

Contributi della mineralogia alla transizione verde sostenibile. Il caso del riciclo delle lane minerali

ALESSANDRO F. GUALTIERI*

Abstract. *In the last decade, sustainable development driven by an environmentally friendly 'green economy' has finally become a priority of the agenda of the European Community. It has finally been realised that the development of social and production dynamics cannot be separated from the proper and sustainable management of waste throughout its entire life cycle. Without this shift of paradigm towards the management of wastes that should no longer be considered as a problem but as a resource, actual transition to green economy cannot be promoted. In the line of this transition, academy and industry work now in synergy to discover ingenious and innovative solutions for the valorisation of waste in the frame of the circular economy. With this premise, the present work illustrates the case of mineral wool, a hazardous waste that can be recycled throughout an innovative «end of waste» process and not dismissed in controlled landfills. The exhausted mineral wool undergoes a thermal treatment and the inert melt can be recycled as secondary raw material for the production of traditional ceramics.*

1. Introduzione

1.1. La transizione verde e l'economia circolare

A livello europeo, nell'ultimo decennio si è affermato il modello dell'economia circolare che promuove la conservazione e il riciclo di un prodotto e tende ad eliminare i rifiuti. Quando un prodotto termina il suo ciclo di vita, può essere trasformato e riportato a nuova vita per creare un ulteriore valore¹.

* Professore ordinario, Dip. di Scienze Chimiche e Geologiche, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Via G. Campi, 103, 41125 Modena; e-mail: alessandro.gualtieri@unimore.it.

¹ European Commission 2014. *Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*, Brussels, pp. 2, 2.7.2014 COM 398 final. [Online]. Retrieved on Feb 10, 2017.

Il modello di economia lineare tradizionale non è più sostenibile dal punto di vista ambientale, sociale ed economico se si considera che l'ambiente naturale si sta rapidamente avvicinando a un punto di svolta in cui viene persa irreversibilmente la capacità di sostenere la biosfera così come la conosciamo². Il modello economico lineare convenzionale, che prevede l'utilizzo di risorse primarie e lo smaltimento in discarica come rifiuto dei prodotti a fine ciclo di vita (Fig. 1) era sostenibile in condizioni di abbondanza di risorse ma ha raggiunto oggi il limite sia in termini di flusso di risorse primarie che di sostentamento socio-economico. L'economia circolare deve prevalere e giocare un ruolo fondamentale per allungare la disponibilità delle risorse rimaste, migliorare in modo permanente l'efficienza dell'economia e consentire un approvvigionamento prolungato per i crescenti bisogni dell'umanità².

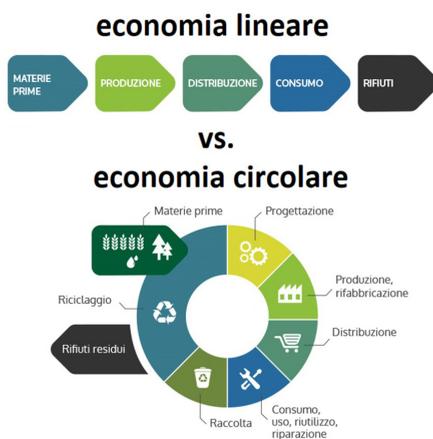


Fig. 1. I modelli di economia lineare e circolare a confronto.

A conclusione di questa premessa è necessario rimarcare il fatto che il modello virtuoso di economia circolare ideale è purtroppo ancora lontano perché come si può notare dalla Fig. 1, parte delle risorse impiegate per la produzione industriale è ancora primaria (materie prime naturali estratte da cave e/o miniere) e una consistente aliquota di prodotto a fine vita viene ancora smaltito come rifiuto residuo in discarica.

² F. Sariatli, *Linear economy versus circular economy: a comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability*, in «Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development», 6(1), 2017, pp. 31-34.

1.2. Il processo «end of waste»

La Commissione Europea ha pubblicato un piano d'azione per l'economia circolare³ che classifica i rifiuti come «materiali» privi di valore e promuove la loro trasformazione in risorse utilizzabili attraverso il riutilizzo o il riciclaggio. Il termine *'End of Waste' (EoW)* identifica un processo di recupero eseguito su un rifiuto, al termine del quale esso perde tale qualifica, per acquisire quella di «prodotto». *EoW* non è quindi il risultato finale bensì il processo che permette ad un rifiuto di tornare a svolgere un ruolo utile come prodotto. Il nuovo prodotto sarà definito come «materia prima secondaria» (o *mps*). Un rifiuto è soggetto all'*EoW* quando viene sottoposto ad un'operazione di recupero e soddisfa criteri specifici (per l'Italia: l'art. 184 ter del D.Lgs 152/06 e ss.mm.ii.): (i) è comunemente utilizzato per scopi specifici; (ii) esiste un mercato o una domanda per tale prodotto secondario; (iii) soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti; (iv) il suo utilizzo non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

Il processo *EoW* richiede una catena di approvvigionamento a ciclo chiuso, in cui la catena di approvvigionamento lineare convenzionale (produttore → consumatore → rifiuti) si combini con quella inversa (consumatore → riciclatore → produttore)⁴. Oggi, nonostante l'opportunità normativa offerta dalla revisione della Direttiva Quadro sui Rifiuti (DQA)⁵, il significato di 'rifiuto' non è ancora stato definito e la sua ambiguità rimane inalterata. Inoltre, le materie prime secondarie, a differenza dei rifiuti, non hanno ancora un ruolo significativo nel quadro normativo poiché non sono state definite nemmeno nella direttiva quadro sui rifiuti.

1.3. Il caso delle lane minerali

La lana minerale (di vetro o di roccia) è uno dei materiali isolanti più comuni ed è ampiamente utilizzata da oltre 60 anni per fornire isolamento termico, acustico e protezione antincendio ad edifici civili e industriali. La

³ *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'A new Circular Economy Action Plan, For a cleaner and more competitive Europe'* (2020), COM/2020/98.

⁴ J. Hoernig, *Towards 'secondary raw material' as a legal category*, in «Environmental Law Review», 24(2), 2022, pp. 111-127.

