

VALUTAZIONE LCA DEL SISTEMA DI RICICLO DEI RIFIUTI A BASE DI GESSO IN REGIONE LOMBARDIA

Marta Giurato^{1,*}, Sara Pantini^{1,2}, Lucia Rigamonti^{1,2}

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

² Centro Studi MatER.

Sommario – Il presente lavoro ha come obiettivo la valutazione degli impatti ambientali dell'attuale sistema di gestione e recupero dei rifiuti da costruzione a base di gesso, mediante applicazione della metodologia dell'analisi del ciclo di vita (LCA), al fine di fornire indicazioni utili a supporto delle politiche regionali. Il contesto geografico di riferimento dello studio è quello della regione Lombardia, per la quale sono state analizzate le strategie di gestione e le tecnologie di recupero dei rifiuti a base di gesso implementate nell'anno 2014; i dati e le informazioni sono stati raccolti utilizzando diverse fonti (ARPA Lombardia, gestori degli impianti di riciclo, siti cave e di lavorazione della risorsa naturale) per poter descrivere l'intera filiera di recupero dei rifiuti in gesso e costruire un dataset specifico per il contesto in esame. L'analisi dello scenario attuale ha permesso di mettere in luce i punti di forza e le criticità del sistema presente e di definire possibili scenari futuri alternativi, anch'essi analizzati nell'ottica LCA, per valutare come e in che misura è possibile migliorarne le prestazioni ambientali. Nella definizione degli scenari alternativi, l'attenzione è stata focalizzata sui quattro principali settori di utilizzo del gesso riciclato (produzione di nuovi pannelli in cartongesso, cementifici, trattamento fanghi con produzione di gessi di defecazione ed agricoltura), per ciascuno dei quali sono stati valutati la potenziale richiesta di mercato in Lombardia nonché i possibili limiti tecnici. Si è quindi definito uno scenario migliorativo futuro realisticamente applicabile al contesto in esame. Confrontando tale scenario con quello attuale è stato possibile quantificare i benefici derivanti dalle azioni migliorative proposte ed individuare le linee di intervento più efficaci in grado di ottimizzare il recupero dei rifiuti a base di gesso e il riuso della materia prima secondaria.

Parole chiave: Analisi del ciclo di vita, gesso, recupero di materia, impatti ambientali, rifiuti inerti.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF GYPSUM WASTE RECYCLING SYSTEM IN LOMBARDY REGION

Abstract – The purpose of this study was to evaluate the environmental impacts of the current system for managing and recycling gypsum waste in Lombardy region, by applying the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The main objective was to provide recommendation for the regional government in order to achieve a more sustainable and resource-efficient management of gypsum-based waste. The geographical context of this LCA study is hence the Lombardy re-

gion and the time framework refers to the current management and recovery technologies for gypsum-based waste as implemented in 2014. Primary data and information related to gypsum waste flows, recovery options and actual end-uses of recycled materials were gathered from different sources (ARPA Lombardia, gypsum-waste recyclers, final end-users, quarry sites) in order to depict the whole recycling chain and create a dataset specific for the analyzed context. The LCA analysis of the current scenario allowed to identify strength and weak points of the regional management system and to define alternative scenarios. These were analyzed in a life cycle perspective in order to assess how and to what extent the environmental performance of the system can be further improved. In the definition of these scenarios, the focus was on the four major sectors for which the utilization of recycled gypsum is technically feasible (i.e. plasterboard production, cement industry, disinfection of sewage sludge for the production of a fertilizer, agriculture). For each analyzed end-use scenario, the potential market demand in Lombardy region as well as technical requirements of recycled gypsum were evaluated. Based on the environmental performance of each alternative scenario and on considerations about the market potential of each sector, a future improved scenario was developed specifically for the context under study. The comparison between this scenario and the current one allowed to quantify the benefits arising from the proposed improving actions and to identify the most effective waste management strategies to support local authorities in optimizing the recovery of gypsum waste and the use of secondary raw material.

Keywords: LCA, gypsum, material recovery, environmental impacts, inert waste.

Ricevuto il 14-12-2017; Correzioni richieste il 25-6-2018; Accettazione finale il 12-7-2018.

1. INTRODUZIONE

La macro-categoria dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D), individuata nel Capitolo 17 del Catalogo Europeo dei Rifiuti (CER), è caratterizzata da flussi di rifiuti molto diversi tra loro, sia a livello quantitativo che qualitativo ed anche per quanto riguarda le strategie di gestione e le modalità di trattamento. I rifiuti a base di gesso sono uno specifico flusso di tale macro-categoria e sono individuati con il codice CER 170802. Sono un flusso esiguo se comparato alle altre frazioni della famiglia dei rifiuti C&D, ma con un crescente inte-

* Per contatti: Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano. Tel. 3343363293. E-mail: marta.giurato@mail.polimi.it.

resse da parte della comunità scientifica per il loro alto potenziale di riciclo (Eurogypsum, 2013; Rivero et al., 2015).

Come riscontrato in recenti progetti di ricerca (Eurogypsum, 2013; Eurogypsum, 2015), il recupero dei rifiuti da costruzione a base di gesso può avvenire con due diverse modalità: mediante la loro miscelazione con altri rifiuti inerti C&D¹ oppure attraverso un trattamento specifico di recupero realizzato in impianti *ad hoc* e finalizzato all'ottenimento di polvere di gesso riciclato come materia prima secondaria. Quest'ultima opzione sembra essere preferibile in quanto:

- 1) evita la loro miscelazione con gli altri rifiuti inerti C&D;
- 2) consente di chiudere il ciclo delle risorse naturali e di raggiungere gli obiettivi dell'economia circolare in quanto il gesso riciclato ottenuto a valle del trattamento può essere impiegato in sostituzione parziale o totale del gesso naturale, in una vasta gamma di applicazioni.

La miscelazione dei rifiuti in gesso con le altre frazioni minerali dei C&D è una pratica piuttosto diffusa (Rivero et al., 2016) ma con delle evidenti criticità connesse principalmente all'aumento della lisciviazione di solfati negli aggregati riciclati prodotti a valle del trattamento che potrebbero non risultare idonei ad applicazioni in ambito stradale. Sebbene la miscelazione avvenga con dosaggi piuttosto bassi, dato il volume ridotto di questi rifiuti a confronto con gli altri C&D inerti, induce un peggioramento della qualità degli aggregati riciclati e ne limita il loro possibile utilizzo; ciò potrebbe rappresentare, in futuro, un punto di criticità per il sistema se, come atteso, i rifiuti in gesso prodotti e avviati a riciclo dovessero aumentare. Al contrario, promuovendo il riciclo dedicato dei rifiuti in gesso, è possibile ottenere come risorsa secondaria il gesso riciclato da destinare a diverse applicazioni (fermo restando il rispetto di determinate condizioni di qualità). I settori di impiego più diffusi (Assogesso, 2017; Eurogypsum, 2013) che sono stati analizzati in questo studio comprendono:

- il settore edilizio, dove il gesso riciclato è impiegato nella produzione di pannelli in cartongesso in parziale sostituzione del gesso naturale;
- l'industria cementiera, dove è addizionato al clinker per regolare la presa del cemento;

¹ La miscelazione è limitata in misura tale da garantire il rispetto delle caratteristiche finali degli aggregati affinché possano essere classificati come materie prime secondarie MPS (Allegati C, Circolare Ministeriale 5205/2005).

- il trattamento dei fanghi da depurazione, dove è impiegato come additivo per la produzione di gessi da defecazione da spandere in agricoltura;
- il settore agricolo, in cui è utilizzato come correttivo per regolare il pH dei terreni.

Il presente lavoro ha come obiettivo la valutazione degli impatti ambientali, attraverso la metodologia dell'analisi del ciclo di vita (LCA), associati all'attuale sistema di gestione e recupero dei rifiuti C&D non pericolosi a base di gesso implementato in regione Lombardia, e l'individuazione di possibili strategie di miglioramento. A tal fine, la ricerca ha provveduto alla quantificazione dei rifiuti a base di gesso prodotti alla scala regionale, per definire il bilancio di massa complessivo del sistema e l'effettivo tasso di recupero e smaltimento, nonché all'analisi di diverse filiere di recupero dei rifiuti a base di gesso e dei destini di utilizzo dei materiali riciclati, per valutare la tipologia ed i quantitativi di risorsa naturale risparmiata attraverso il trattamento specifico dei rifiuti in gesso. Tali attività sono essenziali al fine di compiere la valutazione LCA e quantificare gli impatti ambientali associati all'attuale sistema di gestione dei rifiuti in gesso. Inoltre, sono stati analizzati nell'ottica di ciclo di vita alcuni scenari alternativi di gestione, costruiti sulla base dei risultati ottenuti dalle attività precedenti e tenendo conto dei principali settori produttivi per i quali l'impiego del gesso riciclato è tecnicamente possibile. Attraverso questa analisi comparativa è stato possibile individuare uno scenario futuro in grado di migliorare le prestazioni ambientali ed energetiche del sistema attuale e formulare raccomandazioni ed obiettivi d'azione per il governo regionale.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Descrizione del contesto analizzato

La prima fase della ricerca si è incentrata sul calcolo dei flussi di rifiuti a base di gesso prodotti a livello regionale, in confronto con la situazione nazionale ed europea.

La produzione di rifiuti a base di gesso in Europa, in mancanza di dati pubblicati in report ufficiali, è stata stimata a partire dai dati di produzione e consumo dei prodotti edili a base di gesso (dati Eurostat 2014), adottando la stessa metodologia presentata nel rapporto di Eurogypsum (2013). L'anno di riferimento per la presente analisi è il 2014, ai fini del confronto con i dati di produzione dei rifiuti gestiti in ambito regionale. I risultati ottenu-

ti sono riportati nel lavoro di Giurato (2017) per alcuni Paesi europei: per l'Italia, la produzione stimata è di circa 74.100 t. L'analisi ha inoltre evidenziato che i prodotti a base di gesso sono costituiti essenzialmente da pannelli in cartongesso (Giurato, 2017) ed in minima parte (<3%) da altri prodotti edili quali intonaci a base di gesso, stampi e blocchi. A fronte di tale risultato, è stato assunto, nella successiva analisi LCA, che i rifiuti a base di gesso siano costituiti esclusivamente da pannelli in cartongesso *post-consumo*².

Per quantificare i rifiuti a base di gesso gestiti nel sistema regionale, si è invece analizzata la banca dati MUD, fornita da ARPA Lombardia e contenente le dichiarazioni ambientali presentate nel 2014 da tutti i gestori che operano nel settore dei rifiuti. I rifiuti a base di gesso gestiti in regione sono risultati pari a 20.988 t, al netto dell'import (pari a circa 4.419 tonnellate). Sommando a questo valore la quota di rifiuto esportato, risultato pari a circa 10.417 t, è stata stimata una produzione totale regionale pari a 31.405 t (oltre il 40% del dato nazionale stimato). I flussi in gioco risultano piuttosto ridotti se confrontati con quelli degli altri rifiuti inerti C&D gestiti in regione: ad esempio, i rifiuti misti (CER 170904) erano pari nel 2014 a circa 5,6 milioni di tonnellate (Borghi et al., 2017). Inoltre, a differenza degli altri rifiuti inerti C&D, per i quali la percentuale di rifiuto gestito in regione rispetto al quantitativo totale prodotto risultava maggiore del 95% (Rigamonti et al., 2017), nel caso dei rifiuti a base di gesso tale percentuale si riduce al 67% indicando una possibile carenza nel sistema impiantistico regionale per la gestione di questo specifico flusso di rifiuti.

