

# **Centro studi MatER**

## **Materia & Energia da Rifiuti**

per



**Regione Lombardia**

***Direzione Generale Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile***

# **Relazione Finale**

## **Valutazione con metodologia**

### **LCA (Life Cycle Assessment)**

#### **dei flussi e del destino dei rifiuti da**

#### **costruzione e demolizione**

**Ingg. Lucia Rigamonti<sup>1,2</sup> (Responsabile scientifico),**

**Sara Pantini<sup>1,2</sup>, Giulia Borghi<sup>2</sup>**

**Con il supporto di Ing. Marta Giurato<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>LEAP s.c.a r.l.

<sup>2</sup>Politecnico di Milano – Gruppo di ricerca AWARE

**Piacenza**  
**Settembre 2017**

# SOMMARIO

INTRODUZIONE .....	1
1. BILANCIO DI MATERIA DEI FLUSSI DI RIFIUTI C&D PRODOTTI E GESTITI IN REGIONE LOMBARDIA NEL 2014 .....	4
1.1 Stima dei rifiuti non pericolosi C&D prodotti e gestiti in regione .....	5
1.2 Import ed Export dei rifiuti.....	12
1.3 Movimentazione dei rifiuti all'interno della regione Lombardia .....	15
1.4 Stima dei rifiuti inerti C&D prodotti in regione Lombardia nel 2014.....	18
1.4.1 Confronto con il metodo PRGR per la stima della produzione dei rifiuti .....	19
2 SCOPO, OBIETTIVI E RACCOLTA DATI DI INVENTARIO PER L'ANALISI LCA .....	22
2.1 Introduzione.....	22
2.2 Scopo ed obiettivi .....	25
2.2.1 Metodi di caratterizzazione ed indicatori definiti <i>ad hoc</i> .....	27
2.3 Impostazione ed inventario dell'LCA1 (rifiuti misti).....	30
2.3.1 Confini del sistema e unità funzionale.....	30
2.3.2 Inventario dello scenario attuale.....	32
2.3.2.1 Trattamento di riciclo dei C&D misti.....	32
2.3.2.2 Risorse minerali naturali evitate .....	41
2.3.2.3 Analisi dei trasporti .....	55
2.3.2.4 Stoccaggio dei rifiuti .....	58
2.3.2.5 Smaltimento in discarica .....	59
2.3.2.6 Sintesi dei dati di inventario per lo scenario attuale dell'LCA1 .....	59
2.3.3 Scenari alternativi .....	63
2.4 Impostazione ed inventario dell'LCA2 (miscele bituminose).....	66
2.4.1 Confini del sistema e unità funzionale.....	66
2.4.2 Inventario dello scenario attuale.....	71
2.4.2.1 Pre-trattamento del fresato.....	71
2.4.2.2 Riciclo a caldo del fresato (SR1).....	73
2.4.2.3 Riciclo a freddo del fresato (SR2) .....	79

2.4.2.4	Prodotti evitati .....	82
2.4.2.5	Analisi dei trasporti .....	89
2.4.2.6	Sintesi dei dati di inventario per lo scenario attuale dell'LCA2.....	92
2.4.3	Scenari alternativi .....	97
2.5	Impostazione ed inventario dell'LCA3 (rifiuti a base di gesso).....	105
2.5.1	Premessa .....	105
2.5.2	Confini del sistema e unità funzionale.....	106
2.5.3	Inventario dello scenario attuale.....	109
2.5.3.1	Riciclo dei rifiuti a base di gesso.....	109
2.5.3.2	Prodotti evitati .....	114
2.5.3.3	Analisi dei trasporti .....	118
2.5.3.4	Sintesi dei dati di inventario .....	119
2.5.4	Definizione di scenari alternativi per l'analisi LCA3 .....	123
2.5.4.1	Scenario SA1: utilizzo del gesso riciclato nella produzione di pannelli in cartongesso....	126
2.5.4.2	Scenario SA2: utilizzo del gesso riciclato nei cementifici .....	134
2.5.4.3	Scenario SA3: utilizzo del gesso riciclato nei gessi di defecazione .....	142
2.5.4.4	Scenario SA4: utilizzo del gesso riciclato come correttivo dei suoli .....	146
2.5.4.5	Tabelle riassuntive degli scenari alternativi .....	153
3	RISULTATI LCA .....	163
3.1	Risultati dell'analisi LCA1 (rifiuti misti) .....	163
3.1.1	Scenario attuale LCA1.....	163
3.1.2	Scenari alternativi LCA1 .....	168
3.1.2.1	Analisi di diverse modalità di gestione.....	168
3.1.2.2	Analisi di diverse tecnologie di recupero .....	172
3.1.2.3	Analisi dei trasporti .....	175
3.1.2.4	Analisi dei rapporti di sostituzione .....	179
3.1.2.5	Analisi di applicazioni alternative per gli aggregati riciclati.....	184
3.1.3	Scenario ideale LCA1.....	186

3.1.4	Conclusioni LCA1 e raccomandazioni per il miglioramento del sistema di gestione dei rifiuti misti.....	193
3.2	Risultati dell'analisi LCA2 (miscele bituminose) .....	196
3.2.1	Scenario attuale LCA2.....	196
3.2.1.1	Il riciclo a caldo del fresato (SR1).....	196
3.2.1.2	Il riciclo a freddo del fresato (SR2).....	199
3.2.1.3	Impatti specifici del sistema attuale.....	202
3.2.1.4	Impatti complessivi del sistema attuale .....	205
3.2.2	Scenari alternativi LCA2 .....	206
3.2.2.1	Analisi dei dosaggi dei materiali per il confezionamento delle miscele.....	206
3.2.2.2	Analisi delle tecnologie alternative di riciclo del fresato .....	209
3.2.2.3	Confronto tra le tecnologie di recupero del fresato .....	213
3.2.2.4	Analisi dei trasporti .....	216
3.2.3	Scenario migliorativo futuro.....	220
3.2.4	Conclusioni LCA2 e raccomandazioni per il miglioramento del sistema di gestione delle miscele bituminose .....	223
3.3	Risultati dell'analisi LCA3 (rifiuti a base di gesso) .....	225
3.3.1	Scenario attuale.....	225
3.3.2	Scenari alternativi LCA3 .....	231
3.3.2.1	Scenario SA1 .....	231
3.3.2.2	Scenario SA2 .....	241
3.3.2.3	Scenario SA3 .....	250
3.3.2.4	Scenari SA4a e SA4b .....	258
3.3.3	Scenario migliorativo suggerito.....	267
3.3.4	Conclusioni LCA3 e raccomandazioni per il miglioramento del sistema di gestione dei rifiuti a base di gesso .....	276
3.4	Risultati dell'intero sistema di gestione regionale.....	279
	CONCLUSIONI, RACCOMANDAZIONI E SVILUPPI FUTURI .....	286
	Ringraziamenti .....	291
	Bibliografia.....	292





# INTRODUZIONE

Lo scopo del presente studio è la valutazione delle prestazioni ambientali ed energetiche del sistema di gestione e recupero dei rifiuti non pericolosi da costruzione e demolizione (C&D) attualmente implementato in regione Lombardia mediante l'applicazione dell'analisi del ciclo di vita (LCA – Life Cycle Assessment). I risultati hanno evidenziato i punti critici e i punti di forza del sistema attuale e sulla base di questi sono stati formulati possibili scenari migliorativi, anch'essi valutati nell'ottica LCA, al fine di fornire a Regione Lombardia indicazioni sugli obiettivi e le strategie di intervento che permettono di ottenere un sistema di gestione dei rifiuti inerti più sostenibile ed efficiente.

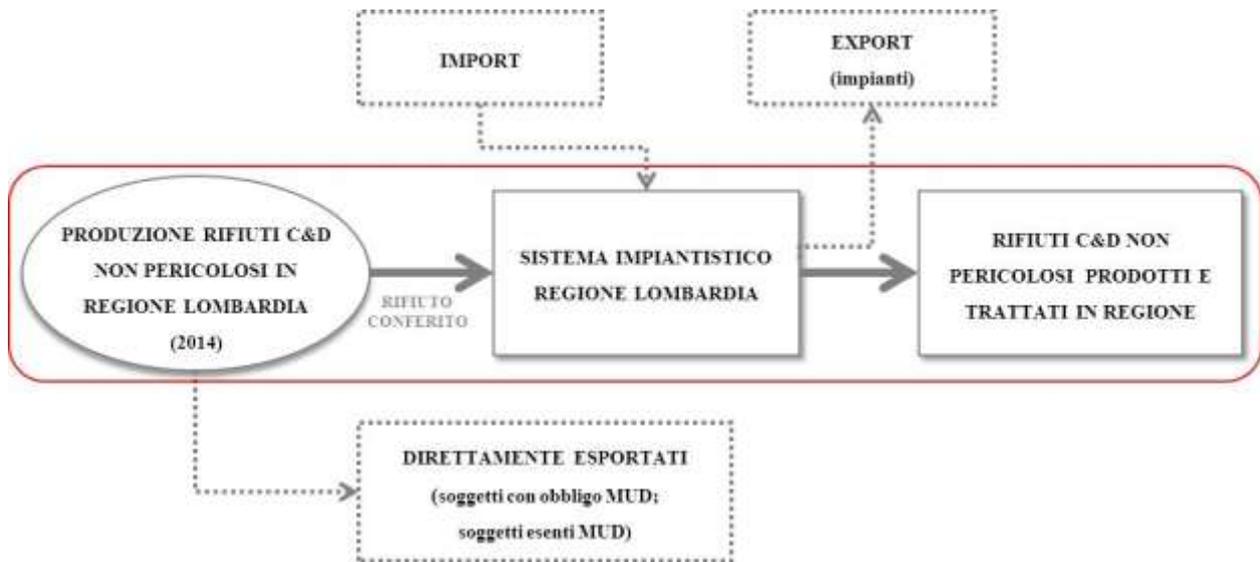
I rifiuti oggetto dello studio sono i rifiuti C&D non pericolosi, appartenenti al Capitolo 17 dell'elenco rifiuti stabilito dalla Decisione della Commissione Europea 2014/955/CE; si specifica che sono esclusi dall'analisi, oltre che i rifiuti pericolosi, anche i codici CER 17 05 (terra, rocce e materiale di dragaggio) e 17 06 (materiali isolanti e materiali da costruzione contenenti amianto) in quanto si è deciso di porre l'attenzione su quelle frazioni minerali inerti dal cui trattamento di recupero si ottengono aggregati riciclati o altre materie prime secondarie che possono essere re-immesse nel settore delle costruzioni, in sostituzione parziale o totale delle risorse naturali.