⁵ K. Govindan, H. Soleimani, D. Kannan, *Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future*, in «European Journal of Operational Research», 240(3), 2015, pp. 603-626.

lana minerale è largamente utilizzata in ambito industriale per i sistemi di condizionamento dell'aria, nelle applicazioni automobilistiche, *off-shore* e marittime e in una serie di prodotti speciali oltre a quelli propri dell'isolamento, come substrati di coltivazione per applicazioni orticole, riempitivi, filtri e tecnologie per la gestione delle acque⁶. La lana minerale è costituita da fibre artificiali vetrose (FAV) contenenti ossidi alcalini e alcalino-terrosi (come Na₂O, K₂O, CaO, MgO e BaO) ottenute dalla fusione di materie prime naturali di varia natura come il basalto⁷. In passato, la lana minerale prodotta conteneva una frazione significativa di fibre respirabili (con larghezza ≤ 3 μm , lunghezza ≥ 5 μm e rapporto lunghezza/larghezza (*aspect ratio*) ≥ 3) che potevano essere bio-persistenti nei polmoni e causare, a seguito di inalazione, patologie a carico dell'apparato respiratorio. Per questa ragione, nel 1988 l'Agencia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha valutato la lana minerale come «possibile cancerogeno»⁸. La ricerca condotta negli ultimi decenni per ridurre il potenziale cancerogeno della lana minerale ha permesso ai produttori di modificarne la composizione chimica e di ottenere nuovi prodotti con dimensioni delle fibre tali da risultare sicuri per salute umana. La IARC ha rivisto il giudizio sulle lane minerali e i «nuovi» prodotti sono stati declassati («*inadequate evidence in humans for the carcinogenicity*»⁹) dal punto di vista della carcinogenicità.

Oggi la lana minerale è classificata secondo il regolamento CLP (Classificazione, etichettatura e imballaggio delle sostanze e delle miscele) n. 1272/2008, che il 1° giugno 2015 ha sostituito completamente le direttive 67/548/CE e 99/45/CE. Nello specifico, le lane di vetro/roccia appartengono alla famiglia delle FAV, conosciute anche come «*man made vitreous fiber*» (MMVF) o «*synthetic vitreous fibers*» (SVF) che, a loro volta, fanno parte del gruppo delle «*man made mineral fibres*» (MMMMF)¹⁰. I criteri classifi-

⁶ Z.S. Yap, N.H.A. Khalid, Z. Haron, A. Mohamed, M.M. Tahir, S. Hasyim, A. Saggaff, *Waste Mineral Wool and Its Opportunities—A Review*, in «Materials», 14(19), 2021, 5777.

⁷ A.F. Gualtieri, E. Foresti, I.G. Lesci, N. Roveri, M. Lassinanti Gualtieri, M. Dondi, M. Zapparoli, *The thermal transformation of Man Made Vitreous Fibers (MMVF) and safe recycling as secondary raw materials (SRM)*, in «Journal of Hazardous Materials», 162(2-3), 2008, pp. 1494-1506.

⁸ IARC, *IARC Man-made Mineral Fibres*.

⁹ IARC, *Man-made Vitreous Fibres*, IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks to humans, 81, 2002.

¹⁰ O. Väntsi, T. Kärki, *Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods*, in «Journal of Material Cycles and Waste Management», 16(1), 2014, pp. 62-72.

cativi delle FAV in termini di cancerogenicità tengono conto del contenuto in ossidi alcalini e alcalino-terrosi, del diametro medio geometrico pesato sulla lunghezza e della biodurabilità della fibra. Secondo i principi previsti nell'Allegato VI del Regolamento (CE) n. 1272/2008, le FAV sono classificate secondo i criteri riportati nella Fig. 2¹¹.

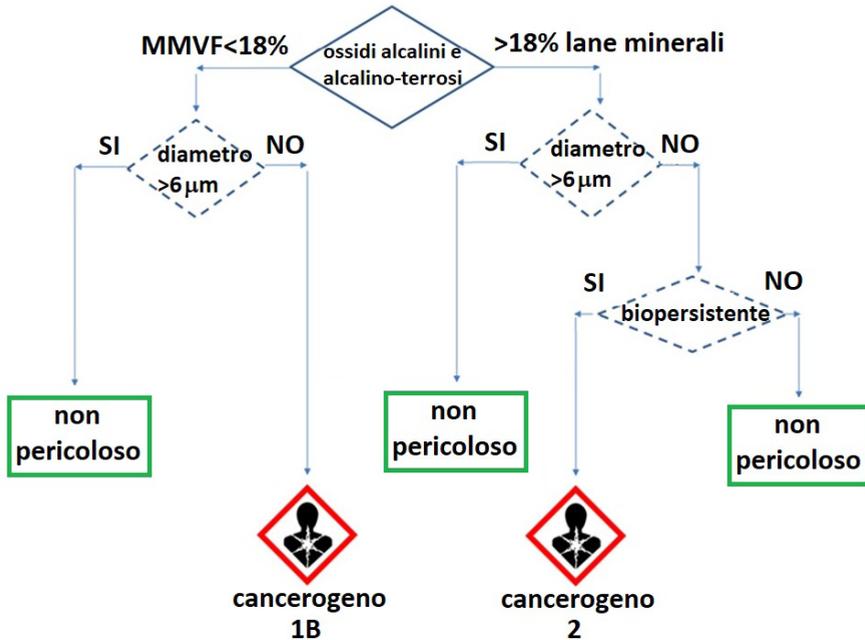


Fig. 2. Classificazione delle lane minerali.

Per quanto riguarda i rifiuti contenenti lana minerale, essi sono il risultato della demolizione di vecchi edifici o di vecchie attrezzature e quindi costituiti da una miscela di “vecchi” e “nuovi” prodotti di lana minerale. Dal punto di vista pratico, non è possibile separare i prodotti “vecchi” da quelli “nuovi” durante le operazioni di rimozione. Pertanto, in molti paesi europei viene applicato il “principio di precauzione” e tutti i rifiuti di lana minerale (“vecchi” e “nuovi”) vengono indistintamente classificati come “possibilmente cancerogeni” e quindi come rifiuti pericolosi. Secondo il catalogo europeo dei rifiuti

¹¹Linee guida per l'applicazione della normativa inerente ai rischi di esposizioni e le misure di prevenzione per la tutela della salute, aggiornamento 2016, 52 pp.