Analizzando nel dettaglio i flussi di rifiuti in gesso avviati alle diverse operazioni di smaltimento e recupero, emerge che il recupero di materia è l'operazione prevalente, pari all'84,8% del gestito totale, mentre lo smaltimento in discarica è decisamente limitato e pari allo 0,3%. La restante parte rappresenta la quota di rifiuto rimasto stoccato nelle stazioni di trasferimento (14,1%) o in deposito preliminare (0,8%) senza subire alcun trattamento successivo. Per capire in che misura il riciclo avviene attraverso operazioni di miscelazione con gli altri rifiuti inerti C&D o mediante trattamento dedicato, è stata svolta un'indagine telefonica rivolta ai gestori dei maggiori impianti che hanno dichiara-

to nel MUD l'operazione di recupero di materia dai rifiuti in gesso per l'anno 2014. È emerso che, in tale anno, era operativo in regione un solo impianto in grado di effettuare un trattamento di recupero ad hoc dei rifiuti in cartongesso. Sulla base dell'esiguo quantitativo di rifiuti in gesso (97 tonnellate) conferito a tale impianto, è risultato che solo lo 0,5% dei rifiuti in gesso gestiti in regione è stato recuperato con un trattamento specifico in impianto dedicato, mentre il restante 99,5% è stato miscelato agli altri rifiuti inerti C&D.

2.2. Impostazione dell'analisi LCA del sistema attuale

2.2.1. Scopo ed obiettivi

Come già introdotto, gli obiettivi dello studio di LCA effettuato in questo lavoro sono volti alla valutazione del sistema attuale di gestione dei rifiuti a base di gesso non pericolosi in regione Lombardia e all'individuazione di possibili scenari alternativi che consentano di ridurre gli impatti ambientali complessivi, al fine di fornire indicazioni sulle strategie e sulle azioni che il governo regionale può intraprendere per migliorare la gestione di tali rifiuti.

La Figura 1 mostra lo scenario attuale di gestione dei rifiuti a base di gesso in regione. Esso prevede due distinti percorsi di trattamento: da un lato (99,5%) la loro miscelazione con gli altri rifiuti inerti negli impianti di riciclo C&D (*route #1*), dall'altro (0,5%) il loro recupero specifico (*route #2*). Per la modellizzazione della *route #1*, si deve fare riferimento allo studio di Borghi et al. (2017). In particolare, l'unità funzionale è 1 tonnellata di miscela di rifiuti C&D in cui i rifiuti a base di gesso costituiscono lo 0,3% in peso e i confini del sistema includono tutti i processi di trattamento ed il trasporto così come l'evitata produzione delle materie prime grazie all'impiego degli aggregati riciclati come aggregati sciolti nella realizzazione di rilevati e sottofondi stradali o in riempimenti e ripristini ambientali.

Nella *route #2* l'unità funzionale è una tonnellata di rifiuti in cartongesso interamente sottoposti ad un trattamento di recupero *ad hoc*, dove, attraverso step di macinazione e vagliatura, viene separata la polvere di gesso dal rivestimento in carta/cartone del pannello; in uscita dal trattamento si ottengono la polvere di gesso riciclato e le frazioni di carta/cartone e metalli, da inviare alle rispettive filiere di recupero. Dati primari relativi all'efficien-

² *Comprendenti sia i pannelli danneggiati o tagliati in modo non idoneo durante la fase di installazione in cantiere, sia i pannelli a fine vita, rimossi dagli edifici durante la fase di decostruzione e restauro.*

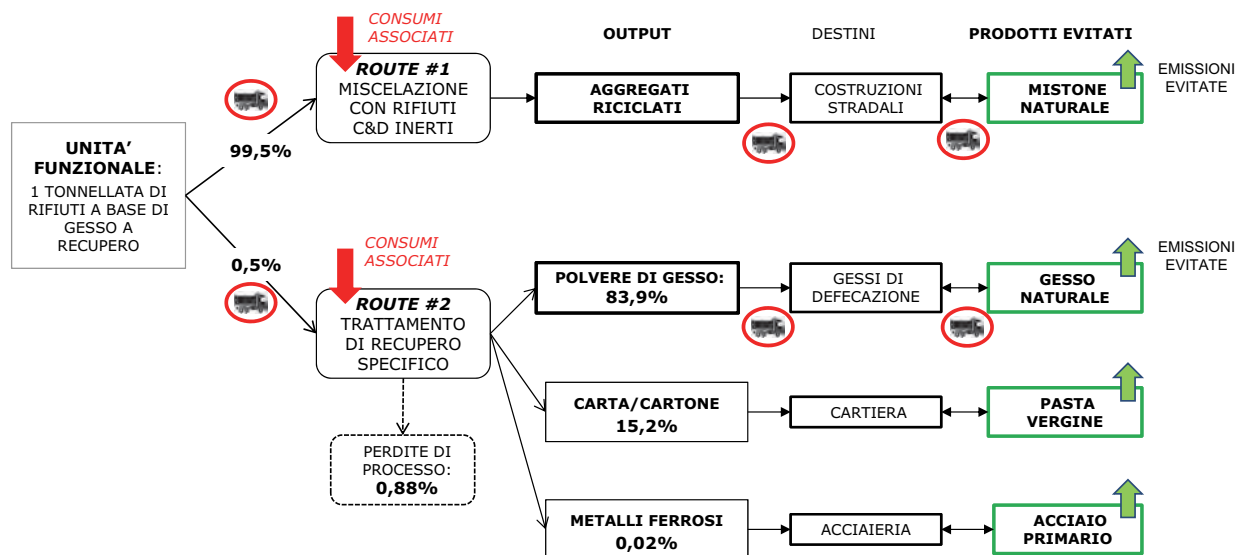


Figura 1 – Schema di flusso del sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi a base di gesso in regione Lombardia, assunto di riferimento per l'analisi LCA dello scenario attuale

za di separazione e ai consumi energetici indotti dal trattamento di riciclo dedicato sono stati raccolti durante il sopralluogo presso l'unico impianto operativo in regione (si veda il paragrafo 2.2.2); in questa occasione, sono state ottenute informazioni anche in relazione alla qualità e al destino di tutti i flussi uscenti dall'impianto. Ciò ha permesso di definire il sistema di riferimento per lo scenario attuale LCA, che si basa sulle seguenti assunzioni:

- la polvere di gesso riciclato è destinata esclusivamente all'utilizzo nella produzione di gessi di defecazione in sostituzione del gesso naturale, ed è inviata ad un impianto situato in provincia di Pavia;
- la carta separata durante il trattamento viene inviata alla cartiera più vicina all'impianto di riciclo dei rifiuti in gesso, dove verrà utilizzata in luogo di pasta vergine, in misura dipendente dalla qualità del flusso separato;
- i metalli ferrosi sono inviati direttamente ad acciaieria, senza alcuno step intermedio di selezione, per produrre acciaio secondario che verrà utilizzato in sostituzione di acciaio primario.

I confini del sistema in esame includono tutti i processi dal momento in cui i rifiuti sono immessi nel sistema, ovvero dal momento della loro produzione nei cantieri, fino alla loro uscita dal sistema in termini di materia prima secondaria o di emissione. Per risolvere il problema della multifunzionalità associata alle operazioni di riciclo, i confini del sistema sono stati espansi per includere gli impatti evitati associati alla produzione dei prodotti pri-

mari, sostituiti dall'impiego delle materie prime secondarie. Si specifica che oltre al trasporto per il conferimento dei rifiuti dai cantieri all'impianto di recupero, sono stati inclusi anche i trasporti di commercializzazione del gesso naturale e di quello riciclato all'impianto di trattamento dei fanghi con produzione di gessi di defecazione.

L'analisi LCA è stata svolta usando il software *SimaPro 8.3* e il database *ecoinvent 3.3* (modello *allocation, recycling content*) considerando due differenti metodi di caratterizzazione già presenti nel software e un indicatore costruito *ad hoc* per il presente studio:

- il metodo ILCD 2011 *Midpoint* (EC, JRC, 2011), per la valutazione degli impatti ambientali. Le categorie di impatto considerate nell'analisi sono il cambiamento climatico, la riduzione dello strato d'ozono, la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni e non cancerogeni), l'assunzione di materiale particolato, la formazione fotochimica di ozono, l'acidificazione, l'eutrofizzazione terrestre, l'eutrofizzazione in acqua dolce, l'eutrofizzazione marina, l'ecotossicità in acqua dolce, l'impoverimento delle risorse idriche e l'impoverimento delle risorse minerali e fossili;
- il metodo CED (*Cumulative Energy Demand*, Frischknecht et al., 2007), per la valutazione degli impatti in termini di consumo di risorse energetiche;
- l'indicatore costruito *ad hoc* quantifica i kg di risorsa minerale naturale (non rinnovabile), in termini di sabbia e ghiaia (*route #1*) e di gesso

naturale (*route #2*), consumati o risparmiati per tonnellata di rifiuto gestito in regione. I valori di questo indicatore sono stati ottenuti sommando i flussi di inventario di sabbia, ghiaia, sabbia e ghiaia e gesso restituiti dal *software* SimaPro; tali flussi vengono quantificati nel *software* sulla base degli *input* ai singoli processi implementati nel sistema, ma non vengono di fatto conteggiati nella categoria di impatto “impoverimento delle risorse minerali e fossili” del metodo ILCD in quanto sono degli “*unmapped flows*”, ossia per questi flussi elementari non sono stati elaborati ad oggi dei modelli di caratterizzazione che permettano di stimarne l’impatto. La valutazione degli impatti per il sistema in esame è stata effettuata singolarmente per le due *routes* che compongono lo scenario attuale. Il risultato complessivo dell’analisi di LCA riferita allo scenario attuale sarà composto dai risultati degli impatti relativi a ciascuna *route*, pesati per i rispettivi flussi.

2.2.2. Analisi di inventario per la route #2

2.2.2.1. Recupero dedicato dei rifiuti in gesso

L’unico impianto di recupero dedicato dei rifiuti in cartongesso operativo in regione nel 2014 è un impianto di tipo fisso, alimentato ad energia elettrica, in cui si effettuano step successivi di macinazione e vagliatura. Il lay-out dell’impianto comprende:

- alimentazione dei rifiuti nella tramoggia di carico mediante ragno meccanico;
- separazione metalli, sia manuale che mediante nastro deferrizzatore;
- prima frantumazione con mulino a coltelli;
- seconda frantumazione con mulino a rulli;
- primo vaglio vibrante;
- terza frantumazione con mulino a rulli;
- secondo vaglio rotante, che separa la polvere di gesso dai residui di cartone.

Dal trattamento si ottiene polvere di gesso con una distribuzione granulometrica che va da 8 mm a 0,063 mm. Il bilancio di massa complessivo dell’impianto risulta il seguente:

- 83,9% gesso in polvere;
- 15,2% rifiuti cellulosici derivanti dalla separazione del cartone;
- 0,02% metalli ferrosi;
- 0,88% perdite di processo.

I dati relativi ai consumi di energia elettrica e di gasolio dovuti al trattamento di riciclo sono stati ricavati attraverso un’elaborazione del conto economico di massima dell’impianto, fornito dal ge-

Tabella 1 – Consumi specifici dell’impianto di recupero dei rifiuti in cartongesso per tonnellata di rifiuto trattata

Tipologia di consumo	Valore
Energia elettrica	6,11 kWh/t
Gasolio	0,44 l/t

store durante la visita tecnica. I consumi specifici sono stati calcolati rispetto alla capacità media annua dell’impianto, pari a 14.080 tonnellate/anno, e sono mostrati nella Tabella 1.