L'analisi LCA è stata quindi applicata alle seguenti frazioni di rifiuti C&D:

- **CER 17 01** comprendente cemento (**17 01 01**), mattoni (**17 01 02**), mattonelle (**17 01 03**), ceramiche (**17 01 04**) e miscugli di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche non contenenti sostanze pericolose (**17 01 07**);
- **CER 17 03 02**: miscele bituminose non contenenti sostanze pericolose;
- **CER 17 08 02**: materiali da costruzione a base di gesso non contenenti sostanze pericolose;
- **CER 17 09 04**: rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione non contenenti sostanze pericolose.

Per i rifiuti **CER 17 02** (legno, vetro e plastica) e **CER 17 04** (metalli) è stata effettuata una stima dei flussi prodotti in regione ma la loro gestione non è stata oggetto di valutazione del ciclo di vita.

L'anno di riferimento per l'analisi è il 2014 ed i confini del sistema coincidono con i confini del sistema impiantistico regionale, come mostrato in Figura 1, ovvero sono esclusi dalla valutazione LCA sia i rifiuti di provenienza extraregionale che sono stati trattati negli impianti della regione (Import) sia i rifiuti prodotti in Lombardia ma che hanno avuto un destino di trattamento finale al di fuori della regione (Export).



**Figura 1.** Ambito di applicazione dello studio di LCA.

Fase essenziale per la predisposizione dello studio di valutazione ambientale è la raccolta dei dati di base e delle informazioni necessarie a definire un quadro conoscitivo aggiornato e approfondito sulle operazioni di gestione dei rifiuti inerti, sulla produzione di aggregati riciclati e sulle connessioni con le specifiche filiere di utilizzo dei materiali riciclati. In Tabella 1 è riportata una sintesi delle aree di indagine, per ciascuna delle quali sono evidenziate le fonti dati, le informazioni raccolte e le modalità di indagine.

I soggetti e gli Enti di riferimento individuati e coinvolti nella fase di acquisizione dei dati sono stati:

- Agenzia Regionale Protezione Ambiente della Lombardia (ARPAL), per l'acquisizione del database AnalisiMUD 2014
- Province della regione Lombardia, per il reperimento dei dati statistici delle cave e la valutazione della produzione di aggregati naturali in regione
- Associazioni delle categorie di riferimento (Associazione Nazionale Produttori di Aggregati Riciclati - ANPAR, Associazione Nazionale Estrattori Produttori Lapidari e Affini - ANEPLA, Associazione Nazionale Costruttori Edili - ANCE, ASSOGESSO)
- Produttori di aggregati riciclati (impianti di trattamento e recupero dei rifiuti inerti) e di aggregati naturali; impianti di riciclo del fresato e dei rifiuti a base di gesso
- Utilizzatori finali dei materiali riciclati: imprese stradali contattate tramite ANCE, cementifici, produttori gessi di defecazione.

Considerato l'ampio spettro di informazioni qualitative e quantitative da reperire, sono stati adottati due diversi approcci:

- indagine indiretta: volta a quantificare, attraverso l'acquisizione e l'elaborazione delle banche dati MUD, i flussi di rifiuti prodotti e gestiti nel 2014 all'interno del sistema impiantistico regionale in relazione alla loro destinazione finale. Una sintesi delle modalità di elaborazione MUD adottate e dei

risultati dell'indagine sono presentati nel Capitolo 1; per maggiori informazioni si rimanda all'Allegato 1;

- indagini dirette: comprendono sopralluoghi tecnici svolti presso i maggiori impianti di recupero e l'invio di questionari informativi ai diversi soggetti coinvolti nella filiera di recupero dei rifiuti inerti, al fine di approfondire la conoscenza relativamente ai processi e alle tecnologie di trattamento adottate, di raccogliere dati primari relativi ai consumi e alle efficienze del trattamento, nonché di definire le caratteristiche qualitative dei materiali riciclati prodotti ed il loro effettivo impiego. La metodologia adottata per le indagini dirette e i risultati ottenuti sono descritti nel Capitolo 2; per i dati raccolti presso i singoli impianti si rimanda agli Allegati 2.1-2.3.

**Tabella 1.** Aree di indagine dello studio, fonti dei dati, informazioni raccolte e modalità di indagine.

AREA	FONTE	INFORMAZIONI	MODALITA'
PRODUZIONE E GESTIONE RIFIUTI	ARPAL	Quantità rifiuto prodotto	INDAGINE INDIRETTA  Elaborazione banca dati MUD
		Quantità rifiuto gestito	
		Movimentazione dei rifiuti	
		Import/Export	
		Rifiuto avviato a recupero	
		Rifiuto avviato a smaltimento	
		Numero e localizzazione degli impianti	
RECUPERO/ RICICLO DEI RIFIUTI	IMPIANTI DI TRATTAMENTO (ANPAR, ARPAL)	Modalità di trattamento	INDAGINE DIRETTA  Sopralluoghi tecnici Indagini telefoniche Questionario impianti
		Consumi associati	
		Quantità e tipologie di aggregati riciclati	
		Destini di utilizzo degli aggregati riciclati	
		Mercato degli aggregati riciclati in regione	
		Altri rifiuti prodotti dal trattamento	
SETTORE DI UTILIZZO DEGLI AGGREGATI RICICLATI	NORME TECNICHE	Requisiti tecnici e idoneità all'utilizzo	INDAGINE INDIRETTA
	UTILIZZATORI (ANCE)	Tipologia e quantità di materiali impiegati (naturali /riciclati)	INDAGINE DIRETTA
	Imprese stradali	Prestazioni tecniche aggregati riciclati	Indagini telefoniche
	PRODUTTORI conglomerati bituminosi misti cementati cementifici	Caratteristiche degli impianti	INDAGINE DIRETTA
		Tipologie e quantità di materie prime naturali e secondarie impiegate	Sopralluoghi tecnici
RISORSE NATURALI	PIANI CAVE	Volumi autorizzati e distribuzione cave	INDAGINE INDIRETTA
	STATISTICHE CAVE Responsabili Province	Quantità cavate	INDAGINE DIRETTA
		Consumi associati	Schede statistiche cave
	PRODUTTORI AGGREGATI NATURALI	Destini vendita aggregati naturali	INDAGINE DIRETTA
	PRODUTTORI AGGREGATI NATURALI	Modalità di coltivazione	INDAGINE DIRETTA
		Caratteristiche impianti, bilanci e consumi	Sopralluoghi tecnici

# 1. BILANCIO DI MATERIA DEI FLUSSI DI RIFIUTI C&D PRODOTTI E GESTITI IN REGIONE LOMBARDIA NEL 2014

Il bilancio di massa complessivo dei rifiuti C&D non pericolosi prodotti e trattati all'interno del sistema impiantistico regionale nell'anno 2014 è stato ricostruito separatamente per ciascuno dei codici CER in esame, mediante elaborazione della banca dati MUD fornita da ARPAL. Tale fase di elaborazione è risultata necessaria in quanto, al momento della predisposizione del presente studio non erano ancora disponibili i dati statistici ufficiali annualmente presentati da ISPRA (rapporto rifiuti speciali); tali dati, inoltre, vengono di solito presentati in forma aggregata per la macro-categoria dei C&D non pericolosi e non a livello di dettaglio dei singoli codici CER, e pertanto non utilizzabili ai fini del presente studio. Si specifica inoltre che per questa specifica tipologia di rifiuti non è stato possibile utilizzare direttamente il database O.R.SO. in quanto i dati in esso contenuti risultano parziali e relativi ai soli produttori di rifiuti per i quali la normativa vigente impone la presentazione delle dichiarazioni MUD (i.e. produttori con più di 10 dipendenti). Pertanto la produzione dei rifiuti è stata stimata a ritroso a partire dal rifiuto gestito negli impianti della regione, essendo quest'ultimo un flusso pienamente tracciato in quanto non esistono esclusioni in capo ai gestori. L'analisi dei dati MUD è stata effettuata senza aggregazione ovvero andando ad esaminare ogni codice CER separatamente, prendendo a riferimento i moduli di gestione compilati da tutti i soggetti che hanno gestito/trattato/smaltito ciascun codice CER analizzato. L'elaborazione della banca dati MUD è stata condotta seguendo le indicazioni metodologiche di ISPRA secondo le quali i flussi devono essere calcolati al netto degli step intermedi di gestione (nel caso in cui il rifiuto abbia più impianti di destino prima di raggiungere il trattamento finale) e dei rifiuti importati da fuori regione (*Import*).

Come descritto in dettaglio nell'Allegato 1, l'elaborazione dei dati MUD è stata condotta attraverso tre diversi step:

- *STEP 1: raggruppamento dei dati MUD in funzione della tipologia di impianto*

Tale classificazione è necessaria per poter distinguere i flussi di rifiuti in funzione del destino finale e per poter quindi valutare il bilancio di massa complessivo del sistema di gestione in regione Lombardia.

- *STEP 2: stima dei flussi di rifiuti di provenienza e destinazione extra-regionale (Import/Export) e dei flussi diretti e secondari per le diverse tipologie di impianto considerate*

I flussi di rifiuto in ingresso agli impianti di provenienza extraregionale (*Import*) sono stati calcolati sulla base dei moduli RT (rifiuto ritirato da terzi) contenuti nella scheda MUD di ciascun impianto, estraendo i soli moduli associati a Terzi fuori regione o estero (RT<sub>fuori\_regione</sub>). Il rifiuto transitato attraverso gli impianti regionali e successivamente trattato fuori regione (*Export<sub>impianti</sub>*) è stato valutato sulla base dei moduli DR (rifiuto consegnato a terzi) dichiarati dall'impianto, selezionando i soli moduli con destinatario fuori regione

( $DR_{\text{fuori\_regione}}$ ). A questo contributo viene sommato il quantitativo di rifiuto direttamente conferito dai produttori in regione ad impianti fuori regione ( $Export_{\text{diretto}}$ ), per stimare il flusso totale in uscita dalla Lombardia ( $Export$ ).

- *STEP 3: controllo e verifica del dato*

Sono state effettuate, anche contestualmente alle precedenti fasi di elaborazione, alcune operazioni di verifica del dato in modo da individuare ed eliminare possibili fonti di errore o incertezze. Tali operazioni di controllo e verifica includono l'eliminazione dei possibili duplicati dei moduli di gestione presenti nelle schede MUD, il controllo del bilancio di massa degli impianti e la verifica della corrispondenza tra moduli DR dell'impianto conferitore e i moduli RT dell'impianto destinatario, condizione essenziale affinché la stima del rifiuto gestito risulti valida. Per maggiori dettagli si rimanda all'Allegato 1.