(CER), questa tipologia di rifiuti viene classificata come altri materiali isolanti costituiti o contenenti sostanze pericolose CER 17 06 03*. Allo stato attuale, la destinazione finale di questa tipologia di rifiuti è la discarica controllata autorizzata attraverso una procedura che prevede quattro fasi fondamentali: (1) rimozione: gli operatori procedono alla rimozione dei rifiuti classificati come lana minerale; (2) imballaggio: i rifiuti vengono messi in sicurezza mediante il confezionamento in imballaggi standardizzati; (3) stoccaggio: stazionamento temporaneo presso impianti di stoccaggio per il successivo invio a smaltimento con eventuale processo di ottimizzazione volumetrica mediante pressatura; (4) smaltimento: dismissione in discariche autorizzate.

1.4. Il problema dello smaltimento dei rifiuti pericolosi come le lane minerali

Come anticipato nel paragrafo precedente, oggi lo smaltimento dei rifiuti pericolosi come le lane minerali presuppone come unica soluzione l'interramento in discarica. Facendo tesoro dell'esperienza maturata per rifiuti pericolosi come quelli contenenti amianto e assumendo che le considerazioni fatte sul cemento-amianto valgano anche per la lana minerale, appare evidente come l'interramento in discarica rappresenti oggi una soluzione anacronistica e superata. La discarica presenta infatti una serie di problematiche ambientali ben note, un marcato aumento dei costi di trasporto e gestione ed una penuria in Italia di discariche autorizzate che obbligano gli smaltitori a rivolgersi provvisoriamente all'estero. Entrando nel merito delle problematiche ambientali, applicando i concetti formulati per lo smaltimento in discarica dell'amianto al suo problematico sostituto, la lana minerale, valgono le seguenti considerazioni:

1) L'Italia deve seguire le direttive comunitarie che classificano lo smaltimento in discarica come ultima possibilità, da adottare solo ed esclusivamente quando non esistano altre soluzioni. Infatti, l'art. 4 della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 definisce la seguente gerarchia dei rifiuti da applicare quale ordine di priorità della normativa e della politica in materia di prevenzione e gestione dei rifiuti: a) prevenzione; b) preparazione per il riutilizzo; c) riciclaggio; d) recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia; e) smaltimento. Non seguire le direttive comunitarie significa subire condanne da Strasburgo. La Corte europea di Giustizia ha ben chiarito nella sua sentenza numero c-135/05 del 26 aprile 2007 che: «La Repubblica italiana è venuta meno agli obblighi ad essa incombenti ai sensi della direttiva 75/442, relativa ai rifiuti pericolosi,

della direttiva del Consiglio 26 aprile 1999, 1999/31/CE, relativa alle discariche di rifiuti».

La discarica occupa suolo che in quasi tutti i casi non è più utilizzabile. Il suolo «è un tesoro naturale che deve essere tutelato e preservato per le generazioni future perché è una risorsa limitata: occorrono migliaia di anni per produrre pochi centimetri di questo tappeto magico» ha scritto e deliberato nel 2021 la Commissione di Bruxelles¹² e per questo non può essere vincolato a soluzioni che lo rendono per sempre inutilizzabile. Nel caso dell'amianto c'è l'aggravante che la discarica, concentrando le fibre in un unico luogo, crea dal nulla un «giacimento» antropico di materiale cancerogeno. E non corrisponde al vero l'assunto che la discarica per l'amianto sia una «messa a dimora in luogo sicuro» e che «rimettendo il cemento amianto sotto terra in discarica controllata risulti essere la soluzione migliore in termini ambientali ed economici»¹³. Il concetto che l'amianto, essendo un minerale, debba fisiologicamente ritornare nel suo ambiente naturale, cioè “sotto terra”, è fuorviante perché l'amianto naturale indisturbato non ha nulla a che fare quanto a pericolosità con l'amianto lavorato e macinato dall'uomo presente nelle matrici cementizie o polimeriche.

2) Esiste un problema di dispersione di particelle contaminanti a breve termine. Per le discariche che ospitano il cemento-amianto (ma il concetto si può estendere anche alle lane minerali) è stata osservata una dispersione di fibre di amianto a breve termine. Infatti, nonostante nella discarica i rifiuti pericolosi andrebbero collocati con cura e attenzione, nella pratica di tutti i giorni le confezioni di cemento-amianto vengono danneggiate e frantumate all'atto della messa a dimora, con conseguente rilascio di fibre nell'aria. Il risultato è che fibre di amianto si disperdono nell'ambiente che insiste sulla discarica, come dimostrato qualche anno addietro per la discarica di cemento-amianto di Treviglio (BG) durante una campagna di valutazione dell'impatto sulla qualità dell'aria della dispersione accidentale di fibre condotta qualche anno addietro dall'azienda Servizi Territorio S.r.l. in collaborazione con l'Arpa della Lombardia.

Secondo alcuni il fatto che «i monitoraggi di fibre in aria e nelle acque nei pressi di queste discariche riportino risultati di fibre di amianto aerodisperse

¹² P. Biondani, *Il partito del cemento*, in «L'Espresso», 39, 2022, pp. 74-78.

¹³ Autori vari, *Un vaccino per l'amianto. Un appello di ricercatori, epidemiologi, igienisti e medici del lavoro, ingegneri, chimici, tecnici della Prevenzione e scienziati*, 2022, 12 pp.

prossimi a zero»¹³ è rassicurante. A testimonianza di ciò, si cita il caso della discarica alle porte di Casale Monferrato che accoglie rifiuti contenenti amianto da tutto il comprensorio, rimarcando il fatto che i monitoraggi effettuati da ARPA Piemonte testimoniano un inquinamento da fibre nell'aria vicino alla discarica pari a zero. Nella realtà si tratta di una pericolosa forzatura, dato che il monitoraggio ambientale in discarica prevede l'utilizzo del metodo descritto nell'allegato 2 del D.lgs nr. 36 del 13 gennaio 2003, notoriamente inadatto a rivelare la presenza di fibre in ambiente *outdoor* perché il campionamento dell'aria avviene grazie a pompe a basso flusso (campionamento di bassi volumi di aria) e viene utilizzata la tecnica di analisi di microscopia MOCF, molto meno sensibile rispetto alla microscopia elettronica (SEM) nella rilevazione di fibre di amianto in ambienti *outdoor*¹⁴.