2.2.2.2. Prodotti primari evitati

Nello scenario attuale, in cui il gesso riciclato è impiegato nel trattamento dei fanghi con produzione dei gessi di defecazione, la risorsa primaria risparmiata è il gesso naturale. Al fine di quantificare gli impatti evitati, è stata modellizzata l’attività di estrazione e lavorazione del gesso naturale in regione, così da poter tener conto delle specifiche caratteristiche geologiche del contesto territoriale di riferimento, raccogliendo dati primari presso l’unica cava di gesso naturale attualmente attiva in regione, situata in provincia di Bergamo, e presso l’impianto di lavorazione a suo servizio.

I macchinari presenti nella cava sono un escavatore a martello, con cui si rompe la parete e si frantumano i blocchi di gesso, e due pale meccaniche, con cui si carica la materia prima estratta sui camion per il successivo trasporto all’impianto di lavorazione, distante circa 8 km. I consumi specifici di gasolio dei due macchinari sono rispettivamente pari a 0,15 l/t e 0,19 l/t. Nell’impianto di lavorazione, i blocchi di gesso, di dimensioni di circa 30 cm, subiscono una serie di trattamenti meccanici di frantumazione e vagliatura ed eventuale cottura, variabili a seconda della tipologia di prodotto in gesso che si vuole ottenere e del suo impiego. Nella modellizzazione LCA del prodotto evitato, poiché il settore considerato richiede gesso crudo, non è stata inclusa la fase di cottura (e quindi i consumi del forno), mentre sono state considerate la frantumazione primaria e secondaria ed anche la micronizzazione (frantumazione terziaria), in quanto la pezzatura richiesta in questo settore è molto fine. I valori di consumo energetico sono riportati in Tabella 2: essi sono stati stimati a partire dai dati inclusi nelle schede tecniche dei diversi macchinari.

Per calcolare il quantitativo di gesso naturale risparmiato attraverso l’impiego di gesso riciclato,



Figura 2/a – Sistema di riferimento per lo scenario attuale, con indicazione dei prodotti primari evitati

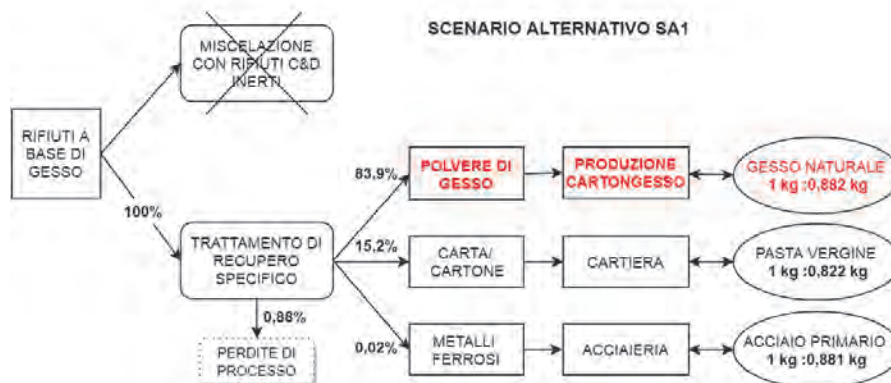


Figura 2/b – Sistema di riferimento per lo scenario alternativo SA1, con indicazione dei prodotti primari evitati

Tabella 2 – Consumi specifici di energia elettrica associati alla lavorazione di 1 tonnellata di gesso naturale

Lavorazione gesso: macchinari	Potenza (kW)	Produzione (t/h)	Consumo specifico (kWh/t)
Frantoio a ginocchiera primario	65	130	0,5
Mulino a martelli secondario	135	70	1,9
Mulino terziario	135	45	3,0

si è considerato il diverso dosaggio del gesso riciclato rispetto a quello naturale nella miscela con i fanghi. Come riferito dal gestore dell'impianto di produzione dei gessi di defecazione che utilizza il gesso riciclato, il dosaggio di gesso riciclato, riferito ad una tonnellata di gesso di defecazione prodotto, è pari al 15%, mentre il dosaggio di gesso naturale è in media del 13,5% (range: 13%-14%), grazie alle minori impurità presenti. Dal rapporto tra il dosaggio del gesso naturale ed il dosaggio del gesso riciclato nella miscela si ottiene un rapporto di sostituzione pari a 0,9 (ossia 1 kg di gesso rici-

clato evita 0,9 kg di gesso naturale – Figura 2/a, scenario attuale).

Oltre al gesso riciclato, dal trattamento si separano rifiuti cellulosici, idonei per il recupero in cartiera, e rifiuti metallici inviati ad acciaieria. Per il riciclo della carta si è assunto che la materia prima sostituita sia la pasta ottenuta da un processo termomeccanico: questo processo è stato scelto in via cautelativa poiché, tra i diversi processi di produzione dei tipi di pasta vergine, il termomeccanico rappresenta quello cui sono associati i minori impatti ambientali. In questo modo, se il riciclo dei rifiuti risulterà vantaggioso considerando questo processo che implica minori impatti evitati, allora i benefici del riciclo saranno ancora maggiori se la risorsa sostituita è stata in realtà prodotta con processi a maggiore impatto ambientale. Per il calcolo del rapporto di sostituzione, si è tenuto conto della purezza della carta in uscita dal processo di recupero del cartongesso (pari a 0,987, corrispondente al valore medio delle risultanze analitiche delle analisi condotte nell'impianto visitato) e di un coefficiente di sostituzione tra pasta secondaria e pasta vergine pari a 0,833 (Rigamonti et al., 2013). Il rapporto di sostituzione finale, ottenuto come prodotto dei due fattori sopra citati, è pari a



Figura 2/c – Sistema di riferimento per lo scenario alternativo SA2, con indicazione dei prodotti primari evitati



Figura 2/d – Sistema di riferimento per lo scenario alternativo SA3, con indicazione dei prodotti primari evitati

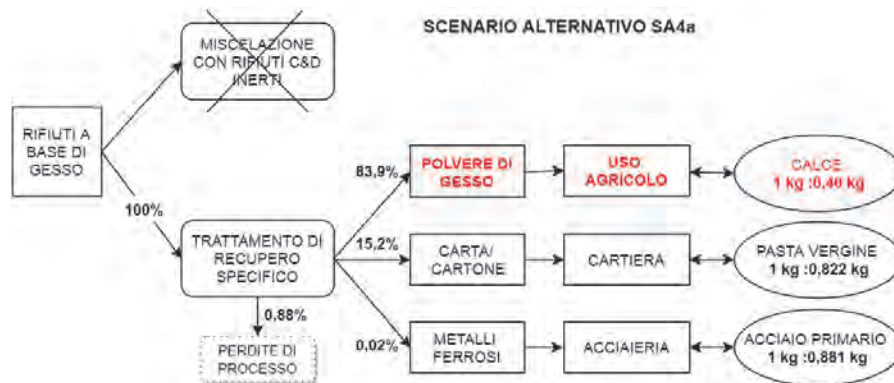


Figura 2/e – Sistema di riferimento per lo scenario alternativo SA4a, con indicazione dei prodotti primari evitati

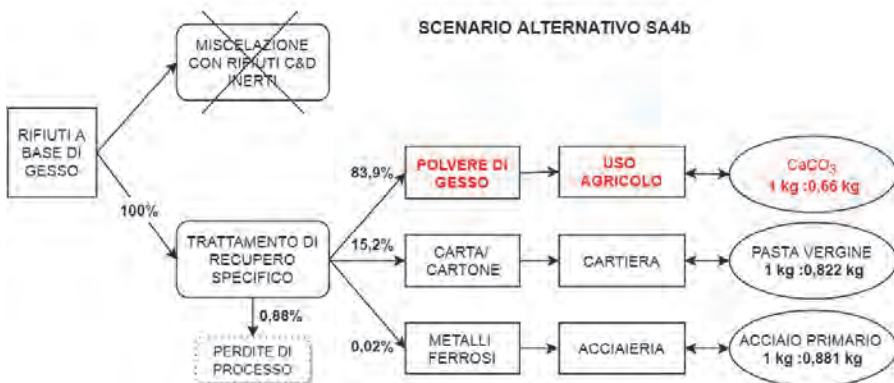


Figura 2/f – Sistema di riferimento per lo scenario alternativo SA4b, con indicazione dei prodotti primari evitati

0,822: ciò implica che 1 tonnellata di rifiuti in carta/cartone separati nell'impianto di riciclo consente di risparmiare 822 kg di pasta vergine (Figura 2). Il riciclo dei metalli è stato modellizzato attraverso un processo costruito *ad hoc* sulla base di un precedente lavoro condotto dal DICA del Politecnico di Milano (Rigamonti et al., 2013). Per il calcolo del rapporto di sostituzione è stato assunto che i metalli separati dal trattamento di riciclo non contengano frazioni estranee, perciò non vi è necessità di uno step di selezione intermedio e non ci sono scarti di lavorazione; l'efficienza di riciclo è pari all'88,1% e la sostituzione tra acciaio secondario e primario è di 1:1 in peso, ipotizzando che l'acciaio secondario abbia le stesse caratteristiche di quello primario. Pertanto, da 1 tonnellata di rifiuti ferrosi si ottengono 881 kg di acciaio secondario, che sostituiscono 881 kg di acciaio primario.

2.2.2.3. Analisi dei trasporti

L'analisi dei trasporti ha riguardato sia il conferimento dei rifiuti dal luogo di produzione all'impianto di recupero dedicato, sia il trasporto dei flussi in uscita dall'impianto di recupero per raggiungere il rispettivo destino finale (impianto di gessi di defecazione, cartiera, acciaieria) che l'evitato trasporto delle materie prime risparmiate (gesso naturale).

- *Distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti*
La modellizzazione dei trasporti per il conferimento dei rifiuti è stata svolta prendendo in esame i moduli di trasporto dei soggetti conferitori dei rifiuti in gesso estratti dalla scheda MUD dell'impianto di riciclo in esame. La distanza media, ottenuta pesando i quantitativi di rifiuti conferiti da ogni produttore per la relativa distanza percorsa, è risultata pari a 31 km.

Per valutare il tipo di mezzi di trasporto (piccola, media e grande taglia), sono stati analizzati in dettaglio i singoli moduli dei soggetti conferitori, da cui si è determinato in che misura il conferimento di rifiuti è avvenuto con mezzi di grandi dimensioni (>32 tonnellate), medie dimensioni (16-32 tonnellate) e piccole dimensioni (3,5-7,5 tonnellate): le relative percentuali sono risultate pari rispettivamente a 7%, 37% e 56%.

Inoltre, si è assunto che i mezzi di conferimento siano composti per un terzo da camion Euro 3, per un terzo da Euro 4 e per un terzo da Euro 5 per ciascuna taglia considerata, non avendo disponibili informazioni sulla classe dei camion.

- *Distanza di trasporto del gesso riciclato e dei flussi di rifiuti in uscita dall'impianto di riciclo*

La distanza di trasporto del gesso riciclato è stata ricavata calcolando la percorrenza stradale tra l'impianto di riciclo e l'impianto di gessi di defecazione in provincia di Pavia, con cui l'impianto di riciclo ha stretto accordi commerciali per la vendita della polvere di gesso riciclato: è risultata pari a 97 km. Per la tipologia di mezzi impiegati si è scelto di utilizzare esclusivamente camion di grandi dimensioni (>32 tonnellate), per ragioni di contenimento dei costi del trasporto, di cui un terzo Euro 3, un terzo Euro 4, un terzo Euro 5.

Considerazione analoga vale per il trasporto dei rifiuti in carta; la tipologia dei mezzi impiegati è la stessa mentre varia la distanza tra l'impianto di riciclo dei rifiuti in gesso e la cartiera; nello scenario attuale, viene considerata la cartiera più vicina all'unico impianto di riciclo presente in regione, distante circa 19 km.

Infine, il trasporto dei rifiuti ferrosi per il conferimento all'acciaieria è stato simulato con camion di grande taglia (>32 t), di cui la metà Euro 3 e la metà Euro 4, assumendo una distanza media di percorrenza in regione pari a 50 km in analogia con lo studio di Rigamonti et al. (2013).