## **1.1 Stima dei rifiuti non pericolosi C&D prodotti e gestiti in regione**

Nello specifico, la quantità di rifiuti prodotti e trattati in regione Lombardia (indicata come “*Gestito*”) è stata stimata sulla base dei quantitativi in ingresso ed in uscita dichiarati dagli impianti, che sono stati raggruppati in quattro tipologie in base all'operazione primaria di trattamento effettuata: stoccaggio (R13), recupero (R2-R12), discarica (D1) e altro smaltimento (D9, D13, D14, D15). La classificazione degli impianti è stata effettuata secondo le seguenti modalità:

1. Impianti di stoccaggio: impianti che hanno svolto esclusivamente operazione di messa in riserva (R13), oppure in misura prevalente operazione R13 (>90% del totale a trattamento), nonché gli impianti che hanno dichiarato esclusivamente rifiuto in giacenza a recupero;
2. Impianti di recupero: impianti che hanno dichiarato una o più operazioni di recupero R (diverse da R13);
3. Impianti discarica: impianti che hanno dichiarato esclusivamente operazioni di smaltimento definitivo D1 (tutto il rifiuto conferito agli impianti viene smaltito senza che vi siano flussi di rifiuti in uscita);
4. Impianti di altro smaltimento: impianti che hanno svolto una o più delle operazioni di smaltimento diverse da D1 (per il tipo di rifiuti analizzato corrispondono essenzialmente alle operazioni D9, D13, D14 e D15) oppure che hanno dichiarato esclusivamente rifiuto in giacenza a smaltimento.

La stima del rifiuto *Gestito* si basa quindi sul bilancio di massa degli impianti, al fine di escludere le eventuali giacenze di rifiuto a fine 2013, e non sui quantitativi di rifiuto dichiarati nelle operazioni di recupero R e/o smaltimento D, in quanto questi ultimi dati risultano più incerti e sovrastimati a causa delle gestioni intermedie (soprattutto relativamente alle operazioni R13 e D15). Al fine di evitare conteggi multipli

nel computo del rifiuto gestito, sono state “eliminate” le fasi intermedie del ciclo di gestione rappresentate dai cosiddetti *flussi secondari*; infatti, il rifiuto in ingresso agli impianti è stato “scomposto” in un *flusso diretto*, che rappresenta il rifiuto direttamente conferito agli impianti dai produttori dei rifiuti, e un *flusso secondario*, ovvero il rifiuto che è transitato attraverso altri impianti regionali prima di raggiungere l’impianto di destino finale. Sono stati inoltre calcolati i flussi di rifiuto gestiti in regione di provenienza extra-regionale (Import) ed i rifiuti prodotti in regione ma trattati in impianti fuori regione (Export), in modo da poterli escludere dalle stime. Il rifiuto “gestito” complessivamente in regione Lombardia, al netto delle gestioni intermedie, è stato determinato sommando i flussi diretti in ingresso alle quattro categorie di impianti considerate; per maggiori dettagli in merito alle assunzioni e alle modalità di calcolo si rimanda all’Allegato 1.

In Tabella 2 sono sintetizzati, per ciascun codice CER in esame, i risultati ottenuti dalle elaborazioni dei dati MUD. I flussi di rifiuti, espressi in tonnellate, riportati in Tabella 2 comprendono: i rifiuti regionali in ingresso alle diverse tipologie di trattamento, specificando i *flussi diretti e secondari* entranti; i rifiuti in uscita aventi come destino altri impianti della regione (*flusso uscente*); i rifiuti trattati secondo ciascuna modalità, calcolati come differenza tra il rifiuto regionale in ingresso all’impianto ed il flusso uscente dallo stesso; il *Trattato* in regione Lombardia è ottenuto sommando i quantitativi trattati in ciascuna tipologia di impianto.

Si sottolinea che i quantitativi totali di rifiuto gestito e rifiuto trattato in regione Lombardia risultano tra loro uguali; ciò è dovuto all’assunzione che tutto il rifiuto che rimane all’interno dell’impianto (pari al rifiuto in ingresso meno il flusso uscente) sia pari al quantitativo effettivamente trattato (si trascurano le giacenze a fine 2014) e al fatto che i flussi di rifiuto uscenti ed i flussi secondari entranti coincidono avendo ipotizzato la corrispondenza tra i moduli DR e RT.

Sulla base dei risultati delle elaborazioni presentate in Tabella 2 sono stati ricostruiti i bilanci di massa complessivi dei rifiuti C&D non pericolosi all’interno del sistema impiantistico regionale nell’anno 2014, mostrati nelle Figure 2-5 per ciascuno dei codici CER analizzati; la successiva Tabella 3 mostra le percentuali di rifiuto avviato a recupero, a discarica e ad altro smaltimento e il rifiuto rimasto stoccato negli impianti di messa in riserva R13 ovvero il rifiuto che, nell’anno di analisi, non è stato avviato ad un successivo trattamento di recupero o smaltimento.

**Tabella 2.** Valori stimati del rifiuto diretto alle diverse tipologie di impianti (*Flusso diretto*), del rifiuto trattato per ciascuna tipologia (*Trattato*) e del rifiuto gestito (*Gestito RL*) e trattato (*Trattato RL*) complessivamente in regione Lombardia, calcolati sulla base del rifiuto in *Ingresso* (di provenienza regionale), del rifiuto secondario entrante e del flusso uscente dagli impianti, in relazione ai codici CER analizzati (valori espressi in tonnellate).

	<i>Tipologia impianto</i>	Ingresso <sub>reg</sub> (t)	Flusso <sub>secondario</sub> (t)	Flusso <sub>diretto</sub> (t)	Flusso <sub>uscente</sub> (t)	Trattato (t)	Gestito (RL) (t)	Trattato (RL) (t)
<b>CER 17 01</b>	Stoccaggio (R13)	160.567	7.981	152.586	114.898	45.669		
	Recupero (R2-R12)	715.496	119.863	595.633	11.226	704.270		
	Discarica (D1)	13.704	2.332	11.371	0	13.704	763.950	763.950
	Altro smaltimento (D2-D15)	4.363	4	4.359	4.056	307		
<b>CER 17 03 02</b>	Stoccaggio (R13)	94.758	16.294	78.464	26.256	68.502		
	Recupero (R2-R12)	944.365	61.432	882.933	51.411	892.954		
	Discarica (D1)	9.247	578	8.668	0	9.247	971.656	971.656
	Altro smaltimento (D2-D15)	1.591	0	1.591	638	954		
<b>CER 17 08 02</b>	Stoccaggio (R13)	16.700	4.989	11.711	13.749	2.951		
	Recupero (R2-R12)	21.000	14.310	6.690	3.207	17.793		
	Discarica (D1)	71	0	71	0	71	20.988	20.988
	Altro smaltimento (D2-D15)	3.837	1.321	2.516	3.664	173		
<b>CER 17 09 04</b>	Stoccaggio (R13)	638.119	71.682	566.437	334.876	303.243		
	Recupero (R2-R11)	5.277.411	424.748	4.852.663	157.481	5.119.930		
	Discarica (D1)	197.887	6.478	191.409	0	197.887	5.625.978	5.625.978
	Altro smaltimento (D2-D15)	15.478	9	15.469	10.560	4.918		

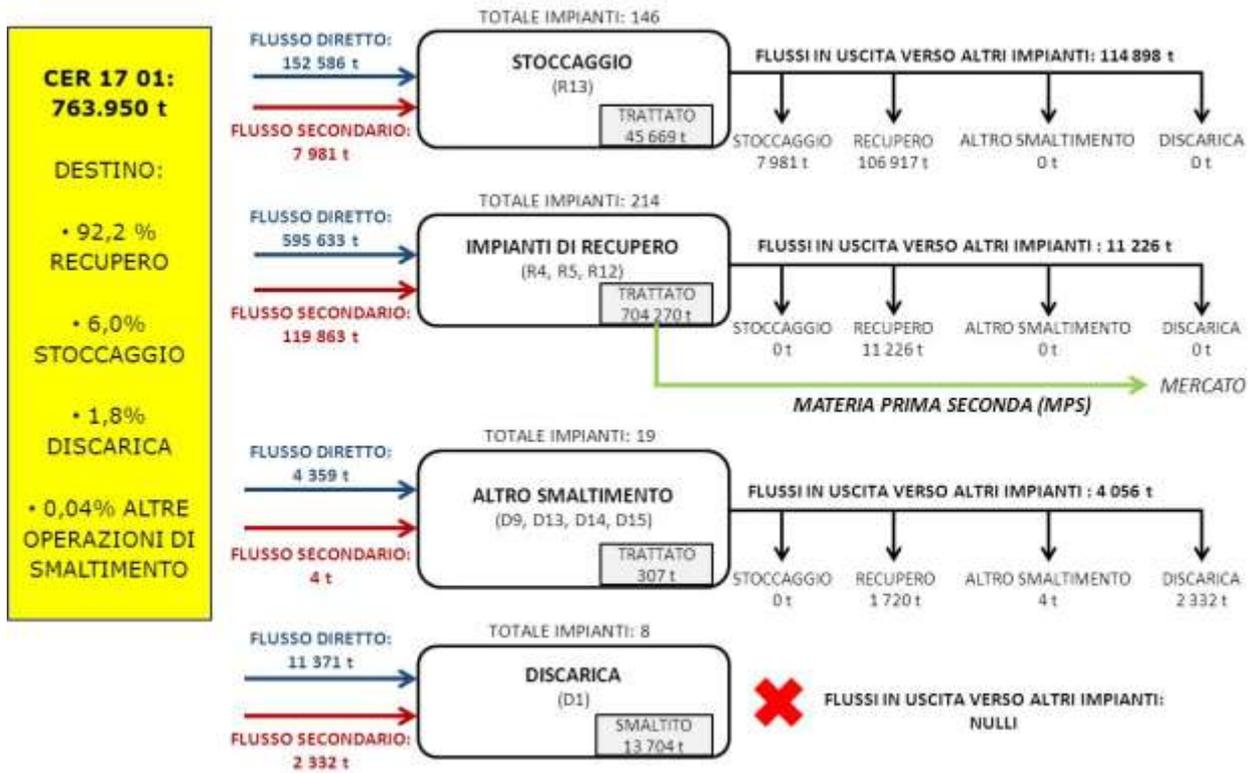


Figura 2. Bilancio di massa complessivo per il rifiuto 17 01 (comprendente i CER 170101, 17 0102, 170103 e 170107) e relative percentuali di destino alle diverse tipologie di trattamento.