3) Esiste un problema di dispersione di particelle contaminanti a medio-lungo termine (10-15 anni). Per le discariche che ospitano il cemento-amianto è noto il problema della dispersione di fibre di amianto a medio-lungo termine nel percolato di discarica di amianto dato che «le analisi effettuate sui percolati di discarica Barricalla S.p.a. di Torino, hanno accertato la presenza di un numero notevole di fibre di amianto [...]. Tale situazione è imputabile al decadimento strutturale degli imballaggi che contengono i rifiuti [...], causato dall'usura nel tempo e dalle condizioni di degrado che si instaurano nel corpo della discarica a seguito dell'interramento»¹⁵. L'unica soluzione sarebbe quella di captare per sempre il percolato di discarica e di gestirlo come rifiuto pericoloso, nonché di rendere minima la quantità d'acqua meteorica che si infiltra nel sito¹⁶. Purtroppo i metodi di filtrazione generalmente proposti per risolvere il problema della contaminazione di fibre di amianto nel percolato di discarica sono inefficaci. Tra questi, si annovera la filtrazione con filtro a quarzite che però non blocca fibre e/o microfibre di amianto. L'unico metodo efficace è il trattamento del percolato con tecniche innovative come il trattamento con micro-onde creato *ad hoc* nell'ambito del Progetto Europeo

¹⁴ F. Gualtieri, M. Mangano, M. Lassinanti Gualtieri, A. Ricchi, E. Foresti, I.G. Lesci, N. Roveri, M. Mariotti, G. Pecchini, *Ambient monitoring of asbestos in selected Italian living areas*, in «Journal of environmental management», 90(11), 2009, pp. 3540-3552.

¹⁵ F. Paglietti, L. Zamengo, S. Polizzi, M. Giangrasso, G. Fasciani, *Trattamento dei percolati delle discariche per RCA: sperimentazione per una corretta depurazione*, in «L'industria e l'amianto», Atti del Convegno, Roma 26-28 novembre 2002, A. Marabini e P. Plescia Editori, pp. 229-249.

¹⁶ F.G. Bell, *Geologia Ambientale*, Zanichelli, Bologna 2001, 424 pp.

FALL¹⁷ ma che, a conoscenza dello scrivente, non è stato adottato da alcuna discarica controllata per cemento-amianto.

Per tutte le ragioni sopra esposte, l'affermazione fatta da alcuni che «con dati scientifici, le discariche dedicate a ricevere cemento amianto sono tra quelle considerate più sicure perché non inquinano né l'aria né l'acqua»¹⁸ non corrisponde al vero.

4) Esiste un problema di dispersione di particelle contaminanti a lungo termine (>15 anni). Nel lungo periodo nessun sistema di rivestimento, per quanto perfettamente progettato e costruito, è in grado di impedire perdite per filtrazione¹⁹. Uno dei fattori che determina la formazione di discontinuità aperte che possono lasciar passare un lisciviato inalterato per svariati km è la fessurazione, per essiccamento o cedimenti differenziali²⁰. Nel caso del cemento-amianto, periodicamente, le acque meteoriche si infiltrano nell'invaso non più isolato e determinano una lisciviazione continua delle confezioni di cemento-amianto che porta a concentrare fibre nel percolato. La cinetica del processo verosimilmente aumenta nel tempo a causa della progressiva disgregazione della matrice cementizia che determina un maggior rilascio di fibre. Le perdite di percolato dal sistema di contenimento non più isolato possono provocare inquinamento del sistema idrologico superficiale anche in assenza di emergenza della falda. Se sussistono le condizioni idro-geologiche (piano di soggiacenza della falda molto vicino al piano campagna in rocce competenti), è possibile si verifichi l'inquinamento delle falde dato che le particelle contaminanti che entrano nella zona freatica si mischiano e con essa si muovono²¹. La mobilità delle fibre nella falda dipende ovviamente dalla permeabilità e dalla conducibilità idraulica del litotipo ospitante, ma nella letteratura scientifica vengono descritti casi di migrazione delle fibre di amianto in falda che scorrono in rocce cristalline anche a grande distanza dal sito di dispersione²².

¹⁷ Università Ca' Foscari di Venezia, Dip. di Chimica Fisica, Progetto Europeo LIFE03 ENV/IT/000323 Filtering of Asbestos fibres in Leachate from hazardous waste Landfills, FALL, 2003.

¹⁸ *Un vaccino per l'amianto*, cit.

¹⁹ F.G. Bell, *Geologia Ambientale*, cit.

²⁰ D.J. Hagerty, J.L. Pavoni, *Geologic aspects of landfill refuse disposal*, in «Engineering Geology», 7(3), 1973, pp. 219-229.

²¹ F. G. Bell, *Geologia Ambientale*, cit.

²² S. Buzio, G. Pesando, G. M. Zuppi, *Hydrogeological study on the presence of asbestos fibres in water of northern Italy*, in «Water Research», 34(6), 2000, pp. 1817-1822.

Il problema della lisciviazione dei siti di discarica inevitabilmente aumenta nel tempo a causa del deterioramento del telo impermeabilizzante che confina il rifiuto pericoloso e/o a seguito di cedimenti differenziali. Per questa ragione, in paesi come gli Stati Uniti viene imposto un piano di monitoraggio e gestione della discarica dopo la chiusura del sito di 30 anni²³. Purtroppo in Italia nessun progetto di discarica prevede un piano di gestione della discarica a così lungo termine perché il cemento-amianto è considerato erroneamente come inerte e stabile in eterno. Come già accennato nel punto precedente, il piano dovrebbe comprendere la manutenzione del sito con limitazione dell'infiltrazione delle acque meteoriche, raccolta del percolato e trasporto verso il sito di stoccaggio del rifiuto contenente amianto.