- *Distanza di trasporto dei prodotti evitati*

Nello scenario attuale, il gesso naturale impiegato per produrre i gessi di defecazione è quello proveniente dalla cava attiva in provincia di Bergamo. Quindi, l'evitato trasporto associato alla mancata commercializzazione della materia prima è stato ricavato considerando la distanza stradale tra la cava di Bergamo e l'impianto di produzione dei gessi di defecazione di Pavia, che è risultata pari a 157 km. Si è ipotizzato, in questo caso, che il trasporto avvenga esclusivamente con camion di grandi dimensioni (>32 tonnellate), per ragioni di convenienza economica, di cui un terzo Euro 3, un terzo Euro 4, un terzo Euro 5.

2.3. Scenari alternativi

Nella definizione degli scenari "alternativi" si è partiti dall'ipotesi di voler raggiungere, in futuro, il 100% di riciclo dedicato dei rifiuti in gesso prodotti in regione (pari a 31.405 t nel 2014); ciò implica la necessità di aumentare la capacità di trattamento degli impianti rispetto allo scenario attuale, dove opera un unico impianto con potenzialità annua di poco più di 14.000 tonnellate. Per raggiungere l'obiettivo futuro si dovranno quindi rea-

lizzare almeno due nuovi impianti che effettuano il recupero dedicato dei rifiuti in cartongesso. Si è assunto di localizzarli dove si producono più rifiuti in regione, ossia uno in provincia di Milano e l'altro in provincia di Bergamo; con questa nuova configurazione impiantistica si è stimata una distanza di conferimento dei rifiuti pari a 37 km. Per i nuovi impianti sono stati assunti stessa potenzialità, linea di trattamento e bilancio di massa dell'impianto già presente in regione; inoltre, i quantitativi e i destini dei rifiuti in carta e dei metalli separati sono stati considerati gli stessi mentre varia l'ambito di utilizzo del gesso riciclato. Nello specifico, sono stati valutati quattro diversi scenari di impiego del gesso riciclato ipotizzando che, in futuro, vengano promossi nuovi canali di utilizzo ed esistano mercati locali per il gesso riciclato, in quei settori per cui l'impiego è tecnicamente possibile. Ciò servirebbe anche da incentivo per gli stessi riciclatori, che, a fronte di una domanda forte del gesso riciclato, avrebbero maggior interesse a sviluppare un trattamento *ad hoc* per questi rifiuti. Gli scenari, mostrati in Figura 2, comprendono:

- Scenario SA1: utilizzo del gesso riciclato per la produzione di pannelli in cartongesso, in sostituzione del gesso naturale;

- Scenario SA2: uso del gesso riciclato nei cementifici, in sostituzione del gesso naturale;
- Scenario SA3: impiego del gesso riciclato negli impianti di trattamento dei fanghi da depurazione con produzione di gessi di defecazione, in sostituzione del gesso naturale (destino già analizzato nello scenario attuale);
- Scenario SA4: spandimento del gesso riciclato in agricoltura come correttivo per i terreni a pH acidi, in sostituzione della calce (CaO) o dei prodotti correttivi del terreno a base di carbonato di calcio (CaCO₃), essendo questi prodotti più facilmente reperibili in commercio rispetto al gesso naturale e a costi contenuti.

Poiché cambiano i destini di impiego, nei vari scenari è stato effettuato il calcolo del rapporto di sostituzione basandosi sulle proprietà del gesso riciclato più significative in base agli utilizzi (Figura 2, Tabella 3). In particolare, nello scenario SA1 si è tenuto in considerazione il tenore di solfato di calcio (CaSO₄) presente nel gesso riciclato e nel gesso naturale. Il parametro che più influenza le caratteristiche tecniche-prestazionali nella produzione del pannello è, infatti, in questo caso, la purezza del gesso intesa come titolo di solfato di calcio. Per il gesso naturale, il tenore di CaSO₄ è sta-

Tabella 3 – Destini del gesso riciclato, prodotti evitati, richiesta di mercato dei prodotti primari e trasporti negli scenari alternativi (GR = gesso riciclato, GN = gesso naturale)

Scenari alternativi	Destino gesso	Prodotto evitato	Richiesta di mercato	Fonte dati	Limitazioni gesso riciclato
SA1	Pannelli in cartongesso	Gesso naturale	117.974 t	Produzione pannelli: Assogesso (comunicazione)	Qualità gesso riciclato: Eurogypsum 2015
				Dosaggio: Rivero et al. (2016)	Quantitativo massimo: 30% gesso totale (Eurogypsum, 2015)
SA2	Additivo cemento	Gesso naturale	133.590 t	Produzione cemento: AITEC, 2014	Requisiti gesso riciclato: impurità < 1-2% (impianto produttivo)
				Dosaggio: UNI EN197-1:2011	Quantitativo massimo: non stabilito (5% per l'impianto contattato)
SA3	Additivo nei gessi di defecazione	Gesso naturale	58.573 t	Produzione gessi defecazione: dati Regione Lombardia	Qualità gesso riciclato: non stabilito
				Dosaggio: Impianto trattamento fanghi in provincia PV	Quantitativo massimo: non stabilito
SA4a	Correttivo terreni acidi	Calce	12.040 t*	Superficie agricola e pH suoli: DUSAF, 2010 (dato parziale)	Qualità gesso riciclato: limiti fissati dal D.Lgs 75/2010 per i correttivi
				Dosaggio: Agrical plus (Unicalce)	Quantitativo massimo: dosaggio funzione del pH e della natura del terreno
SA4b	Correttivo terreni acidi	Correttivi a base di CaCO ₃	**	Superficie agricola e pH suoli: DUSAF, 2010 (dato parziale)	Qualità gesso riciclato: limiti fissati dal D.Lgs 75/2010 per i correttivi
				Dosaggio: Dato non disponibile	–
* Dato stimato assumendo il dosaggio medio di calce di 2,5 t/ha e 1,25 t/ha, rispettivamente per interventi di calcitazione e mantenimento dei terreni, effettuati una volta l'anno su una superficie pari all'1% dei suoli agricoli delle province di MI e PV e allo 0,5% delle aree agricole di CO e VA.					
** Valori non riportati a causa della mancanza di dati relativi all'uso dei correttivi a base di CaCO ₃ in agricoltura.					

to dedotto dai dati presentati nel report GtoG e pari al 90,2% (Eurogypsum, 2015); per il gesso riciclato, invece, il valore è stato ricavato dalle analisi effettuate su diversi campioni di gesso riciclato dell'impianto di riciclo in regione ed è risultato, in media, pari al 79,5% (range: 70,7% – 85,5%). Il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e naturale è stato calcolato come rapporto tra la purezza media del gesso riciclato e quella del gesso naturale ed è risultato pari a 0,88.

Nello scenario SA2 il principale problema tecnico è rappresentato dal contenuto residuo di carta rimasta adesa alla polvere di gesso dopo il trattamento di recupero, che può inficiare negativamente sulla presa del cemento e quindi sulle caratteristiche finali del cemento prodotto. Per tale ragione, in questo caso il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e naturale è stato determinato prendendo a riferimento la purezza del gesso in termini di "assenza di impurità" a base di carbonio organico. Nello specifico, per stimare la quantità di gesso naturale evitato, si è considerato il contenuto di COT (Carbonio Organico Totale) nel gesso riciclato e si è determinata la "purezza" come valore complementare al tenore di COT; per i valori medi di COT si è fatto riferimento alle campagne sperimentali condotte su campioni di gesso riciclato presentate nel progetto GtoG (Eurogypsum, 2015). Il rapporto di sostituzione è stato stimato come rapporto tra la purezza media del gesso riciclato così ricavata, pari a 99,15% (range: 96,9% – 99,8% dai dati presentati nel progetto GtoG) e quella del gesso naturale, assunta pari al 100%, in quanto nel gesso di cava non vi è presenza di carta (per cui si può assumere $COT = 0$ e purezza = 1). In questo scenario, quindi, 1 kg di gesso riciclato sostituisce 0,991 kg di gesso naturale.

Nello scenario SA3, invece, il rapporto di sostituzione è stato determinato come rapporto tra il dosaggio medio del gesso naturale e quello del gesso riciclato (come già spiegato nella descrizione dello scenario attuale).

Infine, per gli scenari SA4a e SA4b, poiché in questo ambito di utilizzo il gesso riciclato ha la funzione di correggere il pH acido di un terreno, si è considerato come parametro di riferimento il potere basico del gesso riciclato a confronto con quello dei correttivi ad oggi più in uso. Il potere basico esprime la capacità di rilascio degli ioni OH^- per unità di peso di sostanza usata. Si è quindi calcolato il potere basico sia della calce (scenario SA4a) sia del carbonato di calcio (scenario SA4b), facendo riferimento alle reazioni chimiche che avvengono nel terreno a seguito dell'aggiunta di tali sostanze: i valo-

ri ottenuti sono 0,61 gOH/gCaO e 0,34 gOH/gCaCO₃. Il potere basico del gesso riciclato si ottiene invece moltiplicando il tenore di CaO in esso presente (pari al 37% – valore ricavato dalle analisi sul gesso riciclato condotte dall'impianto di riciclo presente in regione) per il potere basico della calce appena calcolato (0,61 gOH/gCaO): si ottiene 0,22 gOH/gCaSO₄. Nello scenario alternativo SA4a il prodotto sostituito dall'uso del gesso riciclato è la calce viva. I prodotti presenti sul mercato hanno titoli di CaO differenti in base all'uso. È stato preso a riferimento il prodotto in commercio con titolo massimo, pari al 92% di CaO ("Agrical plus" di Unicalce"). Dividendo il potere basico del gesso riciclato per quello della calce (con titolo al 92%), si ottiene un rapporto di sostituzione pari a 0,4 gCaO/gCaSO₄. Nello scenario SA4b, invece, il gesso riciclato sostituisce i correttivi a base di CaCO₃ (che possono raggiungere una purezza superiore al 99%) e dunque il rapporto di sostituzione risulta in questo caso pari a 0,66 gCaCO₃/gCaSO₄.

2.3.1. Analisi di sensitività

Per questi scenari sono state condotte delle analisi di sensitività relative ai rapporti di sostituzione e ai trasporti, riassunte in Tabella 4, per mettere in evidenza sia la variabilità di questi parametri rispetto ai valori assunti nei rispettivi scenari "base", sia la loro influenza sui risultati finali in termini di variazione degli impatti.

