

ANALISI QUALITATIVA E QUANTITATIVA DELLA GESTIONE DEI RIFIUTI DI LANA DI ROCCIA

Piera Policaro^{1*}, Federica Carollo¹, Lucia Rigamonti¹

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – sezione Ambientale, Milano.

Sommario – La lana di roccia è un materiale isolante di recente introduzione le cui caratteristiche lo rendono idoneo a soddisfare le più recenti imposizioni normative in termini di isolamento termico, isolamento acustico e protezione dal fuoco. L'utilizzo di questo materiale si è notevolmente intensificato negli ultimi anni ed è stimato che questo trend si manterrà costante anche nei prossimi decenni con la conseguente crescita delle quantità di rifiuti prodotte. In Europa, in particolare nella zona EU28, è stato stimato, in totale, che nel periodo di tempo che va dal 2033 al 2050 vi sarà un incremento della produzione dei rifiuti di lana di roccia pari al 19,0% con un incremento medio dell'1,1% ogni anno. Capire cosa sia la lana di roccia e quale sia il suo destino finale, una volta persa la sua qualifica come prodotto, può permettere di valutare in maniera oggettiva in che modo una crescita sempre maggiore della produzione di rifiuti potrà portare delle complicazioni nel già oberato sistema di gestione dei rifiuti italiano. I rifiuti di lana di roccia fanno parte della macro-categoria dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW) e, in particolare, rientrano nei flussi individuati dai codici CER 17 06 03* (materiali isolanti contenenti o costituiti da sostanze pericolose) e 17 06 04 (materiali isolanti diversi da quelli di cui alle voci 17 06 01 e 17 06 03). Poiché i materiali contenenti sostanze pericolose non possono essere considerati se si vuole fare un'analisi sulle possibilità di riciclo/recupero/riuso dei rifiuti, sono stati qui considerati i soli materiali non contenenti o costituiti da sostanze pericolose, cioè quelli identificati dal codice CER 17 06 04. Si è inoltre considerato il fatto che, oltre ai rifiuti provenienti dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione, una quota significativa di rifiuti di lana di roccia proviene dagli impianti di produzione.

Parole chiave: lana di roccia, gestione rifiuti, riciclo, smaltimento, rifiuti da costruzione e demolizione.

QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF ROCK WOOL WASTE MANAGEMENT

Abstract – Rock (stone) wool is a newly introduced insulating material whose characteristics make it suitable for the latest regulatory requirements in terms of thermal and acoustic insulation other than fire protection. The use of this material has intensified considerably in recent years and it is estimated that this trend will remain constant in the coming decades with the consequent increase in the amount of waste

produced. In Europe, in particular in the EU28 zone, it has been estimated that in the period of time from 2033 to 2050 there will be an increase in the production of rock wool waste equal to 19.0% with an average annual increase of 1.1%. Understanding what rock wool is and what its final destiny is, once it has lost its status as a product, can allow evaluating objectively how, increasing growth in the production of wastes, may bring complications into the already overburdened Italian waste management system. Rock wool waste is part of the macro-group of construction and demolition waste (C&DW) and, in particular, is part of the flows identified in the European waste catalogue by the codes 17 06 03* (insulating materials containing or consisting of hazardous substances) and 17 06 04 (insulating materials other than those mentioned in 17 06 01 and 17 06 03). Since materials containing hazardous substances cannot be considered if an analysis of the possibilities of recycling/recovery/reuse of the waste has to be made, only the waste not containing or consisting of dangerous substances, i.e. those identified by code 17 06 04, have been considered here. Moreover, the analyses considered that, in addition to the waste from construction, demolition and renovation activities, a significant proportion of the rock wool waste come from the production plants.

Keywords: rock wool, waste management, recycling, disposal, construction and demolition waste.

Ricevuto il 3-6-2020; Correzioni richieste il 21-7-2020; Accettazione finale il 10-9-2020.

1. INTRODUZIONE

La lana di roccia è un isolante termo-acustico classificato tra le lane minerali che a loro volta appartengono alla più ampia categoria delle Fibre Artificiali Vetrose (FAV). Le FAV vengono prodotte seguendo svariati processi, tutti basati sulla lavorazione di un sottile flusso di materiale fuso ad alte temperature. Generalmente, le FAV sono a base di silice e contengono varie quantità di ossidi inorganici. I componenti non silicei includono ossidi di terre alcaline, alcali, alluminio, boro, ferro e zirconio. Questi ossidi possono essere introdotti nel processo produttivo sia come materie prime per la produzione delle fibre, ma anche come additivi allo scopo di rendere il processo produttivo più performante o migliorare la qualità del prodotto finale (IARC, 2002).

* Per contatti: Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano. Tel. 02.23996415. E-mail: piera.policaro@mail.polimi.it.

1.1. Proprietà chimiche e fisiche delle FAV

A seconda del processo di formazione delle fibre, le FAV possono essere classificate come *lana*, cioè una massa di fibre aggrovigliate e discontinue di lunghezze e diametri variabili, o come *filamenti*, cioè fibre continue di lunghezza indeterminata con diametri più uniformi e tipicamente maggiori rispetto alle lane. I diametri di una lana seguono, approssimativamente, una distribuzione log-normale con un diametro medio tra 3 e 10 μm (IARC, 2002). Tuttavia, durante alcuni processi di produzione delle lane si può avere la formazione di un numero considerevole di particelle grandi e arrotondate con un diametro maggiore o uguale a 60 μm (TIMA, 1993).

Le FAV presentano una struttura non cristallina ma vetrosa o amorfa. Per tale motivo, la rottura delle stesse avviene trasversalmente, lungo il corpo della fibra, con la tipica frattura concoide con il risultato di avere fibre con lo stesso diametro ma più corte. Non presentano, invece, piani di scissione che permettano la rottura longitudinale in modo da ottenere fibre di uguale lunghezza ma con diametri più piccoli (Assuncao & Corn, 1975).

Le FAV presentano una composizione chimica molto variabile in base alla tipologia di fibra. Tra gli elementi che compongono le FAV quelli che rivestono un ruolo fondamentale sono gli ossidi alcalini (Na_2O , K_2O) e alcalino/terrosi (CaO , MgO , BaO). Tali elementi, infatti, se presenti in elevate concentrazioni sono indice di biosolubilità, e quindi non pericolosità, delle fibre stesse. La biosolubilità è, infatti, legata alla capacità che ha l'organismo di smaltire le sostanze prima che diano vita a fenomeni di biopersistenza.

1.2. Proprietà termofisiche della lana di roccia

Gli isolanti, in base alla loro composizione, possono essere organici o inorganici, classificati a loro volta in funzione dell'origine naturale o sintetica. La lana di roccia è un isolante inorganico di origine sintetica.

Oltre alla distinzione per composizione e origine, i vari materiali isolanti si possono distinguere anche in funzione delle loro proprietà termofisiche. In base alle differenti proprietà che possiede ciascun isolante quest'ultimo potrà essere utilizzato per diversi scopi specifici. Per poter confrontare i vari materiali isolanti si considerano diverse grandezze, tra cui la conducibilità termica λ [W/mK], la densità [kg/m^3], il fattore di resistenza alla diffusione

del vapore acqueo [-], la resistenza meccanica a compressione al 10% σ_{10} [kPa], la resistenza al fuoco e l'isolamento acustico.

1.3. Pericolosità delle lane minerali

Il Regolamento (CE) n.1272/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele, più comunemente indicato come Regolamento CLP (Classification, Labelling and Packaging), stabilisce che i parametri che è necessario valutare per determinare la pericolosità di una lana minerale sono il contenuto percentuale in massa di ossidi alcalini e alcalino/terrosi, la bio-solubilità e il diametro geometrico medio pesato rispetto alla lunghezza.