2. Una soluzione innovativa per lo smaltimento delle lane minerali alternativa alla discarica

Dal 2018, lo scrivente coordina un progetto per lo smaltimento delle lane minerali pericolose sopra descritte alternativo alla dismissione in discarica. Una ricerca condotta da un partner accademico (il Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Modena), due partner industriali (la Zetadi S.r.l. di Ferno, Varese, e la *Swiss Melting Technologies* di Lugano, Svizzera) ed un ente pubblico di ricerca (l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico CNR-IIA di Monterotondo, Roma) ha permesso di mettere a punto un processo industriale innovativo per l'inertizzazione o *innocuizzazione*, attraverso trasformazione termica, delle lane minerali. La tecnologia più adatta allo scopo è basata su un sistema di fusione con forno fusorio in regime di ossi-combustione, secondo principi tecnologici già ampiamente utilizzati nella produzione di vetri per la ceramica. La soluzione permette di trasformare la lana minerale in materiale vetroso che può essere utilizzato come *mps*. Nel 2012, il sistema è stato brevettato²¹ e, sempre nello stesso anno, la Zetadi S.r.l. ha realizzato un impianto pilota di piccola scala autorizzato nel 2020 dalla Regione Lombardia (Italia) con Decreto n. 12827 (28/10/2020-Atto n. 970) con una capacità produttiva <5 t/giorno e ha avviato una campagna sperimentale per l'ottimizzazione dei parametri di processo. Durante questa fase sperimentale, sono state messe a punto le fasi principali della procedura di trattamento. Le confezioni sigillate

²³ G.F. Lee, A.N.N.E. Jones-Lee, *Dry tomb landfills*, in «MSW Management», 6(1), 1996, pp. 82-89.

di rifiuti isolanti in lana minerale provenienti da attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione sono state fuse all'interno dell'impianto pilota ad una temperatura di circa 1250 °C, utilizzando un forno di fusione a propano, e il materiale fuso è stato raffreddato istantaneamente (*quenching*) in un bagno d'acqua. Il processo prevede l'utilizzo, oltre alle BAT (*best available technologies*) sui rifiuti, anche delle BAT del vetro-produzione fritte. L'impianto di trattamento delle emissioni è composto da: camera di ossidazione termica e DeNO_x; unità di raffreddamento; impianto SNCR con iniezione di soluzione ureica al 32%; impianto di stoccaggio ed iniezione di Ca(OH)₂; reattore verticale di contatto; filtro a maniche. Con tutti questi componenti è possibile abbattere tutti i contaminanti volatili eventualmente prodotti dalla bruciatura delle confezioni di polietilene ed in particolare diossina, IPA, furani, NO_x, SO_x, HCl, HF, CO e polveri.

Il processo di fusione distrugge l'abito cristallino fibroso della lana, che ne determina la pericolosità, e produce un vetro massiccio inerte e non pericoloso, simile all'ossidiana (Fig. 3), con una lucentezza vitrea e una consistenza vescicolare, che viene poi essiccato all'aria e frantumato per ottenere particelle di dimensioni comprese tra 1 e 5 cm. Tale prodotto può essere utilizzato come *mps*, evitando *in toto* il conferimento in discarica delle lane minerali pericolose.

Dal punto di vista mineralogico, il prodotto della fusione è completamente amorfo ai raggi X e chimicamente presenta una composizione media ovviamente confrontabile con quella della lana di roccia vergine (Tab. 1).

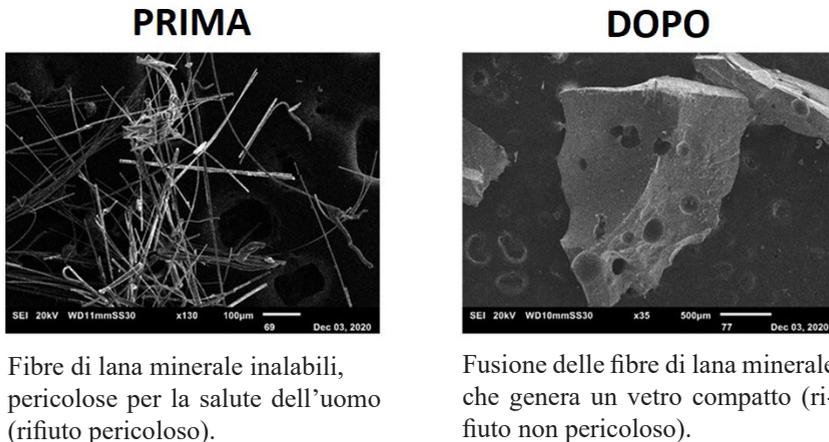


Fig. 3. Immagini SEM di una campione di lana minerale prima e dopo il processo di fusione a 1250 °C.

Considerando l'allegato XVII REACH²⁴, il prodotto di fusione ha le seguenti caratteristiche: non contiene fibre di amianto; non sono presenti solfati di Pb; il Cd è stato individuato in un solo campione ma non è cedibile; il Ni è presente con un valore medio di 274 ppm ma non è cedibile; i composti del Cr esavalente non sono presenti; il Pb è presente, con un valore medio di 26 ppm ma non è cedibile.

Tab. 1. Composizione chimica media del prodotto di fusione delle lane minerali, deviazione standard e confronto con la composizione media di una lana di roccia.

Ossidi	Na O ₂	MgO	Al O _{2 3}	SiO ₂	P O _{2 5}	K O ₂	CaO	TiO ₂	MnO	Fe O _{2 3}
Lana minerale fusa	3.55	10.22	12.88	45.24	0.17	0.73	16.07	1.24	0.23	9.67
Deviazione standard	2.43	2.27	3.60	6.20	0.11	0.13	3.05	0.30	0.06	2.07
Lana roccia	2,06	12,69	15,89	39,32	0,05	0,82	17,92	1,36	0,17	6,80

Nonostante il sensibile recente aumento del costo dei combustibili necessari per il funzionamento dell'impianto, il processo è ancora sostenibile dal punto vista economico con un costo totale di trattamento alla tonnellata del tutto competitivo con l'attuale costo di dismissione in discarica.