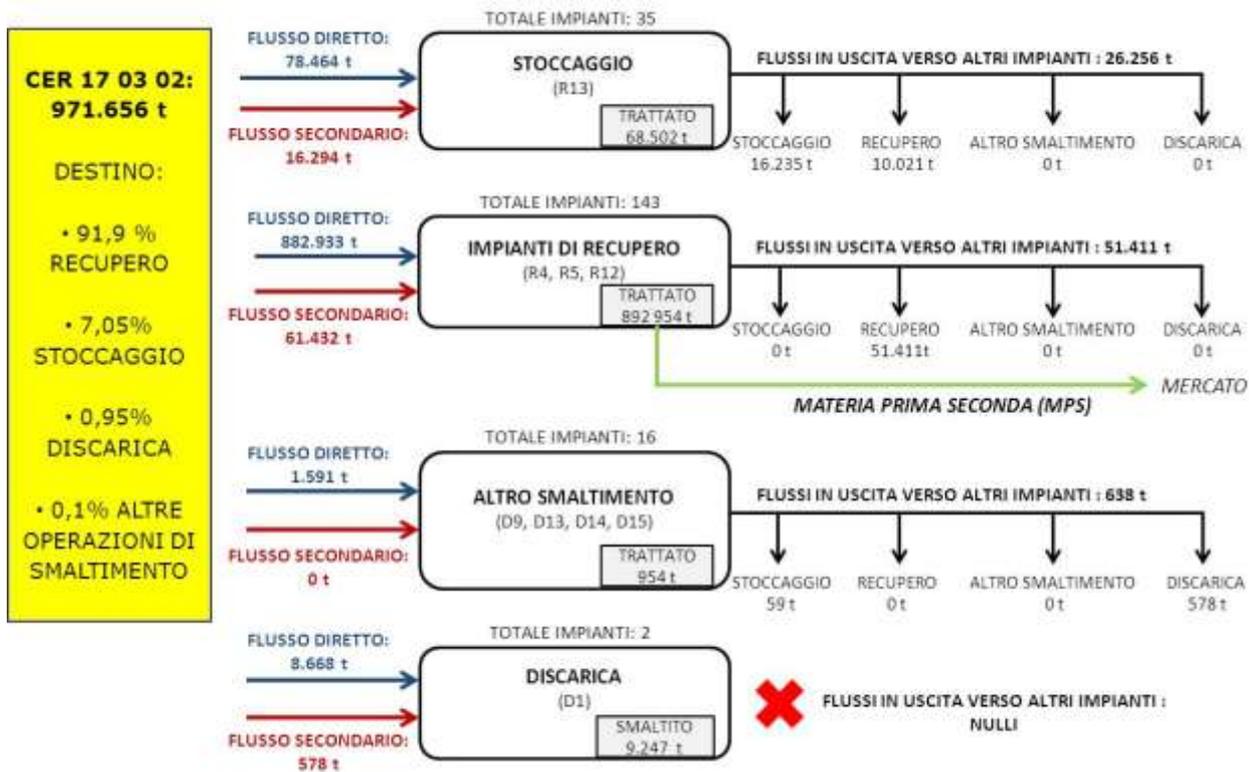


Figura 3. Bilancio di massa complessivo per il rifiuto 17 03 02 (miscela bituminose) e relative percentuali di destino alle diverse tipologie di trattamento.

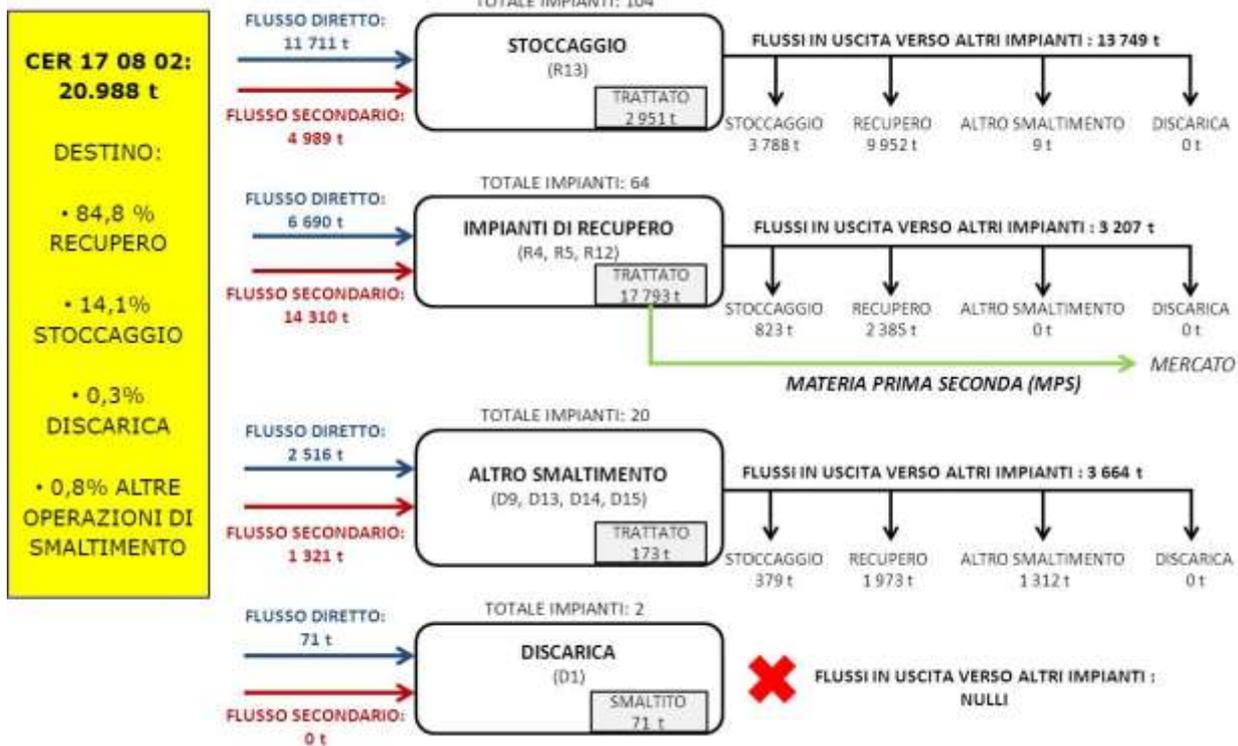


Figura 4. Bilancio di massa complessivo per il rifiuto 17 08 02 (rifiuti a base di gesso) e relative percentuali di destino alle diverse tipologie di trattamento.

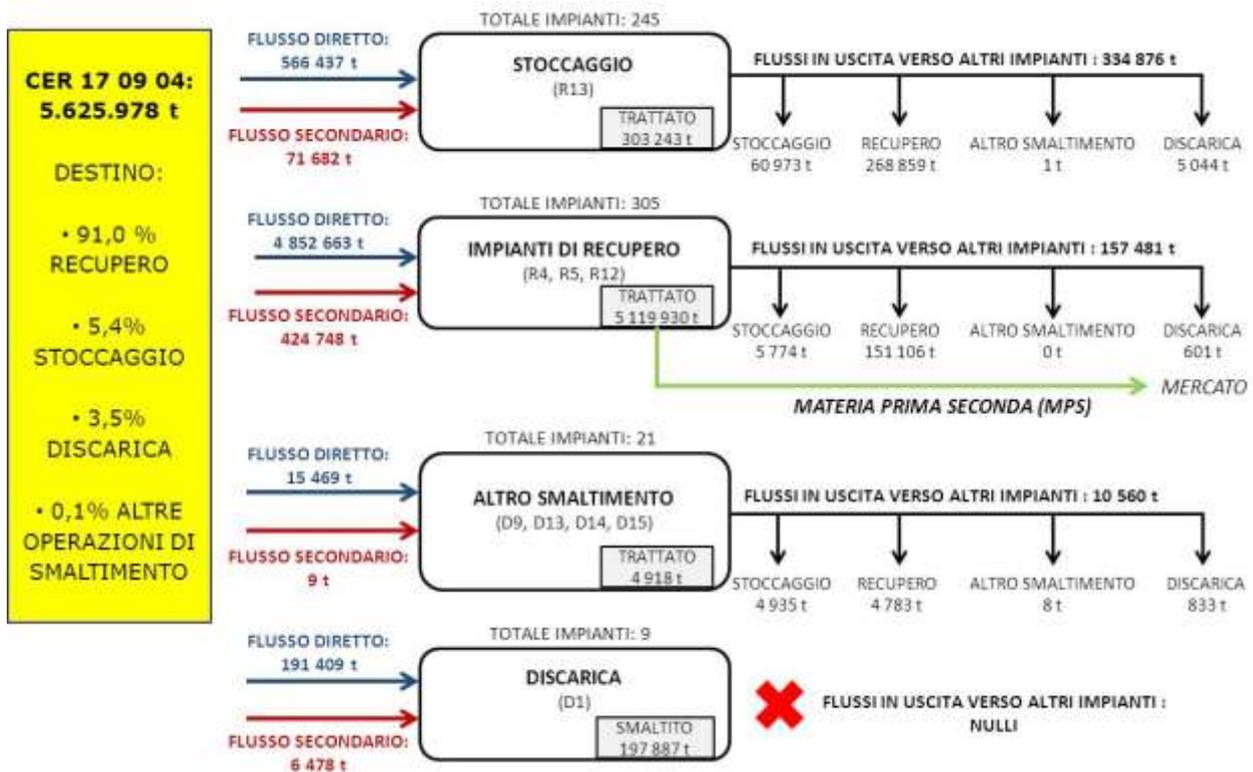


Figura 5. Bilancio di massa complessivo per il rifiuto 17 09 04 (rifiuti misti da costruzione e demolizione) e relative percentuali di destino alle diverse tipologie di trattamento.

**Tabella 3.** Gestione dei rifiuti inerti C&D, per i codici CER in esame, in regione Lombardia nell'anno 2014: rifiuto totale gestito (tonnellate) e relative percentuali di trattamento.