Da quanto riportato nel Regolamento CLP si può dedurre uno schema di flusso (Figura 1) che è necessario seguire per poter stabilire se una lana minerale possa essere classificata come pericolosa e se quindi sia necessario prevedere degli accorgimenti allo scopo di tutelare la salute umana. Quando si considera una qualsiasi lana minerale la prima cosa da verificare è il contenuto percentuale di ossidi alcalini e alcalino/terrosi. In gene-

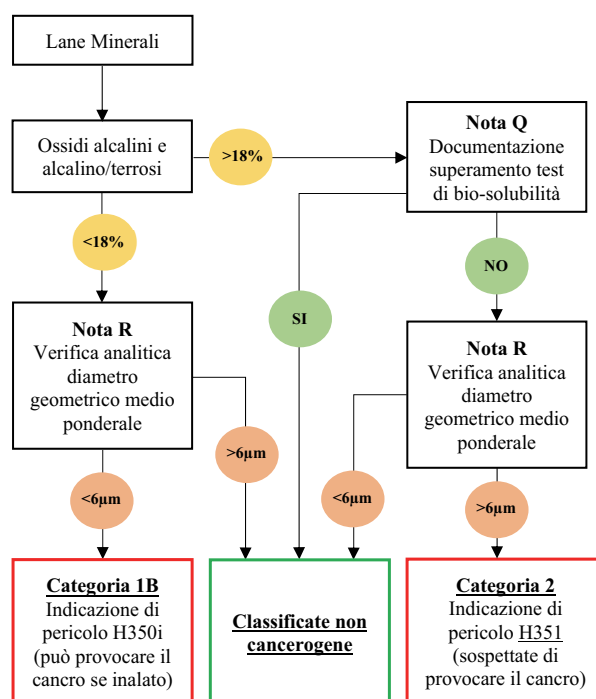


Figura 1 – Schema per la classificazione delle lane minerali pericolose ai sensi del Regolamento CLP (F.I.V.R.A., 2016)

rale, si può dire che una lana minerale può essere considerata non cancerogena solo nei seguenti casi:

- ha un contenuto di ossidi alcalini e alcalino/terrosi inferiore al 18% ed è verificata la Nota R (il diametro geometrico pesato rispetto alla lunghezza deve essere superiore a 6 μm);
- ha un contenuto di ossidi alcalini e alcalino/terrosi superiore al 18% e viene verificata la Nota Q (è verificata la bio-solubilità delle fibre tramite dei test);
- ha un contenuto di ossidi alcalini e alcalino/terrosi superiore al 18%, non verifica la Nota Q ma verifica la Nota R.

1.4. Produzione della lana di roccia

La lana di roccia viene prodotta in appositi impianti dedicati. Il processo produttivo può essere diviso in 6 fasi principali (Figura 2) alle quali si aggiungono una serie di fasi accessorie (Gamma Meccanica, 2020).

La prima tra le fasi principali è l'alimentazione delle materie prime (1). La lana di roccia è un silicato amorfo, composto principalmente da basalto, anfibolite, diabase, dolomite e lana di roccia riciclata proveniente dalla linea di produzione. Nella produzione della lana di roccia deve essere utilizzato un mix di materie prime adeguato e bilanciato (*ricetta*) allo scopo di ottenere una miscela finale che abbia una composizione chimica adatta per avere una lava "fibrabile" cioè che abbia determinate caratteristiche di viscosità ed acidità

dentro un range di temperatura definito. La composizione della miscela può variare a seconda del produttore e del tipo di lana di roccia che si vuole produrre.

I materiali vengono quindi convogliati in un forno di fusione (2) e qui fusi a una temperatura compresa tra i 1500°C e i 1600°C. Esistono tre tipologie di forno di fusione utilizzabili per la produzione della lana di roccia che si distinguono in base alla fonte energetica utilizzata per la fusione: forno di fusione a coke (cubilotto), forno di fusione elettrico e forno di fusione a gas. Il cubilotto rappresenta la soluzione più tradizionale e meno costosa per la fusione dei materiali in termini di spesa per la realizzazione dell'impianto. Il forno di fusione elettrico è la soluzione più moderna: la fusione avviene sfruttando come fonte di energia quella elettrica che viene generata da elettrodi immersi nel bagno fuso. Il processo risulta molto efficiente grazie alla possibilità di variare la temperatura tramite la modulazione della frequenza dell'energia elettrica applicata agli elettrodi. Il forno di fusione a gas è un tipico forno a bacino/a volta. Si tratta di forni realizzati con materiali refrattari pregiati e per questo motivo vengono utilizzati solo negli impianti che producono limitate quantità di lana di roccia (praticamente assenti in Europa). Poiché la capacità di produzione del forno è direttamente proporzionale alle sue dimensioni, l'investimento iniziale necessario per l'installazione di questo tipo di forno in impianti con capacità di produzione maggiori sarebbe troppo elevato.

1. Alimentazione della materia prima;
2. Fusione;
3. Fibraggio;
4. Formatura;
5. Polimerizzazione;
6. Taglio, confezionamento e immagazzinamento.

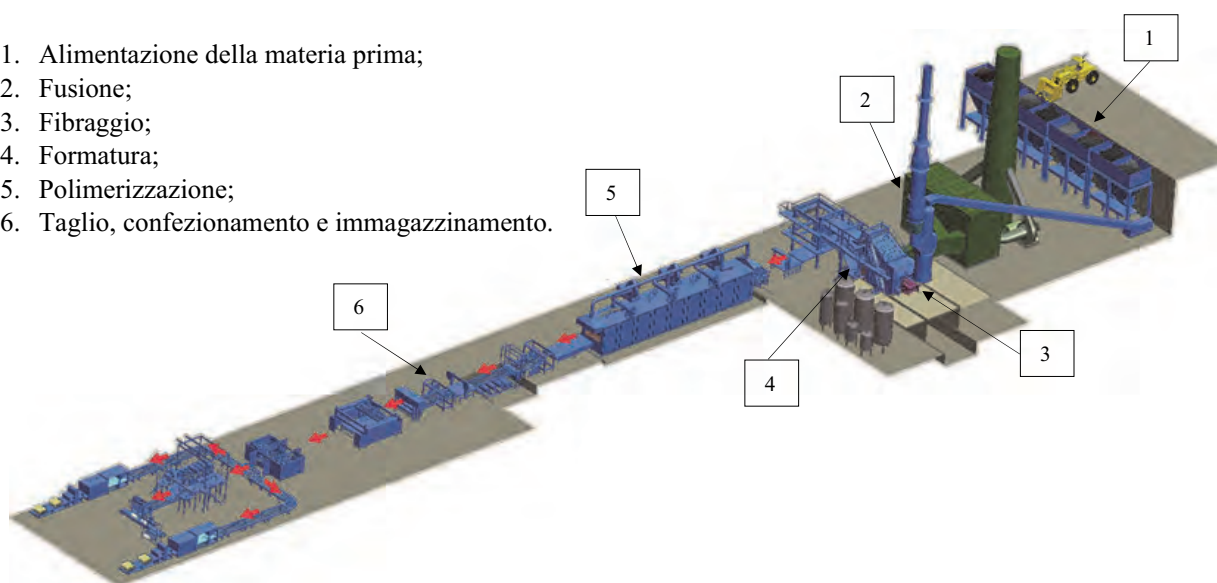


Figura 2 – Schema di un impianto di produzione di lana di roccia (Gamma Meccanica, 2020)

Il materiale fuso viene inviato alla fase successiva di fibraggio (3), in cui il materiale fuso stesso viene trasformato in fibre. Per il fibraggio del materiale fuso si utilizzano le *centrifughe* che nel caso della lana di roccia sono macchine ad asse orizzontale dotate di più dischi (in funzione della produzione richiesta per l'impianto). I dischi ruotano a una velocità di circa 7000 giri/min e grazie alla forza centrifuga che il materiale fuso subisce passandoci attraverso viene trasformato in fibre. Durante questa fase dell'aria ad alta velocità viene insufflata perpendicolarmente ai dischi attraverso delle fessure circolari ed è questa che permette la produzione di milioni di fibre al secondo. A causa del movimento, un filamento di materiale fuso si stacca verticalmente dalla superficie andando a formare la fibra (Širok et al., 2014). La lunghezza delle fibre, che determina la qualità del materiale finale, è strettamente legata all'efficienza con cui avviene la fase di insufflazione d'aria.

Per favorire l'aderenza tra le fibre così formate, in questa fase, vengono aggiunti dei leganti, tipicamente resine termoindurenti (come le resine fenoliche) che, quindi, a contatto con un flusso di aria calda, solidificano. La percentuale di legante utilizzato varia in base al produttore e al destino finale del materiale, ma generalmente si aggira tra l'1 e il 4%. Le fibre in uscita dalla centrifuga vengono inviate alla *camera di formazione* (4), che è una macchina che ha il compito di raccogliere le fibre e formare il cosiddetto *feltro primario*. In questa fase, le fibre convogliate su un nastro trasportatore vengono inviate a un tamburo (o triangolo) rotante che permette la formazione del feltro. La camera di formazione è costantemente mantenuta in depressione per facilitare il posizionamento delle fibre prodotte dalla centrifuga sulle lamelle forate mobili di cui è provvista la camera di formazione. Successivamente un coltello ad aria separa il feltro prodotto dal tamburo che, tramite un nastro trasportatore, viene inviato al pendolo il cui compito è quello di deporre il feltro appena formato da un lato all'altro di un secondo nastro trasportatore creando una serie di strati il cui numero dipende dalla densità e lo spessore desiderato per il prodotto finale.