3. Il riciclo delle lane minerali inertizzate nelle piastrelle ceramiche di grès porcellanato

3.1. Il grès porcellanato

Il grès porcellanato è il prodotto più importante dell'industria dei ceramici tradizionali, la cui massa estremamente compatta è costituita da una o più fasi cristalline immerse in una matrice vetrosa²⁵. Secondo le norma-

²⁴ Regolamento (UE) 2021/2204 della Commissione Europea del 13 dicembre 2021 che modifica l'allegato XVII del regolamento (CE) n. 1907/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH), per quanto riguarda le sostanze cancerogene, mutagene o tossiche per la riproduzione (CMR).

²⁵ C. Zanelli, M. Raimondo, M. Dondi, M. Guarini, P.M. Tenorio Cavalcante, *Sintering mechanism of porcelain stoneware tiles*. Comunicazione al congresso Qualicer Castellon (SP), 2004.

tive internazionali ISO 13006, questa tipologia di prodotto ricade nel gruppo BIa, che comprende materiali compatti caratterizzati da valori di assorbimento d'acqua (dopo cottura del pezzo ceramico) inferiori allo 0.5%²⁶. Il grès porcellanato possiede indiscusse proprietà sia di carattere tecnologico-meccanico (alto modulo di rottura, resistenza chimica, resistenza alle macchie, resistenza al gelo *et cetera*) che estetico. La formulazione di piastrelle ceramiche di grès porcellanato richiede la miscelazione di almeno quattro componenti fondamentali²⁷: (1) la componente argillosa (soprattutto caolinite ed illite) che garantisce la plasticità necessaria affinché il corpo ceramico possa mantenere la forma e dimensione imposta, conferendo resistenza meccanica ai prodotti durante le fasi di precottura; (2) la componente fondente (feldspati di sodio e potassio) che consente la formazione, ad elevate temperature, di una fase liquida viscosa in grado di densificare il corpo ceramico; (3) la componente con funzione strutturale (principalmente quarzo e sabbie quarzose) che serve a contrastare le deformazioni che si verificano durante l'essiccamento e soprattutto in cottura dei corpi ceramici, costituendo quindi lo scheletro della piastrella; (4) additivi vari che migliorano specifiche proprietà tecnologiche o estetiche, e favoriscono la sinterizzazione/fusione e la colorazione del pezzo ceramico (pigmenti). L'ottenimento dei parametri tecnologici idonei richiesti da un prodotto finito in grès porcellanato si compie in fase di cottura, con la trasformazione delle materie prime in nuove fasi cristalline e fase vetrosa prevalente. Il processo termico ottenibile durante i cicli industriali in forni a rulli (alla temperatura massima di cottura di circa 1240 °C per tempi variabili da 25 a 120 min) determina la sinterizzazione e la gresificazione (fusione) dei pezzi ceramici con compattazione delle particelle e massima riduzione dei pori interni comunicanti attraverso un riarrangiamento microstrutturale di un'abbondante fase viscosa, derivante dalla fusione di feldspati e altri minerali²⁸. Questi processi portano ad un rapido tasso di densificazione, dovuto ad un ritiro lineare del 5-8%, che deve essere tenuto sotto stretto controllo per ottenere le proprietà desiderate dei prodotti finali²⁹.

²⁶ C. Zanelli, S. Conte, C. Molinari, R. Soldati, M. Dondi, *Waste recycling in ceramic tiles: A technological outlook*, in «Resources, Conservation and Recycling», 168, 2021, 105289.

²⁷ M. Dondi, M. Raimondo, C. Zanelli, *Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification*, in «Applied Clay Science», 96, 2014, pp. 91-109.

²⁸ S. Conte, C. Zanelli, M. Ardit, G. Cruciani, M. Dondi, *Phase evolution during reactive sintering by viscous flow: Disclosing the inner workings in porcelain stoneware firing*, in «Journal of the European Ceramic Society», 40(4), 2020, pp. 1738-1752.

²⁹ C. Zanelli, M. Raimondo, M. Dondi, M. Guarini, P.M. Tenorio Cavalcante, *Sintering mechanism of porcelain stoneware tiles*, cit.

3.2. La sperimentazione di riciclo nelle miscele per grès porcellanato

Il prodotto ottenuto di fusione delle lane minerali ha caratteristiche chimiche compatibili con quelle dei fondenti per impasto da grès porcellanato e per questo è stato aggiunto a miscele standard in sostituzione della componente feldspatica per verificare la fattibilità di questa applicazione di riciclo industriale (Tab. 2).

Tab. 2. Composizione delle miscele ceramiche da lastre di grès porcellanato addizionate con il prodotto di fusione delle lane minerali.

Peso %	V0 (standard)	V3	V6	V9
argilla caolinitica-illitica ucraina	35	35	35	35
caolino tedesco	5	5	5	5
feldspato turco	45	42	39	36
sabbia italiana	3	3	3	3
sabbia italiana 2	12	12	12	12
mps	0	3	6	9
totale (%)	100	100	100	100

La preparazione dei provini ceramici ha seguito le consolidate procedure di laboratorio per la preparazione di prodotti ceramici tradizionali ed è stata interamente condotta presso l'ISTEC-CNR di Faenza³⁰. La simulazione del processo industriale a scala di laboratorio deve rispecchiare le procedure collaudate dalle aziende ceramiche in modo tale da ottenere dati confrontabili con quelli industriali. Il protocollo di preparazione di prodotti ceramici ha quindi previsto i seguenti passaggi: preparazione delle materie prime; pesate degli impasti secondo le rispettive formulazioni; macinazione ad umido degli impasti; essiccamento delle barbotine (miscele materie prime, acqua e fluidificante) ottenute; umidificazione delle polveri, granulazione e stagionatura; formatura (pressatura) dei provini ceramici; essiccamento dei provini crudi; cottura a temperatura controllata dei campioni. I prototipi di piastrelle secche crude sono stati sottoposti a cicli di cottura con temperature massime differenti (T_{max} da 1160 a 1240 °C), in modo da seguire l'evoluzione delle proprietà

³⁰ M. De Iuliis, *Recupero di materiale derivante dall'inertizzazione di fibre artificiali vetrose (FAV) come materia prima seconda nella produzione di piastrelle in grès porcellanato*. Tesi di Laurea Magistrale in "Geoscienze, Georischi e Georisorse", Università di Modena e Reggio Emilia, 2021.

tecnologiche dei provini al variare della temperatura, da uno stadio di sinterizzazione non completa, fino ad uno stadio di sovra-cottura³¹.