<b>RIFIUTO</b>	<b>GESTITO (t)</b>	<b>STOCCAGGIO (%)</b>	<b>RECUPERO (%)</b>	<b>DISCARICA (%)</b>	<b>ALTRO SMALTIMENTO (%)</b>
CER 17 01	763.950	6,0%	92,2%	1,8%	0,0%
CER 17 03 02	971.656	7,1%	91,9%	1,0%	0,1%
CER 17 08 02	20.988	14,1%	84,8%	0,3%	0,8%
CER 17 09 04	5.625.978	5,4%	91,0%	3,5%	0,1%
<i>TOTALE</i>	<i>7.382.572</i>	<i>5,7%</i>	<i>91,2%</i>	<i>3,0%</i>	<i>0,1%</i>

Come si può notare dalle Figure 2-5 e dalla Tabella 3, il ricorso alla discarica rappresenta una percentuale piuttosto ridotta rispetto alle altre modalità di gestione, pari a circa il 3,5 % per i rifiuti misti 17 09 04, all'1,8 % per i rifiuti della categoria 17 01, allo 0,95% per le miscele bituminose e inferiore allo 0,5% per i rifiuti a base di gesso.

I risultati evidenziano infatti che questi rifiuti vengono indirizzati principalmente verso gli impianti di recupero, con percentuali che si attestano sopra al 90%, ad eccezione dei rifiuti a base di gesso, per i quali si stima che circa l'85% del totale gestito in regione venga trattato negli impianti di recupero mentre il 14% rimane stoccato all'interno degli impianti di messa in riserva. Per questo tipo di rifiuti, inoltre, è emerso un maggior flusso in uscita verso altre regioni (cfr. paragrafo 1.2), diretto principalmente verso il Piemonte, dove sono presenti impianti specifici per il trattamento dei rifiuti a base di gesso; ciò potrebbe essere indicativo di una "sotto-capacità" del sistema impiantistico regionale per quanto riguarda il recupero di questo tipo di rifiuti.

I risultati mostrati in Tabella 3 evidenziano che i flussi maggiori sono associati ai rifiuti misti (CER 17 09 04) con circa 5,6 Mt complessivamente gestite nel 2014, il 91% dei quali è stato sottoposto ad operazioni di recupero di materia. La presenza cospicua di materiali misti è indicativa di una scarsa pratica di demolizione selettiva, volta a raggruppare materiali a matrice omogenea direttamente alla fonte, e potrebbe inoltre condizionare la qualità dei materiali riciclati ottenuti dal recupero di tali rifiuti. Tuttavia è doveroso sottolineare che, come verrà presentato nel Capitolo 2, durante i sopralluoghi effettuati presso gli impianti di recupero che hanno trattato prevalentemente i rifiuti misti 17 09 04, è stato osservato che tali rifiuti risultano costituiti, in misura prevalente, da cemento e solo in alcuni casi contengono anche terre da scavo, presentano un moderato contenuto di mattoni, mattonelle e ceramiche mentre il tenore di materiali estranei indesiderati, quali legno, plastiche, carta e cartone, gesso, risulta piuttosto limitato. La maggior parte degli impianti esaminati, infatti, richiede ai propri conferitori che il rifiuto consegnato sia "pulito" così da ottenere aggregati riciclati di migliore qualità, applicando rigide procedure di controllo sul rifiuto in ingresso e rigettando i carichi non conformi. Ciò nonostante, l'assegnazione del codice CER identificativo del rifiuto

viene effettuata dal produttore dei rifiuti che, per ragioni cautelative, tende a classificarlo come rifiuto misto 17 09 04.

Come mostrato nelle Figure 2-5, il sistema impiantistico regionale si compone di un numero piuttosto cospicuo di impianti di trattamento e smaltimento; tenendo conto del fatto che gli impianti hanno trattato uno o più codici CER, il numero complessivo di impianti in regione che nel 2014 hanno ricevuto e trattato i codici CER in esame risulta pari a: 378 impianti di recupero, 13 discariche, 51 impianti di altro smaltimento e 346 di messa in riserva. In Tabella 4 viene indicata nel dettaglio la localizzazione degli impianti sul territorio della regione, ponendo l'attenzione sugli impianti di recupero e sulle discariche. Riguardo i primi, questi appaiono concentrati nelle province di Milano (70 impianti), Bergamo (53), Brescia (56) e Pavia (35); come emerso dall'analisi dei soggetti conferitori (moduli RT), queste province corrispondono a quelle in cui si produce il maggior quantitativo di rifiuti (vedi paragrafo 1.3, Tabella 9). In relazione alle discariche, la provincia di Brescia risulta quella con il maggior numero (pari a 5), seguita da Milano (3) e da Monza Brianza (2).

**Tabella 4.** Localizzazione degli impianti di recupero e delle discariche sul territorio regionale (2014)

PROVINCIA	# IMPIANTI RECUPERO	# DISCARICHE
BG	53	0
BS	56	5
CO	26	0
CR	22	0
LC	14	0
LO	11	0
MB	27	2
MI	70	3
MN	24	1
PV	35	1
SO	11	1
VA	29	0
<b>TOTALE REGIONE</b>	<b>378</b>	<b>13</b>

## 1.2 Import ed Export dei rifiuti

L'elaborazione dei dati delle schede MUD ha permesso di evidenziare anche la movimentazione dei rifiuti C&D non pericolosi in Lombardia, in relazione all'origine dei flussi in ingresso e alla destinazione dei flussi in uscita dal territorio regionale.

Più precisamente, le informazioni in merito ai quantitativi e provenienza dei flussi extra-regionali in ingresso (*Import*) sono state ottenute dalle elaborazioni dei moduli RT associati alle schede MUD degli impianti; in questi moduli sono infatti riportate le informazioni circa la località del soggetto conferitore del rifiuto e dell'impianto ricevente. In totale, nel 2014, sono entrate 608.815 tonnellate di rifiuti C&D non pericolosi così suddivise: 47.075 t per il CER 17 01, 174.389 t per il CER 17 03 02, 4.419 t per il CER 17 08 02 e 382.931 t per il CER 17 09 04. In Tabella 5 sono riportati, per ciascuna tipologia di impianto, il rifiuto totale conferito (in tonnellate) e la percentuale di rifiuto di provenienza extra-regionale (*Import*). Per i codici CER esaminati, i flussi maggiori di rifiuti importati si sono riscontrati principalmente negli impianti di recupero e di messa in riserva; se si guarda invece al quantitativo smaltito in discarica, la quota di rifiuti di provenienza extra-regionale è piuttosto ridotta (1,3 - 1,9%) o addirittura nulla per quanto riguarda le miscele bituminose (CER 17 03 02) e i rifiuti in gesso (CER 17 08 02).

**Tabella 5.** Rifiuto totale conferito agli impianti della regione ( $RT_{tot}$ ), espresso in tonnellate, e percentuale di provenienza extra-regionale (%*Import*).

Tipologia impianto	CER 17 01		CER 17 03 02		CER 17 08 02		CER 17 09 04	
	$RT_{tot}$ (t)	% <i>Import</i>						
Stoccaggio (R13)	147.765	6,7	41.213	11,5	13.425	3,7	604.049	12,7
Recupero (R2-R12)	709.611	5,2	930.178	17,1	23.000	17,1	4.928.866	5,3
Discarica (D1)	13.965	1,9	9.247	0	71	0	200.432	1,3
Altro smaltimento (D2-D15)	4.057	3,1	1.685	6	3.251	0,1	12.571	1,3

Analizzando nel dettaglio l'origine dei rifiuti importati e trattati negli impianti della Lombardia, si nota che questi flussi provengono principalmente dalle regioni confinanti, ovvero Emilia Romagna, Piemonte e Veneto, come si può vedere dalle percentuali riportate in Tabella 6.

**Tabella 6.** Provenienza dei rifiuti di Import in ingresso agli impianti della regione Lombardia; valori percentuali calcolati rispetto al flusso di Import relativo a ciascun codice CER. In grassetto sono evidenziate le regioni da cui provengono i maggiori quantitativi.

	<b>CER</b>	<b>1701</b>	<b>170302</b>	<b>170802</b>	<b>170904</b>
Estero		1,9%	2,8%	0,4%	1,4%
ABRUZZO		0,2%	0,0%	0,0%	0,5%
BASILICATA		0,1%	0,0%	0,0%	1,9%
CALABRIA		0,1%	0,2%	0,0%	0,1%
CAMPANIA		3,7%	0,9%	0,8%	2,2%
<b>EMIL.ROM.</b>		<b>38,5%</b>	<b>25,7%</b>	<b>8,8%</b>	<b>31,4%</b>
FRIULI VEN. GIU.		0,3%	0,1%	0,3%	0,2%
LAZIO		4,5%	0,8%	0,5%	7,3%
LIGURIA		2,7%	2,7%	3,6%	16,9%
MARCHE		0,5%	0,0%	0,1%	0,8%
MOLISE		0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>PIEMONTE</b>		<b>27,9%</b>	<b>23,0%</b>	<b>28,3%</b>	<b>24,2%</b>
PUGLIA		11,3%	0,1%	0,0%	1,4%
SARDEGNA		1,1%	0,0%	0,0%	0,0%
SICILIA		0,4%	0,1%	0,1%	0,4%
TOSCANA		0,5%	0,0%	0,8%	3,0%
TRENTINO ALTO ADIGE		0,1%	11,5%	29,0%	0,2%
UMBRIA		0,3%	0,0%	0,0%	0,0%
VALLE D'AOSTA		0,0%	0,1%	4,5%	0,2%
<b>VENETO</b>		<b>6,0%</b>	<b>32,1%</b>	<b>22,3%</b>	<b>7,7%</b>
ND		0,0%	0,0%	0,6%	0,0%
	<b>TOTALE</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Un'analisi analoga è stata condotta sui flussi di rifiuti in uscita dal territorio regionale (*Export*), mediante l'analisi dei moduli DR associati alle schede MUD degli impianti.

Si specifica che i rifiuti consegnati a terzi fuori regione (“Export<sub>tot</sub>”, colonna A in Tabella 7) comprendono sia i rifiuti direttamente esportati dai produttori con obbligo di compilazione MUD (“Export<sub>diretto</sub>”, colonna C in Tabella 7) sia i rifiuti che sono transitati attraverso il sistema impiantistico regionale per poi essere destinati ad impianti fuori regione (“Export<sub>impianti</sub>”, colonna B in Tabella 7); per maggiori dettagli riguardo le modalità di calcolo si rimanda all’Allegato 1.