La fase successiva è quella di polimerizzazione (5). Il forno di polimerizzazione viene utilizzato allo scopo di polimerizzare i leganti introdotti nella fase di fibraggio, tramite l'insufflazione di aria calda. Raggiunta una certa temperatura, si sviluppano le reazioni chimiche di reticolazione che per-

mettono la solidificazione delle resine. Durante queste reazioni si creano dei legami forti (covalenti o ionici) tra le catene polimeriche che costituiscono le resine. Questo processo conferisce alla lana di roccia le proprietà di resistenza meccanica necessarie a questo materiale per le sue applicazioni.

In uscita dal forno di polimerizzazione si ha il materiale finito che, dopo raffreddamento, viene tagliato e confezionato (6) in attesa della distribuzione.

1.5. Applicazioni

Le particolari caratteristiche della lana di roccia la rendono un materiale utilizzabile in molteplici campi, a partire dall'edilizia fino agli elettrodomestici. La lana di roccia viene utilizzata principalmente in:

- Edilizia civile e industriale: è sicuramente il campo in cui la lana di roccia trova maggiori applicazioni. Viene utilizzata per l'isolamento delle chiusure verticali e orizzontali, dei controsoffitti e delle partizioni interne.
 - Processi industriali: la lana di roccia viene utilizzata per l'isolamento di tubazioni, serbatoi, colonne di distillazione, vessel, ciminiera, caldaie e impianti criogenici. La temperatura riveste un ruolo fondamentale in tutti i processi industriali e un buon isolamento termico permette di migliorare l'efficienza di tali processi.
 - Elettrodomestici: le aziende produttrici di elettrodomestici utilizzano la lana di roccia per il rivestimento dei forni allo scopo di limitare la dispersione di calore e massimizzare l'efficienza energetica di questi dispositivi. Allo scopo di garantire una buona coibentazione di questo elettrodomestico è necessario che l'isolante utilizzato sia stabile a temperature molto elevate, in modo da non rilasciare sostanze che possano risultare pericolose se presenti in un ambiente in cui possano entrare in contatto con gli alimenti. Inoltre, è fondamentale che l'isolante abbia una buona reazione al fuoco, in modo da limitare il rischio di diffusione delle fiamme in caso d'incendio.
- La lana di roccia viene utilizzata, inoltre, come isolante per i frigoriferi. In questo caso è però fondamentale che l'isolante impedisca al calore di penetrare all'interno dell'elettrodomestico vanificando il processo di raffreddamento.
- Agricoltura: la lana di roccia viene utilizzata anche in agricoltura nella cosiddetta coltura idro-

ponica. Questo tipo di coltivazione non prevede l'utilizzo di terriccio per la crescita delle piante, che invece vengono sistemate in cubetti di lana di roccia. Le sostanze nutritive necessarie vengono aggiunte all'acqua fornita. Il vantaggio di questo tipo di coltivazione è che la quantità di acqua necessaria per lo sviluppo della pianta è molto minore rispetto a quella utilizzata per le coltivazioni nel suolo. Inoltre, poiché l'utilizzo di fertilizzanti è specifico per la pianta, non vi sono dispersioni. L'unico inconveniente è che spesso il pH di questo isolante è leggermente basico, per cui prima di utilizzarlo è necessario realizzare un lavaggio in acqua a pH neutro.

2. STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE FUTURE SUL RICICLO DEI RIFIUTI DI LANA DI ROCCIA

2.1. Caratteristiche e origine dei rifiuti di lana di roccia

I rifiuti di lana di roccia fanno parte della più ampia categoria dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW) e come tali sono classificati tra i rifiuti speciali dalla normativa italiana (D.Lgs. n.152/06, all'art.184, comma 3, lettera b). Ai sensi della Decisione della Commissione Europea 2000/532/CE, i C&DW vengono classificati nel Catalogo Europeo dei Rifiuti (CER) al capitolo 17 "Rifiuti delle operazioni di costruzione e demolizione compreso il terreno proveniente da siti contaminati". In tale elenco armonizzato, ogni singolo rifiuto viene classificato tramite un codice a sei cifre. La lana di roccia fa parte dei rifiuti classificati con i codici CER 17 06 03* cioè "altri materiali isolanti contenenti o costituiti da sostanze pericolose" e 17 06 04 cioè "materiali isolanti diversi da quelli di cui alle voci 17 06 01 e 17 06 03". A differenza dei materiali classificati ai codici CER 17 06 01 e 17 06 03*, i rifiuti classificati al codice CER 17 06 04 non sono pericolosi, quindi si prestano maggiormente a eventuali operazioni di riciclo. La classificazione avviene tenendo conto delle caratteristiche chimiche e fisiche dei rifiuti e, in particolare, coincide a grandi linee con quella fatta per classificare le lane minerali in pericolose e non pericolose. In particolare, per i rifiuti di lana di roccia e in generale per tutte le FAV si tiene conto di tre parametri che sono:

- contenuto di ossidi alcalini e alcalino/terrosi;
- bio-solubilità;

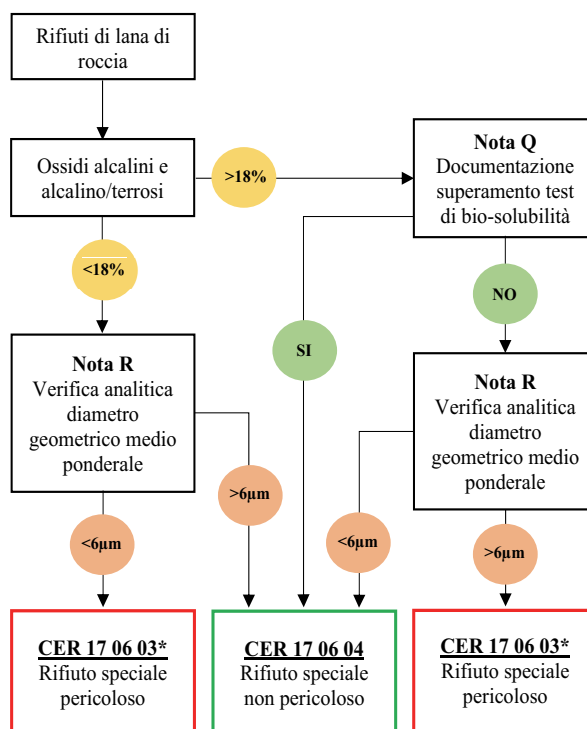


Figura 3 – Schema per la classificazione dei rifiuti di lana di roccia ai sensi del Regolamento CLP (E.I.V.R.A., 2016)

- diametro medio geometrico pesato sulla lunghezza delle fibre.

Per la classificazione dei rifiuti di lana di roccia è possibile seguire lo stesso iter (Figura 3) seguito per la classificazione delle lane minerali e riportato al paragrafo 1.2, secondo i criteri stabiliti dal Regolamento CLP.

I rifiuti di lana di roccia provengono principalmente dagli impianti di produzione di lana di roccia e dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione.

In base all'origine, i rifiuti presentano caratteristiche diverse e non possono essere gestiti allo stesso modo.

2.2. Trattamento degli scarti dagli impianti produttivi

Un impianto di produzione di lana di roccia produce tre tipologie di scarti, che possiedono caratteristiche diverse e che corrispondono al 21,4% dei materiali in uscita (Tabella 1, a pagina seguente). I primi scarti, pari al 12,3% del totale degli scarti prodotti, derivano della fase di alimentazione delle materie prime e, pertanto, sono costituiti dalle materie prime fini che vengono perse durante le varie fasi di pesatura e trasporto. Questi materiali

Tabella 1 – Flussi in ingresso e in uscita da un impianto di produzione di lana di roccia (Gamma Meccanica, 2020)

Ingresso			Uscita		
Materie prime	1.425,9 kg	87,8 %	Scarti dalla fase di stoccaggio e selezione delle materie prime	42,8 kg	2,6 %
Coke	166,0 kg	10,2 %	Ferro a recupero	41,5 kg	2,6 %
Leganti	31,8 kg	2,0 %	CO ₂ e polveri	235,1 kg	14,5 %
Totale	1.623,7 kg	100,0 %	Scarti dalla fase di fibraggio e formatura	229,0 kg	14,1 %
			Scarti dalla fase di taglio, controllo qualità e stoccaggio	75,3 kg	4,6 %
			Lana di roccia (prodotto finale)	1.000,0 kg	61,6 %
			Totale	1.623,7 kg	100,0 %

possono essere utilizzati come materia prima nell'impianto di bricchettatura, se presente, oppure come materiali inerti in altre attività edili (realizzazione manti stradali, riempimento).