Il valore massimo e minimo nell'analisi di sensitività relativa al rapporto di sostituzione è stato calcolato considerando il range del parametro preso a riferimento per la modellizzazione del prodotto evitato; a titolo di esempio, per lo scenario SA1, sono stati assunti i tenori massimo (85,5%) e minimo (70,7%) di solfato di calcio misurati nel gesso riciclato rispetto al valore medio di CaSO₄ nel gesso naturale (90,2%) da cui sono stati calcolati i valori massimo (0,948) e minimo (0,784) del rapporto di sostituzione; rispetto al valore base in SA1 (0,882), il parametro rapporto di sostituzione mostra una variabilità tra +8% e -11%, la più alta in confronto agli altri scenari alternativi (espressa come $\Delta\%$ in Tabella 4). Per quanto riguarda l'analisi di sensitività relativa al trasporto, le distanze massima e minima di trasporto del gesso riciclato e del prodotto evitato sono state valutate considerando il sito di destino (ossia impianto di produzione pannelli, cementificio, impianto di produzione gessi di defecazione, terreni agricoli) più lontano o vicino rispetto all'impianto di recupero dei rifiuti in gesso in regione. Come si può osservare dai valori mostrati in

Tabella 4 – Sintesi delle analisi di sensitività per gli scenari alternativi, al variare del rapporto di sostituzione (RS) e delle distanze di trasporto del gesso riciclato (GR) e dei prodotti evitati (gesso naturale (GN) e calce); per ciascun parametro viene indicata la variazione, in percentuale ($\Delta\%$), rispetto al valore base assunto nello scenario alternativo

Scenario alternativo	Rapporto di sostituzione*			Distanza trasporto gesso riciclato**			Distanza trasporto prodotto evitato**		
	Valore base	Analisi sensitività	$\Delta\%$	Valore base	Analisi sensitività	$\Delta\%$	Valore base	Analisi sensitività	$\Delta\%$
SA1	0,882	RS _{max} = 0,948	8%	T (GR): 253 km	T min (GR) = 158 km	-38%	T (GN): 283 km	T min (GN) = 250 km	-12%
		RS _{min} = 0,784	-11%						
SA2	0,991	RS _{max} = 0,998	0,7%	T (GR): 82 km	T max (GR) = 106 km	29%	T (GN): 152 km	T max (GN) = 152 km	0%
		RS _{min} = 0,969	-2,2%		T min (GR) = 49 km	-40%		T min (GN) = 140 km	-8%
SA3	0,9	RS _{max} = 0,93	3,7%	T (GR): 87 km	T max (GR) = 96 km	10%	T (GN): 142 km	T max (GN) = 76 km	-46%
		RS _{min} = 0,87	-3,7%		T min (GR) = 54 km	-38%		T min (GN) = 130 km	8%
SA4a	0,4	RS _{min} = 0,367	-8,3%	T (GR): 48 km	T max (GR) = 90 km	87%	T (calce): 63 km	T max (GN) = 110 km	87%

* Variazione del rapporto di sostituzione: RS_{max} → SA_{max}; RS_{min} → SA_{min}

** Variazioni della distanza di trasporto: Distanza massima → SAT_{max}; Distanza minima → SAT_{min}

Tabella 4 la variabilità associata al trasporto è molto elevata, se confrontata con il parametro RS.

2.4. Modalità e criteri per la definizione dello scenario futuro migliorativo

Attraverso l'analisi ed il confronto degli scenari alternativi è stato possibile definire lo scenario futuro di gestione dei rifiuti in gesso che tenga conto dei migliori utilizzi del gesso riciclato e che sia realisticamente applicabile al contesto regionale in esame. Per crearlo sono stati considerati congiuntamente quattro aspetti:

- le prestazioni ambientali ottenute dalle analisi LCA associate ai singoli destini di impiego del gesso riciclato (paragrafo 3.3);
- la qualità e il tipo di dati impiegati nell'analisi: si assumono di buona qualità i dati primari direttamente disponibili da fonti ufficiali, rappresentativi del contesto territoriale e del periodo di riferimento mentre sono di bassa qualità i dati ottenuti da stime, utilizzando fonti meno recenti e complete, pertanto affetti da maggior incertezza;
- le limitazioni tecniche del gesso riciclato associate a ciascun destino di utilizzo: si considera sia la rispondenza delle caratteristiche del gesso riciclato ai criteri di qualità stabiliti per ciascun settore di impiego, sia gli eventuali limiti di impiego, se previsti, al fine di garantire adeguata qualità dei prodotti finali (come nel caso del pannello in cartongesso). I requisiti qualitativi

del gesso riciclato derivano dalle normative di riferimento per l'ambito di impiego (gesso agricolo, D.Lgs. 75/2010) oppure sono stabiliti dalle associazioni nazionali di settore (pannelli in cartongesso – Eurogypsum, 2015) oppure sono richiesti da specifici siti produttivi (cementifici);

- la richiesta di mercato di gesso riciclato in Lombardia per ogni destino di utilizzo analizzato, per valutare il rapporto tra domanda e offerta. I risultati di queste elaborazioni sono riportati in Tabella 3 insieme alle fonti dei dati; si specifica che per lo scenario SA1, non essendo presenti stabilimenti di produzione dei pannelli in cartongesso in regione, la richiesta di gesso è stata stimata considerando l'impianto più vicino situato in Piemonte mentre tutti gli altri scenari si riferiscono al contesto della regione Lombardia. A ciascuno scenario alternativo è stato quindi assegnato un peso, sulla base della rispondenza ai quattro criteri analizzati, attraverso cui è stato costruito lo scenario migliorativo futuro.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Scenario attuale

3.1.1. Confronto tra le modalità di trattamento (route #1 vs route #2)

In Tabella 5 sono mostrati i risultati dell'analisi LCA, in termini di impatti specifici per tonnellata

Tabella 5 – Valori degli indicatori di impatto e dell'indicatore di consumo di risorsa naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso prodotto in regione e trattato secondo la route #1 e la route #2; nell'ultima colonna i risultati della route #2 senza il riciclo della carta

	Route #1 (1 t)	Route #2 (1 t)	Route #2 no carta (1 t)
Categorie di impatto ILCD			
Riscaldamento globale (kg CO ₂ eq)	3,4	-158	2,75
Riduzione dello strato d'ozono (kg CFC-11 eq)	9,30E-07	-1,40E-05	4,50E-07
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.) (CTUh)	7,30E-06	-5,00E-05	4,50E-07
Tossicità per l'uomo (effetti canc.) (CTUh)	5,00E-06	-1,00E-05	7,90E-07
Assunzione di materiale particolato (kg PM2.5 eq)	2,90E-03	-0,21	1,60E-03
Formazione fotochimica di ozono (kg COVNM eq)	0,03	-0,73	0,02
Acidificazione (moli H+ eq)	0,02	-1,42	0,02
Eutrofizzazione terrestre (moli N eq)	0,1	-2,73	0,06
Eutrofizzazione (acqua dolce) (kg P eq)	-1,40E-03	-0,12	1,20E-04
Eutrofizzazione (acqua marina) (kg N eq)	0,01	-0,28	5,20E-03
Ecotossicità (acqua dolce) (CTUe)	226	-1330	22,6
Impoverimento risorse idriche (m ³ acqua eq)	0,02	0,22	0,01
Impoverimento risorse minerali e fossili (kg Sb eq)	2,80E-04	-4,30E-03	2,20E-04
Impatto energetico CED (MJ)	65	-3859	44
Consumo di risorsa naturale			
Consumo di sabbia/ghiaia (kg)	-611	-	-
Consumo di gesso naturale (kg)	-	-755	-755

di rifiuto gestito secondo le due modalità di trattamento che compongono lo scenario attuale. I profili ambientali associati alle due *routes*, rappresentative del recupero in miscelazione con i C&D inerti (*route* #1) e al recupero dedicato (*route* #2) dei rifiuti in gesso, differiscono in modo sostanziale: infatti, nella *route* #1 gli indicatori di impatto hanno quasi tutti segno positivo, ovvero rappresentano carichi aggiuntivi mentre nella *route* #2 hanno quasi tutti segno negativo, indicando in questo caso benefici netti.

Tuttavia, se si osservano i contributi percentuali agli impatti delle diverse fasi della gestione rispetto agli impatti dell'intero sistema per la *route* #2, mostrati in Figura 3, si nota che, per quasi tutti gli indicatori, il riciclo di carta e cartone incide sui benefici per oltre il 90% e raggiunge il 98,5% nella categoria di impatto assunzione di materiale particolato ed il 99,5% nell'eutrofizzazione in acqua dolce. Il riciclo di carta e cartone ha impatti in segno positivo solo nell'impoverimento delle risorse idriche (per oltre il 90%), mentre non dà alcun contributo al risparmio/consumo di risorsa naturale così come definito in questo studio. Se non si includesse il contributo del riciclo della carta, gli indicatori di impatto ambientale della *route* #2 avrebbero tutti segno positivo, ad eccezione del consumo di gesso

naturale che si manterrebbe invariato (ultima colonna della Tabella 5). Ciò significa che i soli benefici associati al recupero del gesso (e dei metalli) non sono sufficienti a compensare gli impatti del trattamento stesso e quelli provocati dai trasporti, che hanno un peso determinante sul sistema.

3.1.2. Scenario attuale regionale: impatti totali

Nella Tabella 6 vengono mostrati gli impatti specifici e complessivi dello scenario attuale di gestione dei rifiuti in gesso, ottenuti sommando i risultati delle due *routes* di trattamento (Tabella 5), pesati per il rispettivo flusso.

Dalla Tabella 6 si nota che, essendo il recupero in miscelazione la modalità di trattamento prevalente, gli impatti dell'intero sistema risultano molto simili a quelli associati alla sola *route* #1. Si osserva anche che, sebbene la parte dei rifiuti in gesso che è stata inviata a trattamento dedicato è molto ridotta, questa opzione consente di ottenere un miglioramento delle prestazioni totali del sistema (se paragonate alla sola *route* #1). Questo è particolarmente evidente per le seguenti categorie di impatto: cambiamento climatico (con riduzione percentuale pari a -24%), assunzione di materiale particolato (-34%), eutrofizzazione in acqua dolce (-43%) e impatto energetico (-30%).

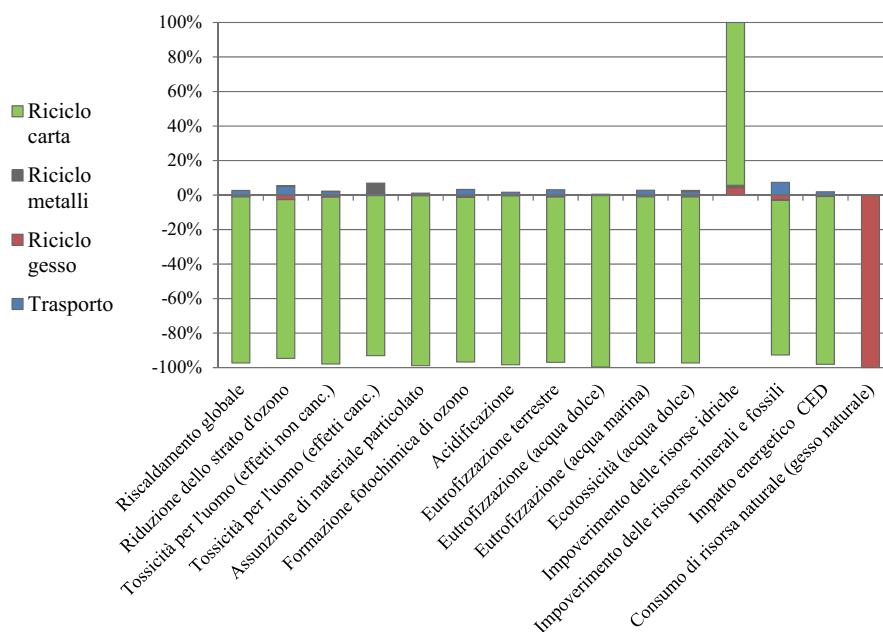


Figura 3 – Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione dei rifiuti agli impatti complessivi del sistema per la route #2

Tabella 6 – Valore degli indicatori di impatto e del consumo di risorsa naturale associati alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso; differenza percentuale calcolata rispetto alla route #1