È doveroso sottolineare che sono esclusi dal conteggio i rifiuti direttamente esportati dai produttori non aventi obbligo di compilazione MUD, in quanto non quantificabili attraverso il Database AnalisiMUD2014 della regione Lombardia, motivo per il quale i quantitativi di rifiuti direttamente esportati (riportati in colonna C in Tabella 7) potrebbero essere in realtà sottostimati. I risultati di queste elaborazioni hanno evidenziato che, nel 2014, sono complessivamente uscite dal territorio regionale (Export<sub>tot</sub>) circa 323.678 tonnellate di rifiuti inerti C&D (per i codici CER esaminati). Il principale flusso uscente riguarda il rifiuto

misto (CER 17 09 04), con 225.661 tonnellate, seguito dalle miscele bituminose (CER 17 03 02), con 46.924 tonnellate, e dai rifiuti a base di cemento, mattoni e mattonelle (CER 17 01), con 40.675 tonnellate, mentre il flusso minore è associato ai rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02) con 10.417 tonnellate. I risultati presentati in Tabella 7 evidenziano inoltre che, rispetto al flusso totale in uscita dal territorio regionale, il contributo principale deriva dai rifiuti direttamente esportati dai soggetti in regione (circa 83%) mentre la parte di rifiuti transitati attraverso gli impianti regionali e consegnata a terzi fuori regione è piuttosto ridotta (circa 17%).

**Tabella 7.** Rifiuto totale in uscita dal territorio regionale (colonna A), suddiviso nei contributi di rifiuti direttamente esportati (colonna C) e rifiuti transitati negli impianti e successivamente destinati fuori regione (colonna B); valori espressi in tonnellate

<b>CER</b>	<b>Export<sub>tot</sub> (t)</b> <b>(A)</b>	<b>Export<sub>impianti</sub> (t)</b> <b>(B)</b>	<b>Export<sub>diretto</sub> (t)</b> <b>(C)</b>
17 01	40.675	9.189	31.487
17 03 02	46.924	1.665	45.259
17 08 02	10.417	4.870	5.547
17 09 04	225.661	38.149	187.512
<i>Totale</i>	<i>323.678</i>	<i>53.873</i>	<i>269.805</i>

Analizzando nel dettaglio le quote di rifiuti esportati, si nota che le regioni destinatarie sono prevalentemente il Piemonte, l'Emilia-Romagna ed il Veneto; a titolo di esempio, oltre l'87% dei rifiuti da costruzione a base di gesso (CER 17 08 02) in uscita dalla regione è stato conferito in Piemonte, in particolare ad un impianto di recupero della Saint Gobain specializzato nel trattamento di questa specifica tipologia di rifiuti (vedi Allegato 2.3.2).

**Tabella 8.** Destinazione dei rifiuti in uscita dal territorio regionale nel 2014, espresse in percentuali e calcolate rispetto al valore di  $Export_{tot}$  di ciascun codice CER. In grassetto sono evidenziate le regioni verso le quali sono diretti i maggiori flussi in uscita.

CER	1701	170302	170802	170904
Estero	0,2%	0,0%	0,0%	0,5%
ABRUZZO	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
BASILICATA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CALABRIA	0,0%	3,6%	2,5%	0,0%
CAMPANIA	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%
<b>EMIL.ROM.</b>	<b>23,9%</b>	<b>9,8%</b>	<b>1,1%</b>	<b>13,2%</b>
FRIULI VEN. GIU.	0,6%	0,0%	0,2%	5,7%
LAZIO	0,4%	0,8%	2,4%	1,4%
LIGURIA	0,6%	0,5%	0,8%	6,9%
MARCHE	0,1%	0,0%	0,0%	0,4%
MOLISE	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>PIEMONTE</b>	<b>62,4%</b>	<b>48,1%</b>	<b>87,3%</b>	<b>59,5%</b>
PUGLIA	0,3%	0,3%	0,0%	2,4%
SARDEGNA	1,1%	14,7%	0,1%	0,2%
SICILIA	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%
TOSCANA	1,0%	0,4%	1,5%	1,2%
TRENTINO ALTO ADIGE	3,2%	0,0%	0,0%	1,1%
UMBRIA	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
VALLE D'AOSTA	0,0%	0,5%	0,0%	0,4%
<b>VENETO</b>	<b>6,3%</b>	<b>21,3%</b>	<b>4,0%</b>	<b>6,4%</b>
TOTALE	100%	100%	100%	100%

### 1.3 Movimentazione dei rifiuti all'interno della regione Lombardia

Dall'analisi dei rifiuti di provenienza regionale in ingresso agli impianti della regione ( $RT_{reg}$ ) è anche possibile conoscere quali sono le principali direzioni di spostamento dei rifiuti all'interno della regione Lombardia, come mostrato in Tabella 9 per i rifiuti misti CER17 09 04; i dati contenuti in questa matrice mettono in correlazione i rifiuti provenienti da ciascuna provincia di "origine" (conferitori dei rifiuti), in orizzontale, con quelli trattati nelle Province dove sono ubicati gli impianti di destino, in verticale. Come si può notare, nella maggior parte dei casi, i rifiuti prodotti in una certa provincia vengono gestiti prevalentemente all'interno della stessa provincia (percentuali in giallo), con percentuali variabili dal 57% fino all'88%, ad eccezione delle province di Monza-Brianza e Pavia dove viene trattato rifiuto proveniente principalmente da Milano (59,1% e 47,9% rispettivamente per MB e PV), data la vicinanza al Capoluogo di regione. Nella prima colonna della Tabella 9 viene anche mostrato il "peso" di ogni provincia rispetto al totale dei rifiuti conferiti agli impianti della regione; come si può vedere da questi risultati, le province che hanno ricevuto e gestito i maggiori quantitativi di rifiuti C&D misti risultano Milano (con oltre il 35%), Brescia (per il 21% circa) e Bergamo (per il 13% circa); la restante parte è suddivisa in modo piuttosto omogeneo tra le altre province. Questa matrice, che correla i rifiuti conferiti agli impianti in regione con la

relativa provincia di provenienza, è stata ricostruita per ciascun codice CER analizzato e utilizzata per stimare le distanze medie di trasporto per il conferimento dei rifiuti agli impianti.

**Tabella 9.** Percentuali di rifiuti C&D misti (CER 17 09 04) conferiti da soggetti terzi in regione agli impianti di ciascuna provincia e direzioni di movimentazione (provenienza) dei rifiuti in regione (esprese in percentuali) nel 2014

		% Conferito (RT <sub>reg</sub> )	PROVINCIA DI ORIGINE DEI RIFIUTI											
			BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA
PROVINCIA DOVE SONO GESTITI I RIFIUTI (ubicazione impianti)	BG	12,7	61,3	4,6	0,2	3,2	1,7	0,4	3,8	24,5	0,0	0,0	0,0	0,3
	BS	20,8	10,7	74,8	0,1	3,3	0,3	0,3	0,1	9,3	1,0	0,1	0,0	0,0
	CO	3,0	1,7	0,6	65,2	0,0	7,3	0,0	3,0	11,8	0,0	0,0	0,5	9,8
	CR	2,7	15,4	3,7	0,2	71,6	0,1	2,3	0,4	5,8	0,4	0,0	0,0	0,0
	LC	2,4	1,0	0,0	8,0	0,0	63,7	0,0	12,4	13,0	0,0	0,5	1,0	0,3
	LO	2,5	1,6	0,4	0,1	0,9	0,0	57,4	1,0	35,7	0,0	1,2	1,3	0,4
	MB	7,3	1,1	0,3	3,2	0,0	3,5	0,2	30,6	59,1	0,0	0,3	0,5	1,2
	MI	35,6	2,5	0,3	0,9	0,1	0,1	0,5	5,6	86,4	0,0	1,3	0,0	2,2
	MN	3,3	0,0	6,8	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	88,2	0,0	0,0	0,0
	PV	5,0	3,8	0,4	0,4	0,0	0,4	2,0	2,2	47,9	0,0	41,3	0,0	1,6
	SO	1,0	4,4	0,9	1,5	0,0	12,7	0,6	0,0	0,8	0,0	0,0	79,2	0,0
	VA	3,6	1,4	0,0	6,1	0,0	0,1	0,0	1,3	18,5	0,0	0,0	0,0	72,5

Dall'analisi dei rifiuti in uscita dagli impianti regionali e consegnati a terzi in regione (DR<sub>reg</sub>) è stato possibile stimare le destinazioni di tali rifiuti, come mostrato in Tabella 10 per i rifiuti misti CER17 09 04; questa matrice, che si riferisce ai rifiuti uscenti dagli impianti della regione e diretti ad altri impianti del territorio, mette in correlazione la provincia di destinazione dei rifiuti, in orizzontale, con la provincia di ubicazione degli impianti ovvero dove i rifiuti sono stati inizialmente gestiti, in verticale. Dalla lettura di questa matrice si evince che la maggior parte dei rifiuti in uscita dagli impianti di una certa provincia viene consegnata prevalentemente ad altri impianti presenti all'interno della stessa provincia (percentuali evidenziate in giallo), con percentuali tra il 50% e il 93%; fanno eccezione le province di LC, MB e VA in cui le quote di rifiuti consegnate a terzi della stessa provincia sono inferiori al 50% a causa di maggiori flussi diretti ad altre province confinanti. A titolo di esempio, prendendo a riferimento gli impianti della provincia di Bergamo, i rifiuti uscenti da questi impianti sono stati consegnati per il 55,7% ad altri impianti di BG, per l'8,4% ad altri impianti di BS, per il 22,2% ad altri impianti di MI e così via. Nel caso di MB, invece, il flusso tra impianti della stessa provincia è del 33,8% mentre il flusso principale è diretto verso altri impianti di Milano (55,3%).