Gli scarti più facili da riciclare sono quelli provenienti dalla fase di taglio corrispondenti al 21,7% del totale degli scarti prodotti. Si tratta, infatti, di materiale che possiede già le caratteristiche finali della lana di roccia e può direttamente essere convogliato nella fase di recupero degli scarti, dove verrà triturato in fiocchi, pesato e dosato per poi essere inviato a monte della camera di formazione per essere reintrodotta nel processo produttivo. Tuttavia, la quantità di materiale re-immettibile nel processo produttivo è sottoposta a limitazioni, in quanto l'aggiunta di questi materiali, in grosse quantità, potrebbe causare la presenza di "spot" nei pannelli finiti che, rendendo il materiale non più omogeneo, ne peggiorano le caratteristiche di isolamento termico e acustico. Tipicamente, è possibile sostituire circa il 10% delle materie prime con questa tipologia di scarti (Gamma Meccanica, 2020). Negli impianti, quindi, vengono appositamente realizzati dei silos di stoccaggio per i materiali recuperati.

Gli scarti più difficili da riciclare sono quelli prodotti nella fase di fibraggio che, oltretutto, sono quelli prodotti in quantità maggiore (66% del totale degli scarti prodotti). Durante questa fase, circa il 15% del materiale fuso mescolato ai leganti non riesce ad essere fibrato. Questo materiale viene raccolto tramite un nastro trasportatore e inviato alla fase di recupero degli scarti. Non può essere, invece, inviato in testa all'impianto poiché contiene leganti ed è costituito da materiali fini. Si presenta, infatti, come un fango che non è possibile fondere nella cupola poiché andrebbe a disturbare il flusso di aria comburente. Le soluzioni attualmente utilizzate per questi scarti sono lo smaltimento in discarica oppure la bricchettatura. Quest'ultima prevede di mescolare gli scarti con

dei materiali inerti come il cemento, la bauxite, i residui del processo di macinazione (provenienti dallo stesso impianto produttivo di lana di roccia o da processi produttivi terzi) e un legante organico allo scopo di inertizzare i leganti presenti, in modo da creare dei bricchetti di dimensioni e durezza accettabili per essere fusi nella cupola. Ciascuna azienda di produzione di lana di roccia ha comunque sviluppato una propria ricetta per la produzione di bricchetti.

Questo tipo di procedimento presenta diversi aspetti positivi:

- Si riduce la quantità di rifiuti inviati a smaltimento;
- Si riduce la quantità di materia prima necessaria per la produzione di lana di roccia che viene sostituita dai bricchetti;
- Si riduce la quantità di energia necessaria per la fusione poiché una parte dei materiali è già stata sottoposta a tale trattamento.

Ma sono presenti anche degli aspetti negativi:

- La realizzazione di un impianto ad hoc per la bricchettatura è molto costoso;
- È necessario utilizzare materiali poco sostenibili a livello di impatto ambientale per la realizzazione del processo come il cemento.

2.3. *Trattamento dei rifiuti da attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione*

I rifiuti di lana di roccia provenienti da attività di costruzione e demolizione arrivano, generalmente, in impianto mescolati ad altri materiali. In fase di ristrutturazione e demolizione generalmente vengono prodotti maggiori quantità di rifiuti (tutto il materiale utilizzato nell'opera diventa rifiuto) rispetto alla fase della costruzione, dove si stima una perdita di circa il 5% del materiale utilizzato (Väntsi & Kärki, 2014). Oltretutto, questo materiale non viene perso del tutto, in quanto essendo ancora puro può essere facilmente riutilizzato in

altri lavori o trattato alla stregua dei residui della fase di taglio nella catena produttiva. Nel caso di ristrutturazione e demolizione il riutilizzo è molto più complicato se non impossibile da realizzare poiché, come già detto, il flusso di materiali provenienti da questo tipo di attività è molto eterogeneo e i materiali dovrebbero essere separati per poter essere gestiti in maniera sostenibile. I residui metallici (come le zanche di fissaggio) potrebbero essere facilmente rimossi tramite l'utilizzo di un separatore magnetico, non vale lo stesso per i residui di intonaco, legno, laterizi e plastica che è possibile incontrare nei rifiuti provenienti da questo tipo di attività.

La soluzione più semplice e più economica attualmente presente per la gestione dei rifiuti di lana di roccia è purtroppo ancora lo smaltimento in discarica. I produttori dei rifiuti li inviano, generalmente, a degli impianti specializzati che procedono a confezionare i rifiuti in *big bags* debitamente etichettate. I materiali vengono, poi, imballati con delle presse stazionarie dedicate e avvolti in materiale termoretraibile. I rifiuti, così confezionati, vengono inviati a impianti dotati di cella dedicata e qui smaltiti. Questa soluzione, sebbene la più economica, è sicuramente la più sconveniente in termini di impatto ambientale. La lana di roccia, nonostante sia fondamentalmente realizzata con materiali naturali, contiene sostanze come formaldeide e fenoli che rischiano di percolare e, in assenza di un adeguato sistema di raccolta del percolato, di inquinare il terreno.

2.4. Tecnologie in fase di sviluppo

A causa della sempre crescente quantità di rifiuti di lana di roccia prodotti, gli operatori del settore si chiedono se esistano soluzioni alternative a quelle esistenti per la gestione di questi materiali.

Tra le soluzioni alternative alle attuali, le più interessanti sono quelle che prevedono l'utilizzo dei rifiuti di lana di roccia come aggiunte nella produzione di miscele a base di cemento e per la produzione di materiali ceramici sinterizzati.

La prima soluzione riguarda l'utilizzo dei rifiuti di lana di roccia come materia prima nella produzione di miscele a base di cemento. In passato, molti altri materiali sono stati utilizzati allo stesso modo. La norma UNI EN 206-1 definisce tali sostanze *aggiunte*. Si tratta di materiali che miscelati al calcestruzzo permettono di migliorarne le proprietà o conferirgli caratteristiche speciali. Tra queste vi so-

no le ceneri volanti, i fumi di silice e tutti i prodotti finissimi ottenuti dalla frantumazione delle rocce calcaree o silicee. Per risolvere il problema dello smaltimento dei rifiuti di lana di roccia e per favorire il riciclo, l'industria del calcestruzzo potrebbe essere, quindi, una soluzione. I conglomerati arricchiti con la lana di roccia presentano caratteristiche leggermente differenti rispetto alle malte tradizionali, la maggior parte dei quali permettono di ottenere materiali più performanti e utili a scopi diversi rispetto a quelli tradizionali (Cheng et al., 2011). Inoltre, non bisogna sottovalutare la riduzione dei costi legati alle materie prime e la minimizzazione dell'impatto ambientale dovuto allo smaltimento dei rifiuti di lana di roccia. È stato dimostrato, infatti, che utilizzando i rifiuti di lana di roccia come aggiunte è possibile sostituire fino al 30% della sabbia necessaria per la produzione delle malte e riciclare fino a 70 kg di lana minerale per tonnellata di conglomerato prodotto (Piña Ramírez et al., 2018).

L'altra possibile soluzione è l'utilizzo dei rifiuti di lana di roccia per la produzione di materiali ceramici sinterizzati. La sinterizzazione è un processo ad alta temperatura con il quale è possibile realizzare prodotti mettendo della polvere di materiale in uno stampo e riscaldandola a temperature molto elevate, ma comunque inferiori a quelle di fusione. Utilizzando rifiuti di lana di roccia è possibile, tramite questo processo, creare materiali ceramici utili alla realizzazione di oggetti di ogni tipo. Pranckevičienė (Pranckevičienė, 2011) ha studiato una tecnologia per la produzione di materiali ceramici sinterizzati utilizzando illiti a basso punto di fusione e i rifiuti di lana di roccia provenienti dalla fase di fibraggio. Per realizzare il processo di sinterizzazione è necessario utilizzare sostanze non plastiche e fondenti in modo da poter ottenere ceramiche con buone qualità chimico-fisiche. I rifiuti di lana di roccia rappresentano le sostanze non plastiche, mentre la sostanza fondente è, generalmente, la nefelina sienite. Uno dei problemi principali riscontrati durante questo studio è che i rifiuti di lana di roccia contengono fenoli e formaldeide che devono essere neutralizzati. Pranckevičienė riporta come i fenoli presenti nei rifiuti di lana di roccia possano essere facilmente neutralizzati utilizzando perossido di idrogeno e solfato ferroso come catalizzatore. La formaldeide, invece, può essere neutralizzata tramite l'utilizzo di una soluzione acquosa al 20% di fosfato di diammonio e urea. A seguito della neutralizzazione delle sostanze, i ri-

fiuti di lana di roccia diventano degli additivi non plastici idonei per la riduzione della plasticità delle illiti. Chen et al. (Chen et al., 2019) hanno invece studiato una tecnologia per la realizzazione di schiume ceramiche sinterizzate utilizzando i rifiuti di lane minerali e il carburo di silicio come agente schiumogeno. Le schiume ceramiche prodotte possono essere utilizzate come materiale isolante. La qualità delle schiume ceramiche varia in funzione della quantità di rifiuti utilizzati per realizzarle. È stato dimostrato come schiume ceramiche prodotte a partire da una miscela contenente il 40% in peso di rifiuti di lane minerali presentano le caratteristiche migliori rispetto ad altre schiume contenenti diversi quantitativi di questi rifiuti. Contenuti troppo bassi o troppo alti di rifiuti determinano una troppo bassa o troppo alta densità apparente. La qualità di queste schiume dipende inoltre anche da altri parametri quali la temperatura di processo, il contenuto di agente schiumogeno e il tempo e la velocità di riscaldamento.