	Totale specifico (× 1 t)	Differenza (%) ¹	Totale complessivo (× 20.988 t)
Categorie di impatto ILCD			
Riscaldamento globale (kg CO ₂ eq)	2,6	-24	54.464
Riduzione dello strato d'ozono (kg CFC-11 eq)	8,50E-07	-8	0,02
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.) (CTUh)	7,00E-06	-4	0,15
Tossicità per l'uomo (effetti canc.) (CTUh)	4,90E-06	-2	0,1
Assunzione di materiale particolato (kg PM2.5 eq)	1,90E-03	-34	39
Formazione fotochimica di ozono (kg COVNM eq)	2,50E-02	-17	527
Acidificazione (moli H ⁺ eq)	1,80E-02	-10	368
Eutrofizzazione terrestre (moli N eq)	8,90E-02	-11	1.872
Eutrofizzazione (acqua dolce) (kg P eq)	-2,00E-03	-43	-41
Eutrofizzazione (acqua marina) (kg N eq)	8,00E-03	-15	167
Ecotossicità (acqua dolce) (CTUe)	218,29	-3	4.581.430
Impoverimento risorse idriche (m ³ acqua eq)	2,20E-02	5	454
Impoverimento risorse minerali e fossili (kg Sb eq)	2,60E-04	-7	5,42
Impatto energetico CED (MJ)	45	-30	952.594
Consumo di risorsa naturale			
Consumo di sabbia e ghiaia (kg)	-608	0	-12.767.487
Consumo di gesso naturale (kg)	-4	-	-79.244

¹ Calcolata rispetto alla route #1

3.2. Scenari alternativi a confronto: impatti specifici del riciclo del gesso e analisi di sensibilità

I risultati LCA mostrano che, per tutti gli scenari alternativi analizzati, la maggior parte degli indicato-

ri presenta segno negativo (Tabella 7), grazie soprattutto ai benefici derivanti dal riciclo della carta. Per confrontare in modo più immediato i diversi destini di utilizzo del gesso riciclato, sono stati valutati gli impatti associati al riciclo del gesso, trascurando quindi sia il riciclo della carta e dei me-

Tabella 7 – Indicatori di impatto associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione negli scenari alternativi

	SA1 (× 1 t)	SA2 (× 1 t)	SA3 (× 1 t)	SA4a (× 1 t)	SA4b (× 1 t)
Categorie di impatto ILCD					
Riscaldamento globale (kg CO ₂ eq)	-154	-158	-158	-168	-174
Riduzione dello strato d'ozono (kg CFC-11 eq)	-1,4E-05	-1,5E-05	-1,4E-05	-1,4E-05	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.) (CTUh)	-4,9E-05	-5,0E-05	-5,0E-05	-5,3E-05	-5,2E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.) (CTUh)	-1,0E-05	-1,0E-05	-1,0E-05	-1,1E-05	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato (kg PM2.5 eq)	-0,21	-0,21	-0,21	-0,23	-0,23
Formazione fotochimica di ozono (kg COVNM eq)	-0,71	-0,74	-0,73	-0,75	-0,78
Acidificazione (moli H ⁺ eq)	-1,39	-1,42	-1,42	-1,49	-1,54
Eutrofizzazione terrestre (moli N eq)	-2,66	-2,76	-2,73	-2,83	-2,94
Eutrofizzazione (acqua dolce) (kg P eq)	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,13
Eutrofizzazione (acqua marina) (kg N eq)	-0,27	-0,28	-0,28	-0,29	-0,29
Ecotossicità (acqua dolce) (CTUe)	-1305	-1333	-1328	-1383	-1382
Impoverimento risorse idriche (m ³ acqua eq)	0,24	0,24	0,23	0,20	0,19
Impoverimento risorse minerali e fossili (kg Sb eq)	-4,2E-03	-4,4E-03	-4,3E-03	-4,6E-03	-4,4E-03
Impatto energetico CED (MJ)	-3786	-3860	-3855	-4055	-4077
Consumo di risorsa naturale					
Consumo di gesso naturale (kg)	-740	-831	-755	0	0

talli, sia il trasporto per il conferimento dei rifiuti a riciclo; i risultati, riferiti a 1 tonnellata di rifiuti a riciclo, sono riportati in Tabella 7. Nelle Figure 4-7 sono invece mostrati i risultati delle analisi di sensitività relative al rapporto di sostituzione ed alle distanze di trasporto del gesso riciclato e dei prodotti primari evitati per gli indicatori di impatto ritenuti più significativi (riscaldamento globale e impatto energetico), al fine di mettere in evidenza la variazione degli impatti del sistema in ciascun scenario alternativo e di permetterne il confronto con la route #2.

3.2.1. SA1 – Produzione cartongesso

Se si considera il solo processo di riciclo del gesso, si hanno impatti netti associati alle operazioni di recupero, a causa del peso notevole che hanno i trasporti di commercializzazione del gesso riciclato, con distanze molto maggiori rispetto agli altri scenari. Questo profilo mostra un generale peggioramento delle prestazioni ambientali rispetto alla route #2 e, anche massimizzando i benefici del riciclo del gesso (scenario con rapporto di sostituzione massimo – SA1_{max} – e scenario con trasporti minimi – SA1T_{min}), la maggior parte degli indicatori continua a presentare un valore positivo in segno, in quanto gli impatti evitati attraverso l'utilizzo del gesso riciclato non compensano i carichi ambientali dovuti principalmente al trasporto del gesso riciclato agli impianti di cartongesso.

Inoltre, questa analisi di sensitività dimostra quanto il rapporto di sostituzione sia un parametro determinante per il sistema studiato, poiché piccole variazioni (circa il 10%) comportano invece enormi variazioni sugli impatti e sui benefici del riciclo del gesso (con differenze percentuali anche maggiori del 100%).

I grafici in Figura 4 evidenziano quindi che, anche tenendo conto dell'incertezza nella stima del rapporto di sostituzione, lo scenario SA1 in cui il gesso riciclato viene utilizzato nella produzione di nuovi pannelli in cartongesso non garantisce alcun miglioramento delle prestazioni ambientali ed energetiche del sistema rispetto alla situazione attuale (riciclo della route #2), a causa della lontananza dei siti di produzione dei pannelli rispetto al luogo dove viene recuperato il gesso.

3.2.2. SA2 – cementifici

Diversamente dallo scenario precedente, in questo caso il riciclo del gesso porta un beneficio ambientale in quasi tutti gli indicatori (Tabella 7). Dai grafici in Figura 5 si può vedere come al diminuire delle distanze di trasporto di gesso riciclato e gesso naturale il beneficio associato al riciclo risulta maggiore, rispetto allo scenario base SA2; nello scenario SA2T_{min}, infatti, gli impatti evitati crescono rispettivamente del 97% e 87% per le categorie di impatto riscaldamento globale e CED. All'aumentare invece di tali distanze, tutti gli im-

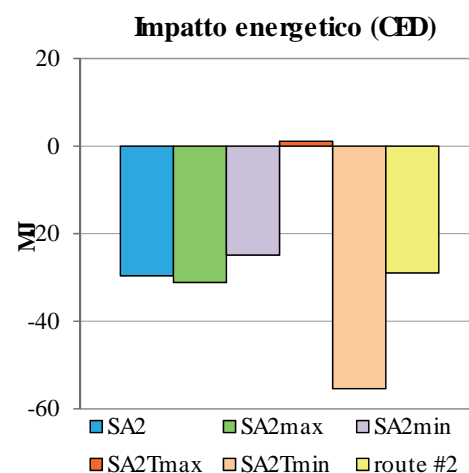
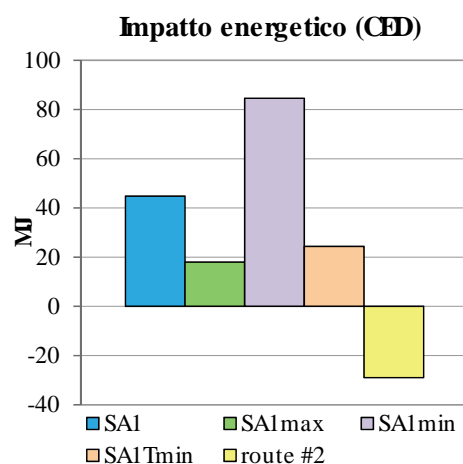
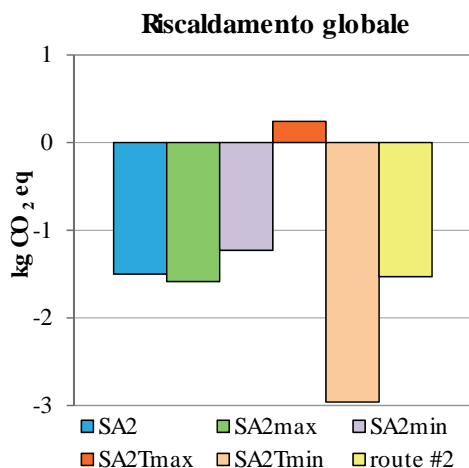
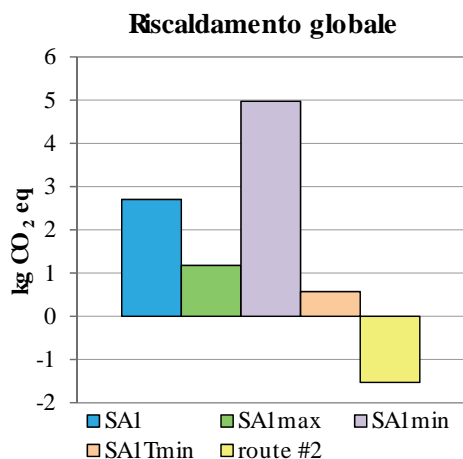


Figura 4 – Confronto del riscaldamento globale e dell'impatto energetico associati al riciclo di una tonnellata di rifiuti in gesso nella route #2 e negli scenari SA1, SA1_{max}, SA1_{min}, SA1T_{min}

Figura 5 – Confronto del riscaldamento globale e dell'impatto energetico associati al riciclo di una tonnellata di rifiuti in gesso nella route #2 e negli scenari SA2, SA2_{max}, SA2_{min}, SA2T_{max}, SA2T_{min}

patti aumentano (del 116% per il riscaldamento globale e del 104% per il consumo di energia) ed alcuni indicatori, come quello per il riscaldamento globale e quello per l'impatto energetico, passano da valori in segno negativo nello scenario base SA2 a valori in segno positivo nel nuovo scenario SA2T_{max}, evidenziando che la valutazione di tali distanze è determinante per le prestazioni del sistema.

3.2.3. SA3 – gessi di defecazione

Guardando solo il trattamento di riciclo del gesso, anche in questo caso, così come nello scenario SA2, il riciclo comporta benefici in quasi tutti gli indicatori considerati (Tabella 7).

I benefici nello scenario SA3 sono inferiori rispetto a quelli nella route #2, nonostante l'impiego del gesso riciclato sia lo stesso nei due scenari. Il motivo di questa differenza è dovuto al fatto che nel-

lo scenario SA3 la differenza tra la distanza di trasporto del gesso naturale e quella del gesso riciclato è inferiore rispetto a quella assunta per la route #2: ciò genera impatti maggiori nello scenario SA3 rispetto al sistema del 2014.

Dal grafico in Figura 6, si nota anche che con il rapporto di sostituzione massimo (scenario SA3_{max}) si ottiene un miglioramento delle prestazioni del sistema (decremento percentuale degli impatti sul riscaldamento globale pari al 35% e sul consumo energetico pari al 32%), mentre se si considera quello minimo si ha un peggioramento delle prestazioni del sistema rispetto allo scenario base SA3, con un incremento percentuale degli impatti rispettivamente pari al 37% e 33%.

Le prestazioni del sistema inoltre peggiorano nel caso in cui si aumenti la distanza di trasporto del gesso riciclato (aumento degli impatti sul riscaldamento globale del 389% e sul consumo energetico del

358%) e migliorano se questa viene ridotta (aumento del beneficio sul riscaldamento globale del 126% e sul consumo energetico del 116%), come atteso.