4. Risultati e Discussione

Per simulare il processo di cottura del grès porcellanato, sono stati definiti cinque differenti cicli termici, caratterizzati da temperature massime diverse ma tutti della durata complessiva di 62 min³². L'impasto V0 è stato cotto con cicli alla temperatura massima di 1180, 1200, 1220 e 1240 °C, mentre gli impasti V3, V6 e V9 sono stati cotti con cicli che hanno raggiunto 1160, 1180, 1200 e 1220 °C, rispettivamente. I provini cotti alle diverse temperature sono stati caratterizzati attraverso la determinazione dei seguenti parametri tecnologici:

- ritiro lineare (%): misura la variazione lineare della lunghezza del provino ceramico dopo la cottura ed è indicativo del grado di gresificazione (fusione o densificazione) del prodotto, con valori generalmente compresi tra 4 e 8%. Maggiore è il ritiro ceramico, maggiore il grado di gresificazione;
- assorbimento d'acqua (%): misura la quantità di acqua assorbita dal provino ceramico dopo la cottura, con valori generalmente inferiori a 0,5% per gli standard di produzione³³. è inversamente proporzionale al ritiro ceramico: minore è l'assorbimento d'acqua, maggiore il grado di gresificazione;
- resistenza a flessione o modulo di Rottura (N/mm²): misura la resistenza meccanica alla flessione del provino ceramico dopo la cottura. è proporzionale al ritiro ceramico e inversamente proporzionale all'assorbimento in acqua.

I dati tecnologici raccolti³⁴ hanno permesso di osservare che la temperatura di massima densificazione individuata per i prodotti cotti è differente a seconda

³¹ M. De Iuliis, *Recupero di materiale derivante dall'inertizzazione di fibre artificiali vetrose (FAV) come materia prima seconda nella produzione di piastrelle in grès porcellanato*, cit.

³² *Ibidem*.

³³ G. Biffi, *Il grès porcellanato*, cit.

³⁴ M. De Iuliis, *Recupero di materiale derivante dall'inertizzazione di fibre artificiali vetrose (FAV)*, cit.

dell'impasto considerato (1220 °C per il V0 senza *mps* e 1200 °C per V3, V6 e V9, addizionati di *mps*). Mentre per V6 e V9 questa temperatura corrisponde al minore assorbimento d'acqua (Fig. 4a), il V3 alla stessa temperatura non raggiunge l'assorbimento idoneo che si attesta all'1.14%. L'impasto V3 necessita di una cottura a 1220 °C per raggiungere assorbimento zero. Allo stesso modo, l'impasto V0 alla densificazione massima di 1220 °C presenta un assorbimento d'acqua dello 0.61% e deve essere cotto a 1240 °C per raggiungere assorbimento zero. La temperatura di gresificazione, ovvero la temperatura corrispondente ad un buon valore di densità apparente (valori misurati ma non riportati di 2.3-2.4 gr/cm³) è più bassa negli impasti contenenti la *mps*. Nello specifico, gli impasti contenenti le maggiori concentrazioni di *mps* (6 e 9%) hanno una corretta temperatura di cottura di 40 °C inferiore rispetto al *benchmark* V0. La Figura 4(a) riporta inoltre i valori di ritiro e permette di verificare la stabilità degli impasti una volta raggiunta la temperatura massima di cottura. Nel caso dei campioni V6 e V9 il ritiro ceramico diminuisce vistosamente una volta raggiunto l'assorbimento idoneo (cioè alla T_{\max} di 1220 °C) a causa apparentemente di un fenomeno di sovra-cottura degli impasti che ne determina un'espansione per il rigonfiamento dei pori interni. Invece, gli impasti V0 e V3 sono caratterizzati da una buona stabilità alle alte temperature. Per quanto riguarda i valori relativi alla resistenza alla flessione (Fig. 4b), si osserva un progressivo incremento all'aumentare della temperatura massima di cottura, raggiungendo i valori più alti per ogni impasto in corrispondenza della relativa temperatura di gresificazione. A parità di temperatura, gli impasti contenenti maggiori percentuali di scarto hanno ottenuto valori più alti di resistenza a flessione.

Per quanto riguarda il colore dei provini cotti, esso è stato definito attraverso le coordinate L^* a^* b^* del sistema CIE Lab³⁵ misurate utilizzando un colorimetro portatile. Le coordinate colorimetriche secondo lo standard internazionale CIE Lab L^* , a^* , b^* corrispondono a: L^* = 100 bianco, 0 nero; a^* = + rosso, - verde; b^* = + giallo, - blu. Idealmente, un provino perfettamente bianco ha coordinate L^* = 100; a^* = b^* = 0. I risultati riportati nella Fig. 5 rivelano una diminuzione progressiva del parametro L^* , valore di bianco del prodotto cotto, all'aumentare della *mps* aggiunta, rendendo di conseguenza i prodotti contenenti *mps* più scuri. Il valore di L^* raggiunge un minimo di 56,67 nell'impasto V9 alla sua temperatura di gresificazione, un valore nettamente inferiore rispetto al valore di 74,13 dell'impasto *benchmark* V0 cotto a 1240 °C.

³⁵A.R. Robertson, *Colorimetry*, in «Reports on progress in physics», 41(4), 1978, pp. 469-510.

Riassumendo, è possibile affermare che:

1. l'introduzione della *m_{ps}* ha permesso l'abbassamento della temperatura di gresificazione dell'impasto;
2. i provini con la *m_{ps}* mantengono buoni livelli di densificazione e migliorano le principali caratteristiche tecnologiche;
3. si dimostra una tendenza degli impasti contenenti *m_{ps}* a mostrare una bassa stabilità alle temperature più alte (la finestra di gresificazione tende a restringersi all'aumentare della *m_{ps}*) con possibili fenomeni di rigonfiamento per sovra-fusione;
4. l'unico parametro relativo ai prodotti cotti che risulta decisamente peggiorato è il colore. Il peggioramento delle caratteristiche estetiche dei cotti suggerisce una percentuale di aggiunta $\max \leq 3\%$.