3. ANALISI QUANTITATIVA DELLA PRODUZIONE DI RIFIUTI DI LANA DI ROCCIA

3.1. Descrizione dell'analisi e dei dati

I contesti considerati per l'analisi quantitativa realizzata sono quelli europeo, nazionale e regionale (in particolare, si fa riferimento alla Regione Lombardia).

A livello europeo attualmente non esiste un database che riporti specificatamente il flusso di rifiuti di lana di roccia prodotti. Tuttavia, grazie a un modello matematico da applicare ai dati di produzione di lane minerali è possibile stimare la produzione di rifiuti di lana di roccia provenienti dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione nell'area EU28. Il modello considerato è quello sviluppato da Müller et al. (Müller et al., 2009). Questo modello nasce per la stima della produzione dei rifiuti di lane minerali e si basa su due ipotesi fondamentali:

- le lane minerali hanno una vita utile media di 30 anni;
- gli scarti nella fase di installazione si assestano al 5% dei materiali utilizzati.

Sulla base di queste ipotesi il volume totale di rifiuti di lane minerali nell'anno i -esimo V_i è pari a:

$$V_i = 0,95 \cdot P_{i-30} + 0,05 \cdot P_i$$

dove P_i è il volume di lane minerali prodotte nell'anno i -esimo e P_{i-30} è il volume di lane minerali prodotte nell'anno $i-30$.

Il primo termine di questa relazione rappresenta il volume di rifiuti prodotti dalle attività di ristrutturazione e demolizione, mentre il secondo termine rappresenta il volume di rifiuti prodotti dalle attività di costruzione.

Per poter applicare il modello per la stima dei rifiuti di lana di roccia si può aggiungere una nuova ipotesi, secondo cui la quantità di lana di roccia prodotta, durante l'arco temporale considerato, corrisponde al 70% del totale delle lane minerali prodotte. La Commissione Europea ha stimato, infatti, che la lana di roccia prodotta corrisponde al 70% della produzione totale di lana minerale, mentre il rimanente 30% sono le altre lane minerali come la lana di vetro (Väntsi & Kärki, 2014). Tenendo conto di questa ipotesi si può allora dire che il volume totale di rifiuti di lana di roccia $V_{RW,i}$ prodotti nell'anno i -esimo sarà pari a:

$$V_{RW,i} = 0,95 \cdot (0,7 \cdot P_{i-30}) + 0,05 \cdot (0,7 \cdot P_i) = 0,7 \cdot V_i$$

Partendo dai dati di produzione della lana di roccia al codice PRODCOM 23991910 estratti dal database dell'ufficio statistico dell'Unione Europea (Eurostat) (Tabella 2), il primo step dell'analisi è rappresentato dalla realizzazione di una regressio-

Tabella 2 – Produzione di lane minerali nell'area EU28 (Eurostat)

Anno	Quantità di lane minerali prodotte [t]
2003	2.249.394
2004	2.429.827
2005	1.980.025
2006	2.284.268
2007	2.486.572
2008	2.557.969
2009	2.166.509
2010	2.175.836
2011	2.468.638
2012	2.558.417
2013	2.448.619
2014	2.430.740
2015	2.460.601
2016	2.524.589
2017	2.673.860
2018	2.825.389

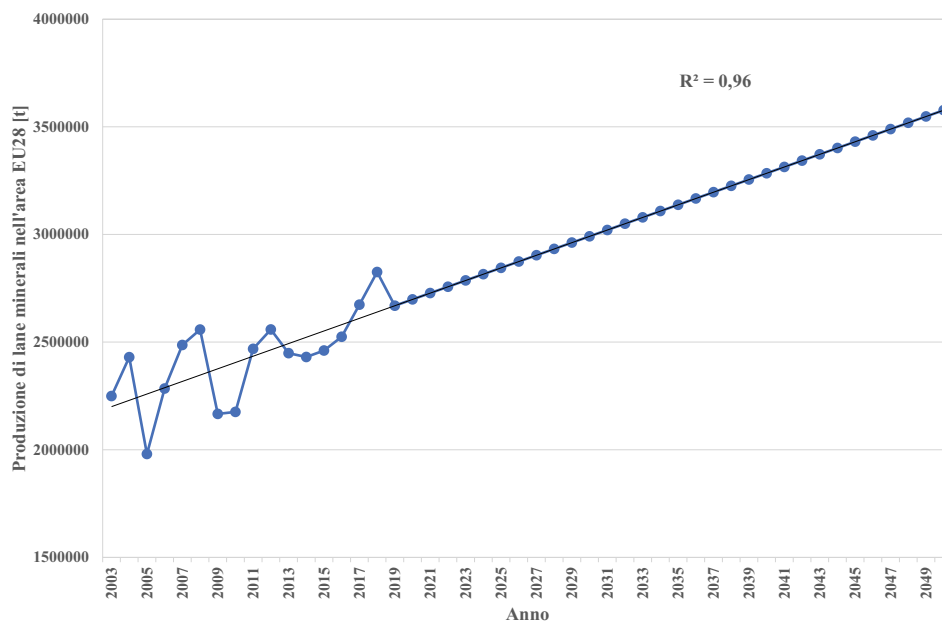


Figura 4 – Regressione lineare dei dati di produzione delle lane minerali nell'area EU28

ne lineare su tali dati (Figura 4). È di immediata visione il trend crescente della retta che presenta oltretutto un buon valore di R^2 .

Per la stima della produzione di rifiuti di lana di roccia provenienti dagli impianti di produzione, poiché sia gli scarti provenienti dalle fasi di alimentazione che di taglio vengono reimmessi nel ciclo produttivo, vengono considerati i soli rifiuti provenienti dalla fase di fibraggio, che ammontano al 14,1% dell'output totale. Si è, inoltre, supposto che, verosimilmente, nell'orizzonte temporale considerato, l'efficienza di un impianto pro-

duuttivo si manterrà costante. Tenendo conto di queste considerazioni e utilizzando i dati di produzione ottenuti dalla regressione lineare, è possibile stimare la quantità di rifiuti prodotti nella fase di produzione nell'area EU28 nell'arco di tempo che va dal 2033 al 2050.

A livello nazionale, non essendo presenti impianti per la produzione di lana di roccia, non è possibile avere un database per la produzione. Inoltre, i dati di vendita di questo materiale in Italia sono discontinui (Figura 5), quindi non è stato possibile stimare la produzione di rifiuti di lana di roccia.

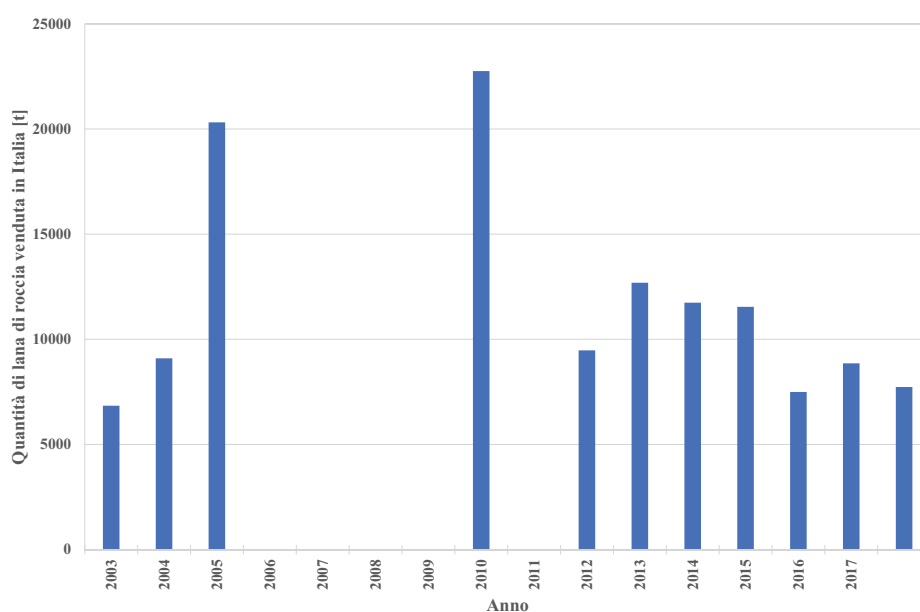


Figura 5 – Quantità di lana di roccia venduta in Italia (Eurostat)