3.2.4. SA4a e SA4b – uso agricolo

Infine, negli scenari SA4a e SA4b, anche considerando il solo trattamento di riciclo del gesso, gli indicatori risultano tutti con segno negativo, ad eccezione del consumo/risparmio di gesso naturale che risulta nullo in quanto il prodotto evitato in questi scenari non è il gesso naturale ma la calce (SA4a) o i correttivi a base di CaCO₃ (SA4b). I benefici associati al riciclo del gesso, in questi scenari, sono nettamente maggiori rispetto a quelli degli scenari precedenti, anche fino ad un ordine di grandezza per alcuni indicatori come il riscaldamento globale e l'impatto energetico (vedi Tabella 8). Ciò è dovuto perlopiù all'evitato processo di cottura (nei forni alimentati a gas naturale) per la produzione della cal-

ce e dei correttivi a base di CaCO₃. Ciò rende questo destino di utilizzo migliore, dal punto di vista ambientale ed energetico, degli altri scenari futuri alternativi finora analizzati, per i quali gli impatti evitati sono più contenuti, in quanto il prodotto sostituito è il gesso naturale crudo. Inoltre, in questi scenari, i trasporti di commercializzazione sono inferiori, quindi anche questo fattore contribuisce al miglioramento delle prestazioni del sistema. Dall'analisi di sensitività sul rapporto di sostituzione e sui trasporti, mostrata in Figura 7, si osserva che, anche prendendo il valore minimo del rapporto di sostituzione e le distanze di commercializzazione massime, gli indicatori continuano a essere tutti in segno negativo, mostrando che l'utilizzo del gesso riciclato come correttivo dei suoli è, anche in questo caso, il miglior scenario dal punto di vista delle prestazioni ambientali ed energetiche: i benefici associati al riciclo del gesso in questo scenario

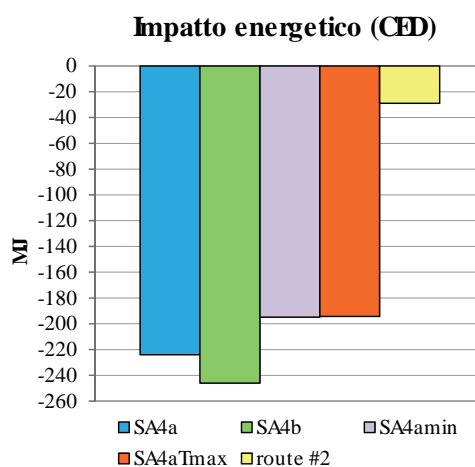
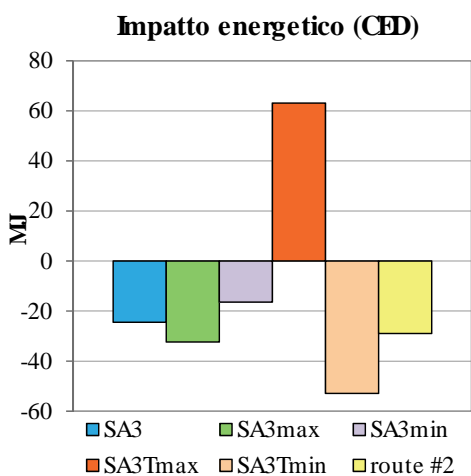
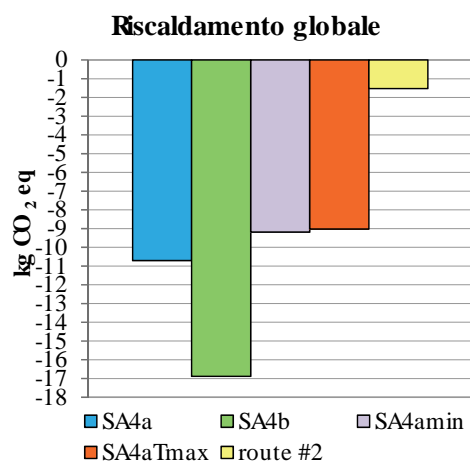
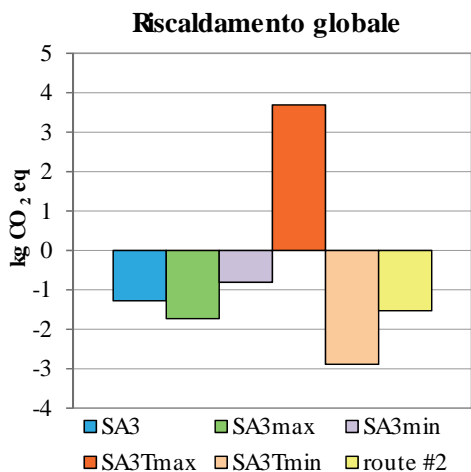


Figura 6 – Confronto del riscaldamento globale e dell'impatto energetico associati al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso nella route #2 e negli scenari SA3, SA3_{max}, SA3_{min}, SA3T_{max}, SA3T_{min}, route #2

Figura 7 – Confronto del riscaldamento globale e dell'impatto energetico associati al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso nella route #2 e negli scenari SA4a, SA4b, SA4a_{min}, SA4aT_{max}, route #2

Tabella 8 – Indicatori di impatto associati al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione negli scenari alternativi

	SA1 (x 1 t)	SA2 (x 1 t)	SA3 (x 1 t)	SA4a (x 1 t)	SA4b (x 1 t)
Categorie di impatto ILCD					
Riscaldamento globale (kg CO ₂ eq)	2,7	-1,5	-1,28	-10,71	-16,89
Riduzione dello strato d'ozono (kg CFC-11 eq)	3,20E-07	-5,80E-07	-3,70E-07	-2,10E-07	-7,90E-07
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.) (CTUh)	2,10E-07	-8,80E-07	-5,70E-07	-3,80E-06	-2,80E-06
Tossicità per l'uomo (effetti canc.) (CTUh)	7,10E-08	-3,70E-08	-3,20E-08	-6,10E-07	-8,00E-07
Assunzione di materiale particolato (kg PM2.5 eq)	1,50E-03	-1,30E-03	-6,20E-04	-1,50E-02	-2,00E-02
Formazione fotochimica di ozono (kg COVNM eq)	0,01	-0,02	-0,01	-0,03	-0,06
Acidificazione (moli H+ eq)	0,02	-0,01	-4,60E-03	-0,08	-0,13
Eutrofizzazione terrestre (moli N eq)	0,04	-0,06	-0,03	-0,12	-0,23
Eutrofizzazione (acqua dolce) (kg P eq)	5,80E-04	4,30E-04	1,10E-04	-4,20E-03	-5,30E-03
Eutrofizzazione (acqua marina) (kg N eq)	3,70E-03	-5,40E-03	-2,30E-03	-1,40E-02	-1,90E-02
Ecotossicità (acqua dolce) (CTUe)	9,71	-18	-13,19	-68,34	-67,7
Impoverimento risorse idriche (m ³ acqua eq)	0,02	0,03	0,01	-0,01	-0,03
Impoverimento risorse minerali e fossili (kg Sb eq)	1,90E-07	-2,30E-04	-1,40E-04	-4,40E-04	-1,90E-04
Impatto energetico CED (MJ)	45	-30	-24	-224	-246
Consumo di risorsa naturale					
Consumo di gesso naturale (kg)	-740	-831	-755	0	0

restano sempre molto più elevati rispetto a quelli degli scenari precedenti, conferendo un “margin” di sicurezza maggiore per il sistema.

3.3. Scenario futuro migliorativo

3.3.1. Definizione dello scenario futuro

La definizione dello scenario futuro si basa sui criteri introdotti al paragrafo 2.4; sono state escluse dall'analisi le alternative rappresentate dagli scenari SA1 e SA4b in quanto SA1 presenta le prestazioni ambientali peggiori rispetto a tutti i destini analizzati, comportando carichi aggiuntivi sull'ambiente. Lo scenario SA4b è stato escluso poiché si è considerato più probabile l'uso della calce (SA4a), essendo più facilmente reperibile sul mercato e più economica dei correttivi a base di CaCO₃. Inoltre, i benefici della calce (SA4a) sono minori rispetto a quelli dei prodotti a base di CaCO₃, quindi la scelta è anche cautelativa.

Gli scenari alternativi rimanenti sono poi stati ordinati, nell'ambito di ciascun criterio, in ordine decrescente: in Tabella 9 si riporta il *ranking* dei tre scenari SA2, SA3 e SA4a per i quattro criteri presi in analisi (nella prima riga di ogni criterio è stato posizionato lo scenario con la valutazione migliore).

Sulla base di queste valutazioni si è scelto di assegnare ai tre scenari lo stesso peso all'interno dello scenario migliorativo, poiché se si considerano le

Tabella 9 – Ranking degli scenari SA2, SA3, SA4a

Prestazioni ambientali	Qualità / tipo di dati	Limitazioni tecniche del gesso riciclato	Domanda di gesso riciclato in regione
SA4a	SA2-SA3	SA3	SA3
SA2	SA4a	SA2	SA2
SA3	/	SA4a	SA4a

prestazioni dei tre scenari rispetto ai 4 criteri considerati, nel complesso, queste risultano bilanciate. Infatti, non c'è uno scenario che abbia una prestazione migliore degli altri in tutti i criteri analizzati e che risulta quindi preferibile.

Riassumendo, avendo come riferimento 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione, lo scenario suggerito è stato definito con le seguenti percentuali:

- un terzo dei rifiuti viene riciclato secondo le modalità definite nello scenario SA2;
- un terzo dei rifiuti segue il trattamento ed il destino dello scenario SA3;
- un terzo dei rifiuti è sottoposto al trattamento e al successivo impiego descritto nello scenario SA4a.

La rappresentazione dello scenario futuro suggerito è riportata in Figura 8.

Per tale scenario è stata effettuata, inoltre, un'analisi di sensitività sui trasporti. Si è deciso di aumenta-

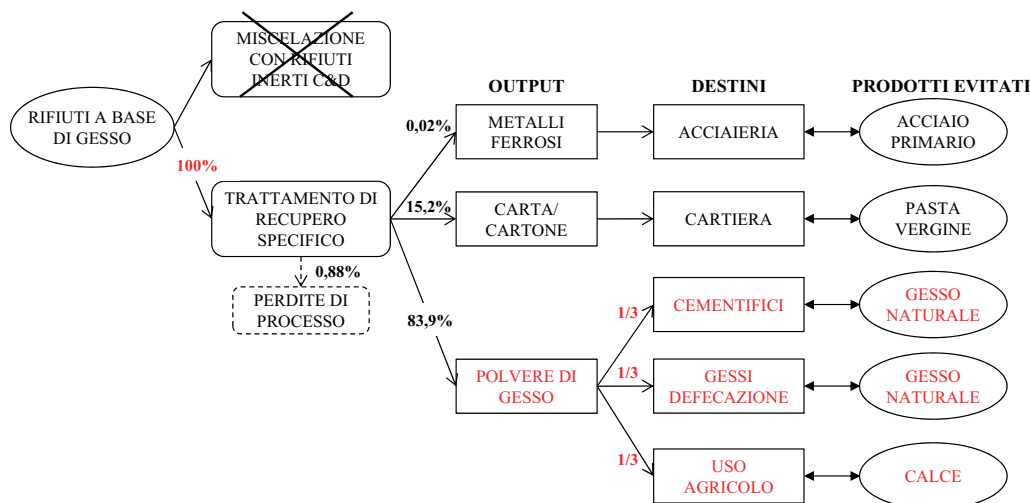


Figura 8 – Sistema di riferimento nell’analisi LCA dello scenario futuro migliorativo suggerito

re la distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti, assumendola pari a 60 km, invece di 37 km come nello scenario base: tale assunzione equivale a considerare nel sistema una fase intermedia di gestione, per il pre-trattamento dei rifiuti o un loro eventuale stoccaggio, prima dell’invio ad uno dei tre impianti di riciclo ipotizzati negli scenari alternativi.

3.3.2. Prestazioni ambientali dello scenario futuro

In Tabella 10 sono riportati i valori degli impatti complessivi nello scenario suggerito, a confronto

con quelli dello scenario attuale, e le relative differenze percentuali.