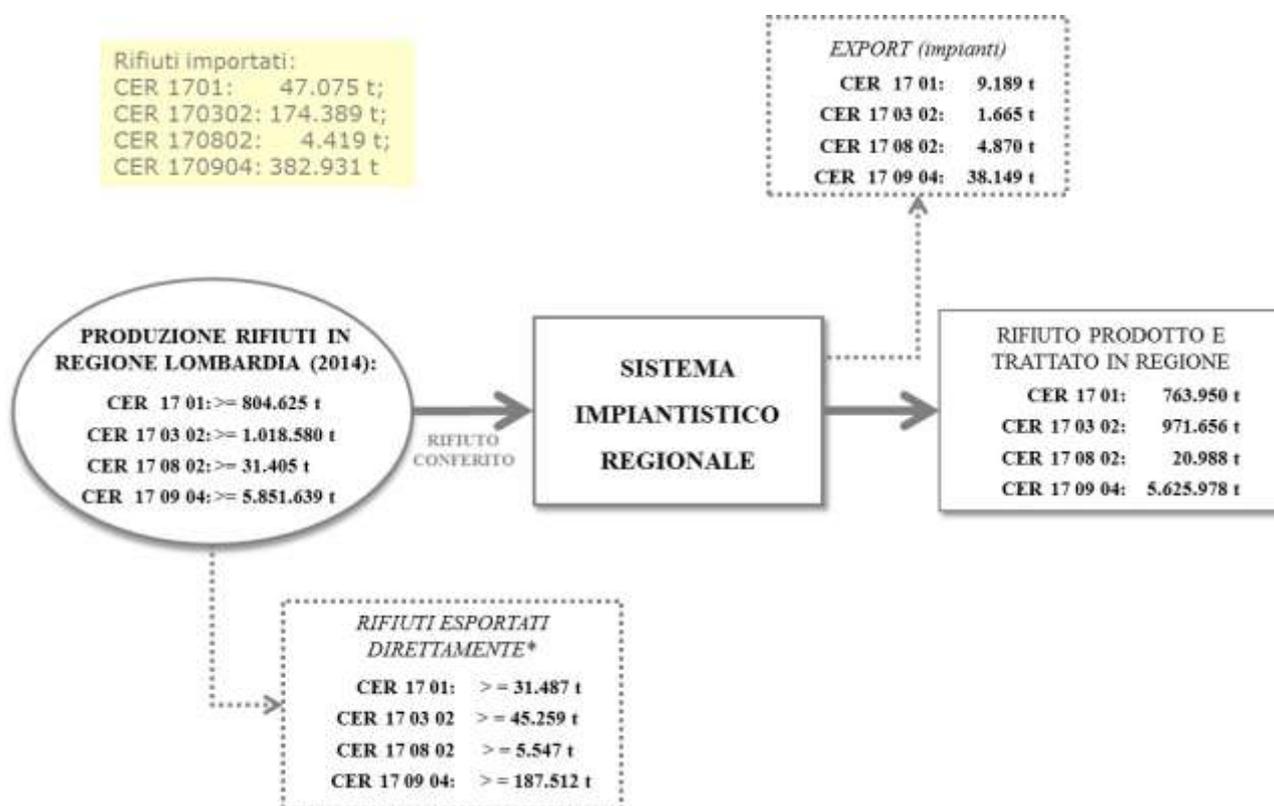
**Tabella 10.** Percentuali di rifiuti C&D misti (CER 17 09 04) uscenti dagli impianti di ciascuna provincia e direzioni di movimentazione (destinazioni) dei rifiuti in regione (esprese in percentuali) nel 2014

		% FLUSSO USCENTE (DR reg)	PROVINCIA DI DESTINAZIONE DEI RIFIUTI											
			BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA
PROVINCIA DOVE SONO GESTITI I RIFIUTI (ubicazione impianti)	BG	9,3	55,7	8,4	0,1	6,5	0,2	0,2	3,4	22,2	0,0	3,2	0,0	0,1
	BS	16,9	0,9	87,9	0,2	2,0	0,1	0,7	0,0	6,9	0,7	0,4	0,2	0,0
	CO	1,4	0,1	0,0	78,9	0,7	5,4	0,0	1,8	8,1	0,0	2,3	0,0	2,5
	CR	1,6	21,9	7,2	0,0	58,5	0,0	6,2	0,4	2,6	2,5	0,8	0,0	0,0
	LC	2,3	2,0	8,3	21,3	0,0	40,0	0,3	17,6	5,6	0,0	4,0	0,6	0,2
	LO	2,2	1,1	0,1	0,1	2,5	1,2	83,3	4,8	4,1	0,0	2,8	0,0	0,0
	MB	8,2	4,6	0,0	1,6	0,1	2,1	0,8	33,8	55,3	0,0	0,8	0,0	0,8
	MI	44,3	1,0	1,2	1,2	0,1	0,3	2,9	4,7	79,9	0,0	7,5	0,0	1,2
	MN	4,9	0,0	6,3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	93,3	0,0	0,0	0,0
	PV	5,4	0,1	0,3	0,1	0,1	0,0	2,5	1,3	18,3	0,0	77,4	0,0	0,0
	SO	0,9	0,0	0,0	0,3	0,0	3,8	0,1	5,0	6,2	0,0	0,2	84,1	0,4
	VA	2,8	1,9	0,0	10,7	0,0	0,0	0,0	4,2	34,3	0,1	0,1	0,0	48,7

Si specifica che, mentre la Tabella 9 analizza il rifiuto conferito agli impianti della regione, che comprende sia i soggetti produttori (esenti MUD) sia gli impianti, la Tabella 10 invece si focalizza sul movimento di rifiuti tra impianto-impianto (i.e. flussi secondari); i valori riportati in entrambe le tabelle confermano che i flussi di rifiuti all'interno del territorio regionale avvengono prevalentemente nell'ambito della scala provinciale, sebbene con qualche eccezione (LC, MB e PV).

## 1.4 Stima dei rifiuti inerti C&D prodotti in regione Lombardia nel 2014

Nel presente paragrafo sono riportati i dati relativi ai quantitativi di rifiuti C&D non pericolosi prodotti in regione Lombardia nel 2014, per i codici CER analizzati. Si sottolinea che la produzione è stata stimata a ritroso, a partire dai quantitativi di rifiuti C&D prodotti e gestiti negli impianti della regione. Nello specifico, il rifiuto totale prodotto in regione è stato calcolato come somma dei rifiuti gestiti in regione (Tabella 3), da cui sono stati già esclusi i rifiuti di provenienza extra-regionale e gli step di gestione intermedi, e del quantitativo di rifiuti prodotti in regione ma gestiti fuori regione (Tabella 7, Colonna A). Il bilancio di massa complessivo per il sistema impiantistico regionale è mostrato in Figura 6; l'ultimo box a destra mostri i rifiuti prodotti e trattati in regione oggetto del presente studio di LCA.



**Figura 6.** Bilancio di massa complessivo del rifiuto prodotto e gestito in regione Lombardia nel 2014, con indicazione dei rifiuti esportati ed importati, per i quattro codici CER analizzati.

In Tabella 11 sono mostrate le stime del rifiuto prodotto a confronto con il rifiuto gestito in regione nell'anno 2014, al fine di determinare le percentuali di rifiuto gestito rispetto al totale prodotto in regione (% G/P). Si nota che, per i rifiuti a base di cemento (CER 17 01), le miscele bituminose (CER 17 03 02) ed i rifiuti misti C&D (CER 17 09 04), quasi tutto il rifiuto prodotto in regione è stato anche trattato all'interno del sistema

impiantistico regionale, come indicano le percentuali G/P rispettivamente pari al 95% per i primi due e al 96% per i rifiuti misti. Al contrario, per i rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02), poiché sono stati registrati notevoli quantitativi di tali rifiuti avviati ad impianti fuori regione, la percentuale G/P risulta significativamente inferiore (%G/P circa pari al 67%) e ciò è indicativo di una possibile carenza nel trattamento di recupero di questo specifico flusso di rifiuti in regione.

**Tabella 11.** Confronto tra il rifiuto gestito in regione (Gestito (RL)) e il rifiuto prodotto in regione (Prodotto (RL)) nel 2014; percentuali di rifiuto gestito rispetto al totale prodotto (% G/P).

CER	Gestito (RL) (t)	Prodotto (RL) * (t)	% G/P
17 01	763.950	<b>804.625</b>	94,9%
17 08 02	971.656	<b>1.018.580</b>	95,4%
17 08 02	20.988	<b>31.405</b>	66,8%
17 09 04	5.625.978	<b>5.851.639</b>	96,1%

\* valore minimo stimato

#### 1.4.1 Confronto con il metodo PRGR per la stima della produzione dei rifiuti

Nel presente studio è stata effettuata anche una stima dei quantitativi di rifiuti non pericolosi C&D prodotti in regione Lombardia nel 2014, applicando la metodologia riportata nel Piano Regionale di Gestione dei Rifiuti (PRGR) della Lombardia nella Sezione 2 dei rifiuti speciali, escludendo dai conteggi i rifiuti di provenienza extraregionale e le gestioni intermedie. Secondo questa metodologia, la produzione dei rifiuti C&D non pericolosi viene calcolata, per ciascun codice CER, come somma dei quantitativi dichiarati dai cosiddetti soggetti *obbligati MUD* e della produzione dei soggetti *esenti MUD*, che viene invece stimata sulla base dei rifiuti gestiti dagli impianti della regione.

$$Produzione_{RL} (PRGR) = Prod. ObbligatiMUD + Prod. EsentiMUD \quad Eq. 1$$

Il primo termine a secondo membro dell'Eq. 1 è calcolato come somma del prodotto in unità locale (inUL) e fuori unità locale (fuoriUL) dichiarati dagli impianti e dai soggetti privati che sono obbligati a presentare annualmente la dichiarazione MUD secondo il D. Lgs. 152/2006 e s.m.i. La produzione dei rifiuti dei soggetti esenti (secondo termine Eq. 1) è stata stimata come differenza tra la quantità di rifiuti ritirati da terzi in regione ( $\sum_{MUD} RT_{reg}$ ) e la quantità di rifiuti destinati a terzi in regione ( $\sum_{MUD} DR_{reg}$ ). Le modalità di estrazione ed elaborazione dei dati MUD sono quindi diverse rispetto a quelle adottate per le stime del rifiuto prodotto e gestito in regione nel presente studio, mostrate nei paragrafi precedenti; per maggiori dettagli si rimanda all'Allegato 1.

I risultati ottenuti applicando il metodo PRGR sono riportati in Tabella 12, dove vengono esplicitati i singoli contributi necessari per il calcolo; tali valori sono stati confrontati con le stime effettuate attraverso l'analisi dei flussi presentate ai paragrafi 1.1-1.4 e mostrate in Tabella 13.

**Tabella 12.** Quantitativo di rifiuto prodotto in regione stimato attraverso il metodo del PRGR per le diverse tipologie di rifiuto analizzate (codici CER 17 01, 17 03 02, 17 08 02 e 17 09 04).