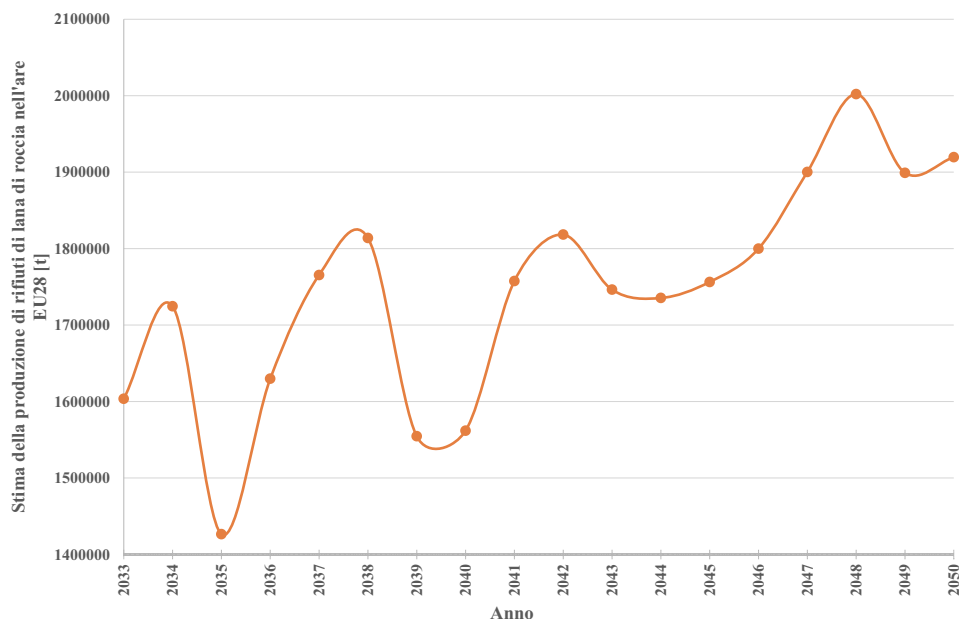


Figura 6 – Stima della produzione di rifiuti di lana di roccia nell'area EU28 provenienti dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione

A livello regionale si è voluta valutare la situazione attuale in modo da poter capire in che modo vengano gestiti i rifiuti di lana di roccia. Con questa analisi si è tentato di capire se effettivamente le modalità di riciclo attualmente esistenti siano applicate o se il destino di tali rifiuti sia lo smaltimento. Anche per il contesto regionale non esiste un database che riporti la quantità di lana di roccia prodotta, tuttavia è stato possibile analizzare i dati forniti da Arpa Lombardia relativi alla gestione dei rifiuti classificati al CER 17 06 04 nell'anno 2017. Poiché i materiali contenenti sostanze pericolose non possono essere considerati se si vuole fare un'analisi sulle possibilità di riciclo/recupero/riuso dei rifiuti, i rifiuti classificati al codice CER 17 06 03*, cioè quelli costituiti o contenenti sostanze pericolose, non sono stati qui considerati.

4. RISULTATI

Applicando il modello descritto precedentemente ai dati ottenuti, è stato possibile stimare la produzione di rifiuti di lana di roccia nell'area EU28 dal 2033 al 2050 provenienti dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione (Figura 6). È importante notare che la stima parte dall'anno 2033 perché è il primo anno per il quale è disponibile il dato P_{i-30} della produzione di lana di roccia (anno 2003). La curva presenta un andamento crescente con un aumento totale del 19,7% nell'orizzonte temporale considerato e un incremento medio annuale della produzione di rifiuti pari all'1,4%. Per quanto riguarda, invece, i rifiuti provenienti dagli impianti di

produzione di lana di roccia, tenendo conto delle ipotesi precedentemente descritte, è stato possibile stimare la produzione di rifiuti di lana di roccia nel periodo che va dal 2033 al 2050 (Figura 7, a pagina seguente). Dal grafico è evidente una crescita lineare della produzione di rifiuti di lana di roccia. I dati mostrano un aumento nella produzione pari al 16,2% nell'intervallo di tempo analizzato, con un incremento medio annuo pari allo 0,95%. È importante, però, considerare che nel caso degli impianti di produzione, la quantità di rifiuti prodotti è strettamente legata all'efficienza con cui viene realizzato l'intero processo. Se un impianto produttivo fosse provvisto di una macchina di fibraggio che garantisse perdite di materiale minore, la quantità di rifiuti prodotti sarebbe più bassa.

Sommando le quantità di rifiuti di lana di roccia stimate, è possibile ottenere la stima totale dei rifiuti che saranno prodotti nell'area EU28 tra il 2033 e il 2050 (Figura 8, a pagina seguente). In questo arco di tempo si avrà un incremento della produzione di rifiuti pari al 19,0% con un incremento medio annuo pari all'1,1%.

Per il contesto regionale, Arpa Lombardia ha fornito i dati MUD relativi agli impianti in regione che nel 2017 hanno gestito rifiuti classificati al codice CER 17 06 04. La quantità totale di rifiuti trattati è risultata pari a 11.200,5 t e gli impianti 153. Gli impianti sono stati divisi in funzione delle operazioni che svolgono. In particolare, si distinguono 107 impianti che realizzano operazioni di recupero (Figura 9, a pagina seguente) e 46

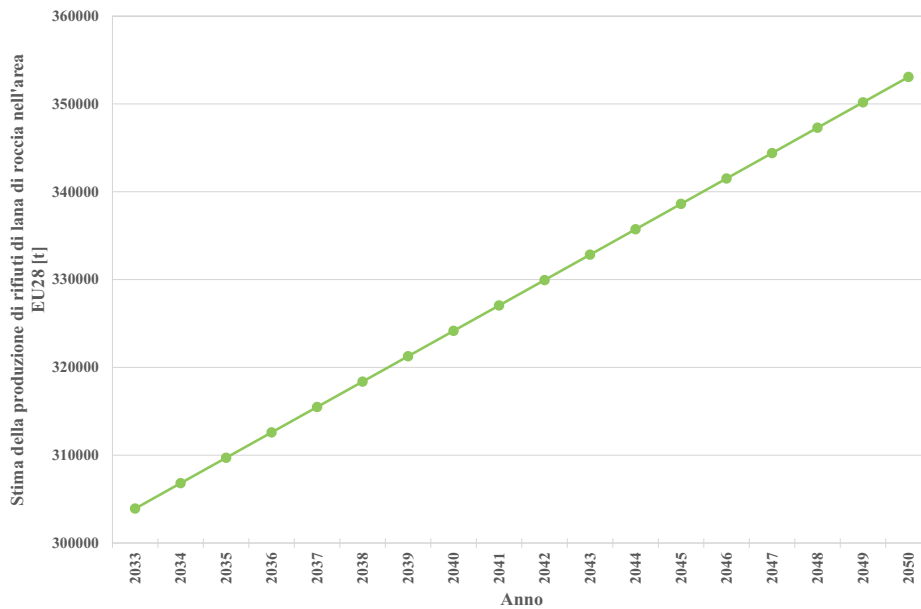


Figura 7 – Stima della produzione di rifiuti di lana di roccia nell'area EU28 provenienti dagli impianti di produzione

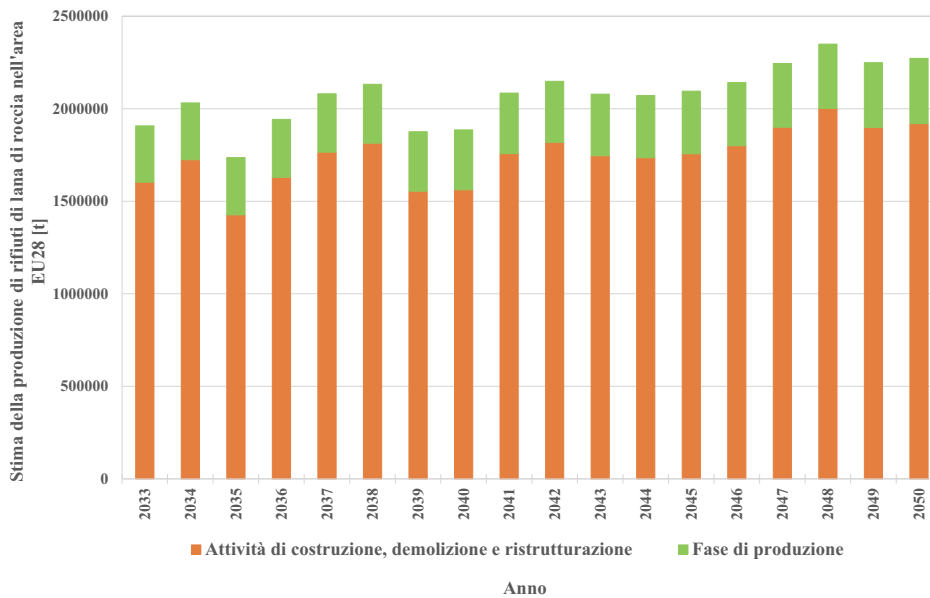


Figura 8 – Stima della produzione totale di rifiuti di lana di roccia nell'area EU28