Dai risultati emerge che lo scenario migliorativo suggerito presenta un sostanziale miglioramento delle prestazioni del sistema rispetto alla gestione attuale. Inoltre, si può vedere che gli indicatori risultano quasi tutti con segno negativo: ciò significa che i benefici associati agli evitati prodotti primari, soprattutto alla mancata produzione di pasta vergine termomeccanica, riescono a compensare gli impatti associati alle operazioni di trattamento dei rifiuti.

Tabella 10 – Indicatori di impatto e consumo di risorsa naturale associati alla gestione di 20.988 t di rifiuti in gesso in regione nello scenario migliorativo suggerito e in quello attuale: valori complessivi e differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario attuale

	Scenario futuro	Scenario attuale
Categorie di impatto ILCD		
Riscaldamento globale (t CO ₂ eq)	-3.390	54
Riduzione dello strato d’ozono (kg CFC-11 eq)	-3,00E-01	1,80E-02
Tossicità per l’uomo (effetti non canc.) (CTUh)	-1,10E+00	1,50E-01
Tossicità per l’uomo (effetti canc.) (CTUh)	-2,20E-01	1,00E-01
Assunzione di materiale particolato (kg PM2.5 eq)	-4.549	39
Formazione fotochimica di ozono (kg COVNM eq)	-15.467	527
Acidificazione (moli H ⁺ eq)	-30.255	368
Eutrofizzazione terrestre (moli N eq)	-58.214	1.872
Eutrofizzazione (acqua dolce) (kg P eq)	-2.538	-41
Eutrofizzazione (acqua marina) (kg N eq)	-5.938	167
Ecotossicità (acqua dolce) (CTUe)	-2,83E+07	4,58E+06
Impoverimento risorse idriche (m ³ acqua eq)	4.675	454
Impoverimento risorse minerali e fossili (kg Sb eq)	-93	5
Impatto energetico CED (TJ)	-82.347	953
Consumo di risorsa naturale		
Consumo di sabbia e ghiaia (t)	-	-12.767
Consumo di gesso naturale (t)	-11.099	-79

Per quanto riguarda l'analisi di sensitività sui trasporti, è emerso che l'aumento del trasporto dei rifiuti peggiora le prestazioni del sistema in modo evidente, soprattutto per le categorie di impatto cambiamento climatico (riduzione percentuale del 1705%), acidificazione (218%), tossicità per l'uomo con effetti non cancerogeni (111%) e per l'impatto energetico (274%). È necessario quindi scegliere con particolare attenzione la posizione dei futuri impianti di riciclo del gesso in regione, in un'ottica di ottimizzazione sia dei trasporti di commercializzazione del gesso ma soprattutto di quelli per il conferimento dei rifiuti, in modo che le distanze siano limitate così come gli eventuali passaggi intermedi.

4. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Dall'analisi dei flussi è innanzitutto emerso che il sistema implementato in regione Lombardia per la gestione dei rifiuti a base di gesso mostra una sottocapacità per il trattamento di questi specifici rifiuti, come dimostrano l'elevato flusso di export e la presenza di un unico impianto ad hoc in regione.

Dal confronto degli impatti specifici, calcolati con metodologia LCA, associati a ciascuna delle due modalità di recupero in uso nel 2014, ossia miscelazione dei rifiuti in gesso con gli altri rifiuti C&D e trattamento dedicato di questo flusso, è emerso che la prima risulta essere molto più svantaggiosa. I risultati mostrano infatti che, avviando i rifiuti a un trattamento dedicato, il miglioramento è netto per tutti gli indicatori considerati; tuttavia, è doveroso sottolineare che il contributo maggiore al beneficio è associato al riciclo della carta separata durante il trattamento dei rifiuti in gesso mentre decisamente minore risulta essere il beneficio associato all'utilizzo del gesso riciclato in sostituzione della materia prima vergine.

A partire dallo scenario attuale, in cui il gesso riciclato viene utilizzato esclusivamente in un impianto di produzione dei gessi di defecazione, sono stati definiti alcuni scenari alternativi, ciascuno rappresentativo di un possibile destino del gesso riciclato: è stato quindi valutato l'uso del gesso riciclato come materia prima secondaria nella produzione di nuovi pannelli in cartongesso, come ritardante nel processo di produzione del cemento e come correttivo nei suoli agricoli. Dai risultati delle simulazioni è emerso che il destino del gesso riciclato che conferisce la migliore pre-

stazione ambientale è quello che ne prevede l'utilizzo in agricoltura come correttivo del pH dei terreni acidi. Lo scenario che ad oggi, invece, è maggiormente svantaggioso rispetto agli altri analizzati è quello in cui la polvere di gesso viene inviata agli impianti di cartongesso per produrre nuovi pannelli; in questo scenario il trasporto del gesso riciclato ha un peso decisivo in termini di impatti ambientali, dovuto al fatto che in Lombardia non ci sono impianti di cartongesso, tantoché i benefici dovuti solo al riciclo del gesso non riescono a compensare gli impatti notevoli associati a questa fase.

Infine, è stato definito un possibile scenario futuro di gestione dei rifiuti a base di gesso che consente di massimizzare i benefici ambientali del riciclo e che risulta applicabile in modo realistico al contesto regionale in esame. In tale scenario la polvere di gesso riciclato è destinata per un terzo ai cementifici, per un terzo alla produzione dei gessi di defecazione e per il restante terzo al settore agricolo. Dal confronto dello scenario futuro con lo scenario attuale si evidenzia un miglioramento considerevole delle prestazioni del sistema di gestione: lo scenario migliorativo suggerito presenta, infatti, un incremento percentuale dei benefici netti per molte categorie d'impatto (al netto del riciclo della carta). L'analisi di sensitività condotta sullo scenario futuro ha mostrato l'importanza di limitare il trasporto di conferimento dei rifiuti, in modo da contenere gli impatti associati a questa fase di gestione; ciò implica che la localizzazione dei nuovi impianti di riciclo in regione deve essere fatta in modo da garantirne la vicinanza ai luoghi di produzione dei rifiuti. Con l'aumento delle distanze, infatti, il margine del beneficio ottenuto con il solo riciclo del gesso diminuirebbe e potrebbe non compensare gli impatti generati dai trasporti. Se non si considerasse l'ingente beneficio del riciclo della carta ma solo quello del gesso, potrebbe essere preferibile indirizzare il gesso riciclato prevalentemente nello scenario agricolo, che è quello che assicura la prestazione ambientale migliore e che garantisce benefici maggiori derivanti dal solo riciclo del gesso, con un margine adeguato per compensare anche l'aumento delle distanze di trasporto.

Dall'analisi si evince, quindi, che per migliorare la situazione attuale ed incrementare l'entità dei benefici derivanti dal riciclo dei rifiuti da costruzione a base di gesso è necessario intervenire con azioni dirette al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- ottimizzare il sistema al fine di ridurre le distanze di trasporto dei rifiuti, limitando gli step intermedi di stoccaggio o pre-trattamento. Sarebbe utile, quindi, un posizionamento strategico degli impianti futuri di riciclo che consenta di avere distanze ridotte, sia per il conferimento dei rifiuti che per la commercializzazione delle materie prime e secondarie;
- potenziare il trattamento specifico di riciclo, che porti, da un lato, alla produzione di gesso riciclato di adeguata qualità per essere usato in tutti i settori in esame e, dall'altro, alla separazione di rifiuti in carta con caratteristiche tali da poter essere inviati nelle cartiere. Per raggiungere questo obiettivo è fondamentale, oltre ad avere una buona efficienza di separazione della carta e dei metalli dal gesso, raggiungibile attraverso l'implementazione di step successivi di macinazione e vagliatura, migliorare la qualità dei rifiuti in ingresso agli impianti di riciclo, ad esempio riducendo le impurità ma soprattutto il grado di umidità dei pannelli a fine vita, in modo che i flussi prodotti in uscita dal trattamento possano essere usati nelle applicazioni più vantaggiose;
- tra i vari destini di utilizzo analizzati per il gesso riciclato, favorire il settore agricolo, perché, in questo caso, il riciclo darebbe più margine per compensare gli impatti, anche maggiorati in caso di aumento dei trasporti;
- ridurre la domanda di gesso naturale potenziando il mercato del gesso riciclato già esistente sul territorio e promuovendo l'apertura e lo sviluppo di nuovi mercati per quegli utilizzi tecnicamente fattibili (es. cementifici e uso agricolo). A tal fine, sarebbe utile non solo sostenere l'utilizzo del gesso riciclato, ad esempio mediante incentivi, ma anche favorire l'incontro tra domanda e offerta di gesso riciclato a livello locale. Sostenendo il mercato del gesso riciclato, i gestori degli impianti avrebbero anche maggiori risorse economiche da investire nella lavorazione dei rifiuti per produrre gesso riciclato di buona qualità e conforme ai requisiti richiesti in ogni settore, in particolare quello agricolo.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AI TEC (Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento). (2014) Relazione annuale 2014. Disponibile su: http://www.aitecweb.com/Portals/0/pub/Repository/Area%20Economica/Pubblicazioni%20AI TEC/Relazione_Annuale_2014.pdf
- Borghi G., Pantini S., Rigamonti L. (2017) Analisi LCA a supporto della pianificazione della gestione dei rifiuti da co-

struzione e demolizione non pericolosi in Lombardia. Ingegneria dell'Ambiente, Vol. 4 (4): 277-288.

DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali). (2010) Report: Uso del Suolo in Regione Lombardia. Disponibile su: http://www.ersaf.lombardia.it/upload/ersaf/publicazioni/I%20dati%20Dusaf%20ed.%202010_13383_392.pdf

European Commission (EC), JRC (Joint Research Center) (2011) Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context – based on existing environmental impact assessment models and factors. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf> (accesso effettuato a novembre 2016)

Eurogypsum (2013) GtoG project LIFE11 ENV/BE/001039, "DA1: Report Inventory of current practices".

Eurogypsum (2015) GtoG project LIFE11 ENV/BE/001039, "DC2: Report Quality criteria for recycled gypsum; technical and toxicological parameters".

Eurostat. (2014) Waste Statistics. Disponibile su: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics (accesso effettuato ad aprile 2017).

Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T., Spielmann M. (2007) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

Giurato M. (2017) Valutazione LCA del sistema di riciclo dei rifiuti a base di gesso in regione Lombardia. Tesi Magistrale. Dipartimento Ingegneria civile e ambientale, Politecnico di Milano. Disponibile su: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/135641>

Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. (2013) Improvement actions in waste management systems at the provincial scale based on a life cycle assessment evaluation. Waste Management, 33: 2568-2578.

Rigamonti L., Pantini S., Borghi G. (2017) Valutazione con metodologia LCA (Life Cycle Assessment) dei flussi e del destino dei rifiuti da costruzione e demolizione. Relazione finale per Regione Lombardia nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra il LEAP (Centro Studi MatER) e la regione Lombardia – anni 2015-2017. Relazione n. 806.7102.90.80.

Rivero A.J., Bàez A., Navarro J.G. (2015) Gypsum waste: differences across ten European Countries. The International Journal of Sustainability Policy and Practice, 11: 1-9. ISSN 2325-1166, doi:10.18848/2325-1166/CGP/v11i04/55358.

Rivero A.J., Sathre R., Navarro J.G. (2016) Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. Resources, Conservation and Recycling, 108: 171-181.

RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato commissionato e finanziato da Regione Lombardia.

Si ringraziano i gestori degli impianti di riciclo e dei siti estrattivi e i responsabili delle aziende contattate durante lo studio per il supporto tecnico e per aver fornito dati primari e informazioni utili per l'analisi LCA.



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2018 è sostenuta da:



ecopneus
il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi



www.ingegneriadellambiente.net

