscher *et al.* (2001) non hanno mostrato evidenti variazioni nella qualità del percolato da strade per la cui costruzione sono state utilizzate ceneri pesanti e strade con sottofondo in materiale naturale. In altri casi è stato osservato un certo peggioramento solo per quanto riguarda il piombo (Hartlén *et al.*, 1999), il cromo ed il rame (Aberg *et al.*, 2006).

Per considerare i danni ambientali legati alla lisciviazione dei metalli bisogna tenere conto degli scenari di lungo termine e non solo di quelli di breve periodo. Lind *et al.* (2008) hanno simulato la lisciviazione, su un periodo di 16-80 anni e su di uno di 1.000 anni, che potrebbe derivare dall'utilizzo o di sola ghiaia o di sole scorie per la realizzazione di sottofondi stradali (lisciviazione in laboratorio con rapporto L/S pari a 125) ed hanno osservato che nel breve periodo (16-80 anni) la lisciviazione di rame è decisamente superiore per le scorie piuttosto che per la ghiaia ma in un periodo di 1.000 anni in entrambe le situazioni si eccede il valore di fondo. Contrario è il comportamento dello zinco: nel breve periodo la differenza tra i due scenari è limitata ma nel lungo periodo l'ammontare di zinco lisciviato dalla strada con le scorie è decisamente superiore alla quantità lisciviata dalla strada con la ghiaia.

**BIBLIOGRAFIA**

CiAI, "Separazione e recupero dei metalli e valorizzazione delle scorie di combustione dei rifiuti urbani". A cura del Dipartimento Iiar del Politecnico di Milano (Responsabile scientifico: M. Grosso). Promosso da CiAI con la collaborazione di Federambiente, 2010. Disponibile su [http://www.ciai.it/mail/ciai\\_mail01.html](http://www.ciai.it/mail/ciai_mail01.html)

Tabella - Percentuali di recupero dell'alluminio e del ferro dalle scorie degli impianti di termovalorizzazione di rifiuti urbani [CiAI, 2010].

Figura - Illustrazione del destino dell'alluminio alimentato ad un impianto di incenerimento le cui scorie sono sottoposte a recupero.