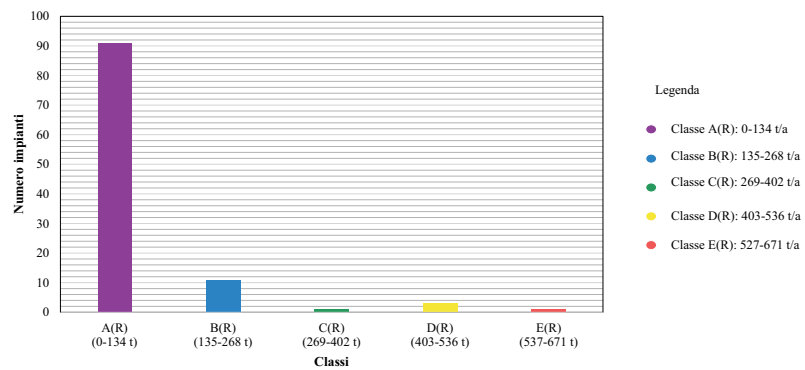


Figura 9 – Posizione e distribuzione di frequenza degli impianti che realizzano operazioni di recupero (R) del CER 170604 presenti sul territorio lombardo suddivisi in classi in funzione delle quantità di materiali trattati nell'anno 2017

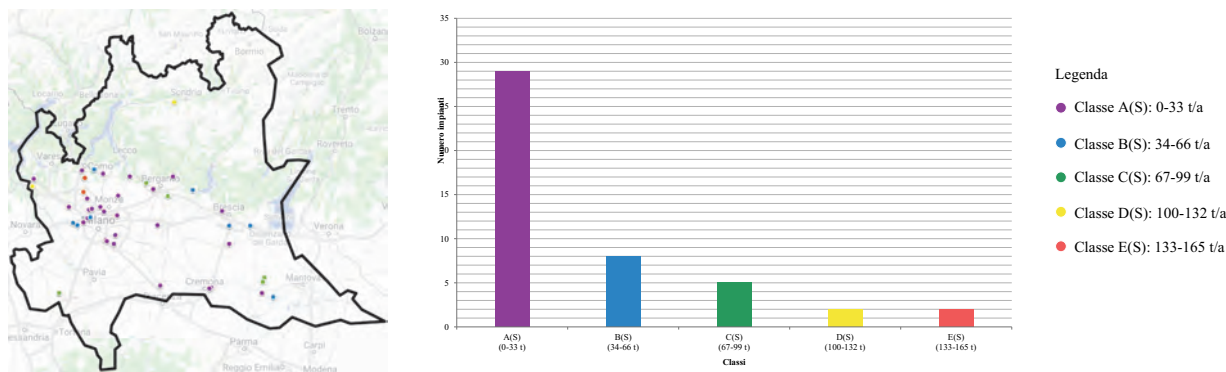


Figura 10 – Posizione e distribuzione di frequenza degli impianti che realizzano operazioni di smaltimento (S) del CER 170604 presenti sul territorio lombardo suddivisi in classi in funzione delle quantità di materiali trattati nell’anno 2017

impianti che effettuano operazioni di smaltimento (Figura 10). Sia per le operazioni di recupero che di smaltimento, la maggior parte degli impianti tratta piccole quantità di rifiuti. Per il recupero, appartengono alla classe 0-134 t/a, infatti, 91 impianti mentre è solo uno quello appartenente alla classe 527-671 t/a. Analogamente, per lo smaltimento, sono 29 gli impianti appartenenti alla classe 0-33 t/a e solo 2 quelli appartenenti alla classe 133-165 t/a.

In Figura 11 e Figura 12 sono riportate le quantità di materiali trattate per ciascuna operazione.

Per quanto riguarda le operazioni di recupero vengono trattate con queste modalità 7.217,5 t cioè il 64,4% del totale. La maggior parte dei rifiuti sono destinati all’operazione R12 (66,7%) e R13 (23,7%) cioè vengono scambiati o messi in riserva in attesa di essere sottoposti a una delle altre operazioni. Gli impianti che dichiarano di compiere queste operazioni, quindi, prelevano i rifiuti ma

non realizzano alcuna operazione di trasformazione degli stessi.

Sono destinati allo smaltimento, invece, 3.983,0 t di rifiuti pari al 35,6% del totale. La maggior parte degli impianti realizza l’operazione di smaltimento D15 (66,3%) che prevede il deposito preliminare prima di realizzare una delle altre operazioni di smaltimento.

Ciascun impianto, inoltre, realizza tali operazioni svolgendo diverse attività. Si possono distinguere a tal proposito diversi tipi di impianti:

- impianti per il recupero di materia;
- impianti per il deposito preliminare dei rifiuti;
- discariche;
- impianti di smaltimento;
- impianti per la messa in riserva dei rifiuti;
- impianti che realizzano trattamenti chimico-fisico-biologici;
- coinceneritori;
- altri.

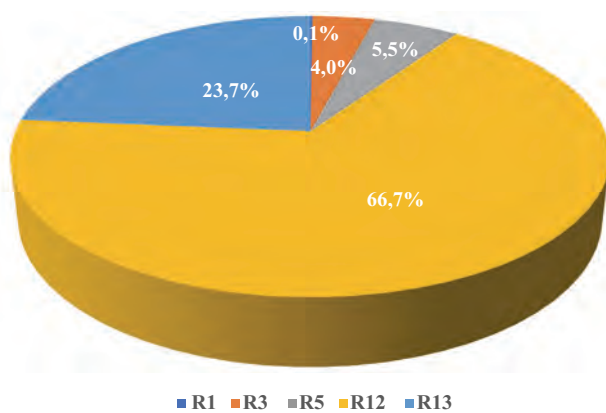


Figura 11 – Quantità di rifiuti classificati alla voce 17 06 04 del CER destinati alle operazioni di recupero nella Regione Lombardia nell’anno 2017

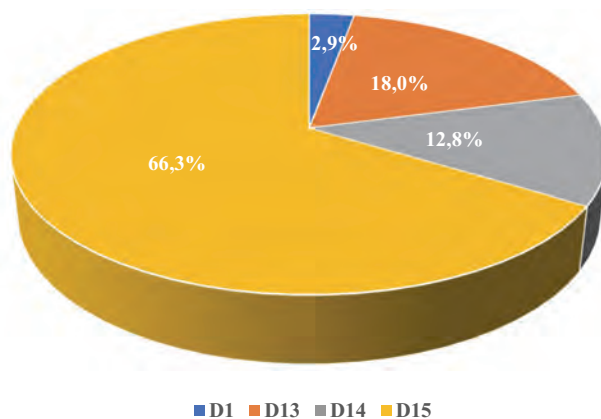


Figura 12 – Quantità di rifiuti classificati alla voce 17 06 04 del CER destinati alle operazioni di smaltimento nella Regione Lombardia nell’anno 2017

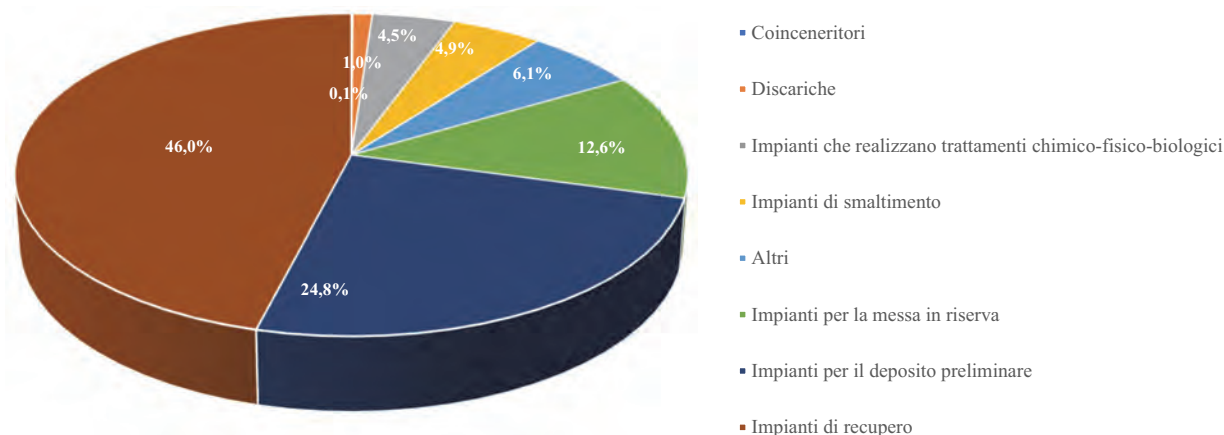


Figura 13 – *Quantità di rifiuti classificati alla voce 17 06 04 del CER trattati per ciascuna tipologia di impianto nella Regione Lombardia nell'anno 2017*

In Figura 13 sono riportate le quantità di rifiuti trattati da ciascuna tipologia di impianto. La maggior parte (46%) viene gestita da impianti che realizzano operazioni di recupero di materia.