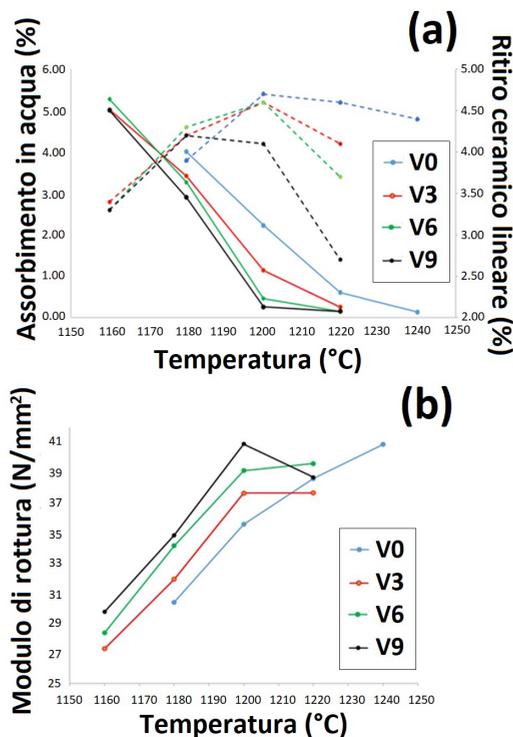


Fig. 4. Assorbimento in acqua (%), ritiro ceramico (%) (a) e modulo di rottura (N/mm²) (b) dei provini cotti a temperature massime comprese tra 1160 e 1240 °C per 62 min.

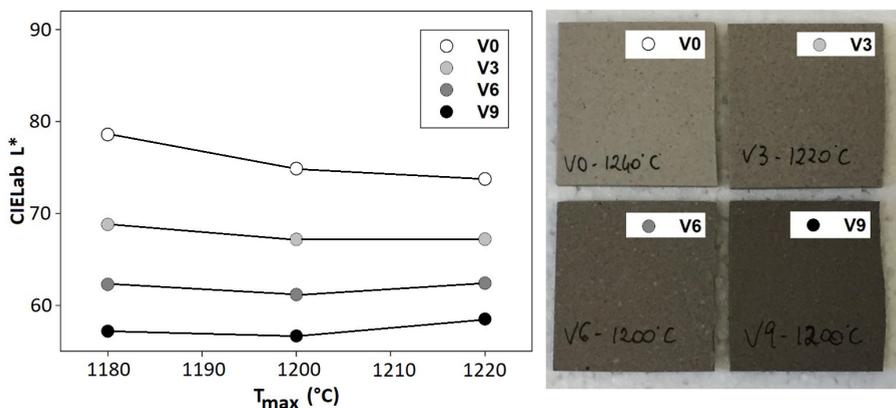


Fig. 5. Parametro di colore L dei provini cotti a temperature massime comprese tra 1180 e 1220 °C per 62 min ed aspetto dei provini cotti alle massime temperature di gresificazione.

5. Conclusioni e prospettive future

In questo lavoro è stato descritto il riciclaggio di una materia prima secondaria (*mps*), il prodotto di trasformazione termica delle lane minerali, all'interno di impasti ceramici da grès porcellanato. La lana minerale è oggi un rifiuto pericoloso destinato alla discarica e la possibilità di ottenere una *mps* per la produzione ceramica, attraverso un processo (*end of waste*) innovativo, è perfettamente in linea con le direttive comunitarie che, nel solco dell'economia circolare, puntano ad arricchire le capacità di sviluppo e di conoscenza di potenziali produzioni eco-sostenibili su scala industriale.

Ora più che mai è necessario superare i paradigmi produttivi di un'insostenibile economia lineare, abbandonando la soluzione della discarica e promuovendo concretamente impianti industriali che permettano la conversione di rifiuti in risorse secondarie da utilizzare al posto delle materie prime naturali. Nel settore dei ceramici tradizionali, le crescenti difficoltà nell'approvvigionamento di materie prime naturali, amplificate dalla guerra in Ucraina che rende oggi praticamente impossibile il rifornimento delle argille dal Donbass per il distretto ceramico sassolese, potrebbero essere mitigate da un uso crescente di *mps* negli impasti. Se da una parte la "migrazione" ad un modello di processo sostenibile può essere spinta da una sensibile riduzione dei costi, dall'altra essa non può essere attuata senza una riduzione degli altissimi parametri tecnologici ed estetici imposti attualmente dal mercato.

Nel caso specifico descritto in questo lavoro, la sperimentazione condotta ha mostrato che, grazie all'aggiunta di questa *mps* negli impasti da grès

porcellanato, alcuni parametri tecnologici (densificazione e modulo di rottura) sono addirittura migliorati. Tuttavia, è stata osservata una tendenza degli impasti a palesare una bassa stabilità alle temperature più alte nonché un deciso peggioramento del colore del prodotto finito all'aumentare della quantità di *mps* aggiunta. Per queste ragioni, si ipotizza una quantità massima di *mps* da aggiungere all'impasto del 3%. Questo valore è compatibile con i parametri di produttività (ca. 6000 t/anno) del futuro impianto industriale di trattamento termico delle lane minerali che dovrebbe sorgere a Ferno (VA) entro il 2024. Un'attenta analisi dei parametri di processo ha inoltre evidenziato la necessità in futuro di stoccare consistenti quantità di prodotto trasformato al fine di rendere più omogenea la composizione chimica della *mps* in uscita dall'impianto.

Ringraziamenti

Il progetto descritto in questo lavoro è finanziato e coordinato dalla Zetadi S.r.l. di Ferno (Varese) nelle persone di Cinzia Cavenati e Ivano Zanatto che da quasi un ventennio promuovono con mai sopito entusiasmo e passione attività progettuali nel campo del riciclo di rifiuti pericolosi trasformati termicamente. Lo studio dell'applicazione della *mps* negli impasti ceramici è stato coordinato dalla prof.ssa Rossella Arletti del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia in collaborazione con la Dott.ssa Sonia Conte dell'ISTEC-CNR di Faenza. Entrambe, in qualità di Relatrici, hanno guidato le attività sperimentali del progetto di tesi di Laurea Magistrale di M. De Iuliis in "Geoscienze, Georischi e Georisorse" dell'Università di Modena e Reggio Emilia.