5. CONCLUSIONI

L'analisi svolta ha permesso di stimare la produzione di rifiuti di lana di roccia nell'area EU28 dal 2033 al 2050: in particolare, in questo arco di tempo, si avrà un incremento della produzione di tale tipologia di rifiuti pari al 19,0% con un incremento medio annuo pari all'1,1%. È prevista quindi una crescita nella produzione di rifiuti di lana di roccia e ciò, con notevole probabilità, potrebbe rappresentare una grossa sfida per la gestione di questa tipologia di rifiuti. Riguardo al contesto regionale, grazie all'analisi quantitativa svolta sui dati MUD forniti da Arpa Lombardia, si è ottenuto che la quantità totale di rifiuti classificati al codice CER 17 06 04 trattati nel 2017 è pari a 11.201 t, di cui 7.218 t (ossia il 64,4%) sono destinati a recupero e 3.983 t (pari al 35,6%) a smaltimento. In realtà però la maggior parte dei rifiuti a recupero sono destinati all'operazione R12 e R13, cioè vengono scambiati o messi in riserva in attesa di essere sottoposti a una delle altre operazioni di recupero: gli impianti che ricevono i rifiuti, quindi, prelevano i rifiuti ma non realizzano alcuna operazione di trasformazione degli stessi.

Esistono oggi alcune valide soluzioni per la gestione di questi rifiuti, quali il riutilizzo come materie prime e la bricchettatura. Attualmente, però, queste strade risultano poco battute poiché molto più dispendiose del semplice smaltimento in discarica. Inoltre, la quantità di rifiuti trattabi-

le è molto limitata poiché tali rifiuti vanno ad abbassare la qualità della lana di roccia nel primo caso e a generare problemi in fornace nel secondo. La bricchettatura, inoltre, determina un aumento nei costi di produzione dato che la produzione di bricchetti, da utilizzare in sostituzione delle materie prime, è molto più costosa delle operazioni di estrazione e trasporto in impianto della roccia.

Alcuni studi hanno analizzato soluzioni alternative a quelle attualmente esistenti. Queste riguardano l'utilizzo dei rifiuti di lana di roccia come aggiunte per i conglomerati o come additivo nella produzione di materiali ceramici sinterizzati. Tali soluzioni sono molto interessanti, ma presentano una limitazione, cioè che i rifiuti di lana di roccia per poter essere utilizzati debbano essere il più possibile puri, ossia privi di sostanze contaminanti. E questo si scontra con la realtà esistente in cui i rifiuti di lana di roccia provenienti dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione, che sono i più abbondanti, contengono al loro interno intonaci, legno, laterizi e plastica che quindi possono interferire negativamente con un eventuale processo di riciclo. La soluzione potrebbe essere quella di favorire sempre di più una demolizione selettiva che permetta di creare flussi di materiali ben distinti e privi di sostanze contaminanti. Questa tecnica sarebbe molto efficiente nel caso di pareti ventilate, in cui è molto più semplice separare le singole unità componenti la struttura rispetto alle altre metodologie utilizzate per la realizzazione dell'isolamento a cappotto. Tuttavia, questo tipo di demolizione è complicata da attuare e non garantisce che i rifiuti siano perfettamente puliti, se non nel caso di pareti ventilate. Sarebbe neces-

sario valutare in che modo le contaminazioni dei rifiuti di lana di roccia possano interferire con i processi e, eventualmente, creare una soluzione alternativa con la quale si possano ovviare queste problematiche.

Un'altra problematica emersa dallo studio è rappresentata dal fatto che in Italia i rifiuti di lana di roccia non vengono distinti dagli altri rifiuti di materiali isolanti e sono quindi raccolti insieme e inviati allo stesso trattamento. Questi materiali non hanno però tutti le stesse caratteristiche e dovrebbero pertanto essere trattati in maniera differente con norme ad hoc per ciascuna tipologia. Sarebbe quindi auspicabile un miglioramento nella gestione dei rifiuti dei materiali isolanti derivanti dalle attività di costruzione, demolizione e ristrutturazione.

Per quanto riguarda i rifiuti provenienti dalla fase di produzione della lana di roccia, quelli prodotti durante la fase di fibraggio sono i più difficili da gestire, nonché quelli generati in quantità maggiore. Durante tale processo quasi il 15% del prodotto viene perso. Questo materiale è ricco di leganti (formaldeide e fenoli) che limitano le possibilità di recuperarlo. La soluzione ideale sarebbe quella di migliorare l'efficienza dell'impianto allo scopo di limitare le perdite. In Italia, comunque, questo problema non ha grossa rilevanza poiché non sono presenti sul territorio nazionale impianti di produzione di lana di roccia, ma potrebbe rappresentare una grande sfida nel contesto europeo in cui sono presenti svariate aziende produttive.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2002). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans: Volume 81-Man-Made Vitreous fibres. Lione, Francia: IARCPress.
- TIMA (Thermal Insulation Manufacturers Association) (1993) Man-made Vitreous Fibers: Nomenclature, Chemical and Physical Properties, 4th Ed., Eastes, W., ed., Nomenclature Committee of Thermal Insulation Manufacturers' Association, Refractory Ceramic Fibers Coalition (RCFC), Washington, DC.
- Assuncao J. e Corn M. (1975) The effects of milling on diameters and lengths of fibrous glass and chrysotile asbestos fibers., *Am. ind. Hyg. Assoc. J.*, 36, 811-819
- F.I.V.R.A. (2016) Fibre Artificiali Vetrose (FAV) – Aggiornamento delle linee guida del Ministero della Salute.

Gamma Meccanica (2020), Impianti per la produzione di lana di roccia.

<https://www.gamma-meccanica.it/>

Širok B., Bizjan B., Orbanic A. e Bajcar T., (2014) Mineral wool melt fiberization in a spinner wheel, *Chemical Engineering Research and Design*.

Väntsi O. e Kärki T. (2014) Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods, *J Mater Cycles Waste Manag* 16, 62-72.

Cheng A., Lin W.T. e Ran H. (2011), Application of rock wool waste in cement-based composites, *Materials & Design*, vol. 32, Issue 2, pp. 636-642.

Piña Ramírez C., Atanes Sánchez E., Del Río Merino M., Viñas Arrebola C. e Vidales Barriguete A. (2018) Feasibility of the use of mineral wool fibres recovered from CDW for the reinforcement of conglomerates by study of their porosity, *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 460-468.

Pranckevičienė J. (2011) Impact of mineral wool production waste on properties of sintered ceramics, *Summaries of Doctoral Thesis*, eLABa – Lithuanian Academic Electronic Library.

Chen Z., Wang H., Ji R., Liu L., Cheeseman C.R. e Wang X. (2019) Reuse of mineral wool waste and recycled glass in ceramic foam, *Ceramics International*, vol. 45, Issue 12, pp. 15057-15064.

Müller A., Leydolph B. e Stanelle K. (2009) Recycling mineral wool waste – Technologies for the conversion of the fiber structure, Part I, *Interceram*, pp. 58:378-381.

Arpa Lombardia, dati forniti.

7. RIFERIMENTI NORMATIVI

Regolamento (CE) n.1272/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al Regolamento (CE) n. 1907/2006. *Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea L. 353/1 del 31 dicembre 2008*.

Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile 2006*.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Arpa Lombardia per i dati forniti necessari per l'analisi. Si ringraziano, inoltre, i responsabili delle aziende e degli impianti di trattamento dei rifiuti per le informazioni fornite.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2020 è sostenuta da:



better together



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 4/2020