RIFIUTO PRODOTTO IN REGIONE SECONDO IL METODO DEL PRGR							
CER	Produzione* (t)	inUL (t)	fuoriUL (t)	RT <sub>reg</sub> (t)	DR <sub>reg</sub> (t)	Import (t)	Export (t)
17 01	785.402	171.686	90.221	1.124.029	600.534	54.148	41.216
17 03 02	992.449	149.982	256.424	1.191.199	605.156	186.854	47.083
17 08 02	23.482	8.447	1.452	60.254	46.671	6.476	11.094
17 09 04	5.714.344	930.449	999.950	7.316.659	3.532.714	419.083	228.996

\* Produzione = inUL + fuoriUL + RT<sub>reg</sub> - DR<sub>reg</sub>

**Tabella 13.** Quantitativo di rifiuto gestito e trattato in regione stimato attraverso il metodo applicato in questo studio per le diverse tipologie di rifiuto analizzate (codici CER 17 01, 17 03 02, 17 08 02 e 17 09 04).

RIFIUTO PRODOTTO IN REGIONE SECONDO METODO POLIMI							
CER	Produzione* (t)	inUL (t)	fuoriUL <sub>reg</sub> (t)	RT <sub>reg</sub> (t)	DR <sub>reg_corretto</sub> (t)	Import (t)	Export <sub>tot</sub> (t)
17 01	804.625	26.605	38.197	829.328	130.181	47.075	40.675
17 03 02	1.018.580	62.458	169.265	818.238	78.305	174.389	46.924
17 08 02	31.405	6.192	88	35.327	20.620	4.419	10.417
17 09 04	5.851.639	388.433	334.82	5.405.642	502.917	382.931	225.661

\*Produzione = Gestito + Export<sub>tot</sub> = (inUL+fuoriUL<sub>reg</sub>+RT<sub>reg</sub>-DR<sub>reg\_corretto</sub>)<sub>impianti</sub> + Export<sub>tot</sub>

Si osserva che i singoli contributi nella Tabella 12 e nella Tabella 13 variano in modo significativo a seconda del metodo utilizzato per l'estrazione e l'elaborazione dei dati MUD ma, in termini di risultato finale, i quantitativi di rifiuto prodotto in regione ottenuti con i due metodi sono tra loro molto simili per i codici CER esaminati. Infatti, le differenze sulle stime di produzione ottenute con i due metodi sono inferiori al 3% con l'unica eccezione dei rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02) per i quali, invece, il metodo PRGR potrebbe sottostimare i quantitativi prodotti del 25%. Per i dettagli relativi alle differenze tra i due approcci si rimanda all'Allegato 1.

Si è deciso di completare le elaborazioni dei flussi di rifiuti relativi al CER 17 02 (legno, vetro e plastica) e al CER 17 04 (metalli) utilizzando il metodo PRGR che permette di avere una stima del rifiuto complessivamente prodotto in regione in tempi più brevi; si specifica che, per questi CER, non è stata necessaria un'elaborazione più dettagliata dei dati MUD avendo deciso di escluderli dall'analisi LCA. I

risultati sono mostrati in Tabella 14 per il CER 17 02 e in Tabella 15 per il CER 17 04, esplicitati per ciascun codice figlio. Dalla Tabella 14 e dalla Tabella 15 si nota che i flussi prodotti in maggiore quantità sono rappresentati dal legno, pari a circa il 74% di tutto il CER 17 02, e dai metalli ferrosi, pari a circa il 79% della categoria CER 17 04. Risulta anche evidente una maggiore movimentazione di questi rifiuti in ingresso e uscita dal territorio regionale: per il CER 17 02 le percentuali di *Import* risultano pari al 39% del rifiuto totale conferito agli impianti della regione, con una quota considerevole di rifiuti provenienti dall'estero (37.817 tonnellate su 92.938 tonnellate totali importate), mentre l'*Export* è piuttosto contenuto e pari all'8% del rifiuto totale consegnato a soggetti terzi (125.049 t). Per i metalli, i flussi aumentano considerevolmente, probabilmente per il maggior valore di mercato dei materiali recuperati: per il CER 17 04, infatti, le percentuali di *Import* raggiungono il 62% del rifiuto in ingresso agli impianti, di cui una parte consistente proviene dall'Estero (1,55 Mt su 2,16 Mt di import); aumenta anche la percentuale di rifiuti destinati a soggetti fuori regione che si attesta al 15,5% dell'*Export* totale. I flussi di importazione ed esportazione sono quindi sensibilmente maggiori rispetto a quelli riscontrati per gli altri rifiuti inerti non pericolosi come si può verificare dal confronto con la Tabella 12.

**Tabella 14.** Rifiuto prodotto in regione Lombardia nel 2014, per i sottocodici della categoria CER 17 02, stimato con il metodo PRGR.

17 02	CER	Produzione (t)	inUL (t)	fuoriUL (t)	RT reg (t)	DR reg (t)	Import (t)	Export (t)
legno	170201	40.766	15.018	3.049	106.552	83.854	68.399	9.098
vetro	170202	10.916	5.057	193	31.812	26.146	23.484	541
plastica	170203	3.510	1.503	225	6.536	4.753	1.055	657
<b>Totale</b>	<b>17 02</b>	<b>55.192</b>	<b>21.579</b>	<b>3.467</b>	<b>144.900</b>	<b>114.753</b>	<b>92.938</b>	<b>10.296</b>

**Tabella 15.** Rifiuto prodotto in regione Lombardia nel 2014, per i sottocodici della categoria CER 17 04, stimato con il metodo PRGR.

17 04	CER	Produzione (t)	inUL (t)	fuoriUL (t)	RT reg (t)	DR reg (t)	Import (t)	Export (t)
Rame, bronzo, ottone	170401	27.013	26.321	319	91.543	91.170	163.611	45.626
Alluminio	170402	26.245	20.807	324	83.510	78.396	226.882	36.858
Piombo	170403	901	850	9	1.408	1.366	2.639	1.549
Zinco	170404	3.211	2.595	2	3.104	2.491	5.095	3.751
Ferro e acciaio	170405	239.744	455.799	33.321	1.072.308	1.321.684	1.714.872	166.063
Stagno	170406	-52*	19	0	44	115	102	33
Metalli misti	170407	5.649	1.336	99	35.434	31.220	26.595	8.936
Cavi (non peric.)	170411	2.232	1.335	24	21.161	20.287	24.836	20.268
<b>Totale</b>	<b>17 04</b>	<b>304.942</b>	<b>509.063</b>	<b>34.098</b>	<b>1.308.511</b>	<b>1,546,730</b>	<b>2.164.632</b>	<b>283.084</b>

\*valore negativo che si verifica nei casi in cui c'è una notevole componente di rifiuto importato da fuori regione, probabilmente dovuto al fatto che nel metodo PRGR non viene corretto il quantitativo di rifiuto inviato a terzi (DR) sulla base dell'import in ingresso agli impianti, per cui può accadere che  $DR_{reg} > RT_{reg}$  determinando una "produzione" negativa; ciò rappresenta una possibile limitazione del metodo PRGR.

## 2 SCOPO, OBIETTIVI E RACCOLTA DATI DI INVENTARIO PER L'ANALISI LCA

### 2.1 Introduzione

Nella modellizzazione LCA si è tenuto conto del fatto che i diversi flussi di rifiuti inerti C&D possiedono, in virtù delle loro caratteristiche, opzioni di trattamento e recupero differenti da cui si ottengono diverse tipologie di materie prime secondarie (MPS) che possono essere riutilizzate in svariati ambiti di applicazione.

Ciò che è emerso durante la fase di indagine diretta agli impianti è che:

- i rifiuti misti (CER 17 09 04) in ingresso agli impianti di recupero vengono miscelati, prima o dopo il trattamento, agli altri flussi minori di rifiuti inerti C&D (i.e. miscele bituminose, gesso, cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche) per produrre, come MPS, aggregati riciclati misti di diverse granulometrie, utilizzati prevalentemente per la costruzione di rilevati e sottofondi stradali o in riempimenti ambientali. Questa opzione di gestione e trattamento sarà oggetto della prima analisi di ciclo di vita, indicata come LCA1.
- le miscele bituminose (CER 17 03 02) vengono in parte avviate agli impianti di recupero dei C&D e trattate in miscelazione ai rifiuti misti (LCA1) ed in parte sottoposte a un trattamento di riciclo, a caldo o a freddo, in impianti dedicati per ottenere nuovi prodotti come i conglomerati bituminosi e le cosiddette eco-basi o misti cementati ad alta duttilità, impiegati nelle pavimentazioni stradali. Il numero di impianti, presenti nel database MUD 2014, che hanno ricevuto e trattato esclusivamente miscele bituminose è risultato pari a 24; in totale, il rifiuto 17 03 02 conferito a questi impianti corrisponde a 382.488 tonnellate (Tabella 16). Il trattamento di riciclo specifico delle miscele bituminose è stato analizzato attraverso la seconda analisi di ciclo di vita, indicata come LCA2.
- i rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02) vengono inviati, in misura prevalente, agli impianti di recupero dei C&D dove sono miscelati, in dosi opportune, con i rifiuti misti (LCA1) mentre in minima parte sono stati trattati mediante processo di recupero specifico. Attraverso un'indagine telefonica rivolta agli impianti che hanno ricevuto e trattato il CER 17 08 02, individuati dalle schede MUD presentate nel 2014, è emerso che in regione è presente un unico impianto in grado di trattare separatamente i rifiuti a base di gesso per ottenere, come MPS, il gesso riciclato in polvere da destinare all'utilizzo in impianti di produzione dei gessi di defecazione. Il quantitativo di rifiuti 17 08 02 conferiti in questo impianto nel 2014 è risultato di sole 97 tonnellate (Tabella 16), calcolato sulla base dei dati MUD. Il recupero dei rifiuti in gesso e l'utilizzo della polvere di gesso riciclato è stato valutato nell'ambito della terza analisi di ciclo di vita, indicata come LCA3.

**Tabella 16.** Quantitativi di rifiuti inerti C&D recuperati in totale in regione nel 2014 suddivisi tra quantitativi sottoposti a trattamento di recupero specifico in impianti dedicati e quantitativi recuperati in miscelazione con i rifiuti misti (calcolati per differenza).

<b>CER</b>	<b>Recupero totale (t)</b>	<b>Recupero specifico (t)</b>	<b>Recupero in miscelazione (t)</b>
17 01	704.270	0	704.270
17 03 02	892.954	382.488	510.465
17 08 02	17.793	97	17.696
17 09 04	5.119.930	0	5.119.930
Totale	6.734.947	382.585	6.352.361

In Figura 7 viene quindi evidenziato lo schema dei flussi di rifiuti inerti C&D in regione Lombardia dove sono messi in evidenza i tre “percorsi” di recupero simulati nelle tre analisi del ciclo di vita che compongono l’attuale sistema di gestione.

Per ciascun percorso di recupero, sono state poi individuate e valutate delle opzioni alternative sulla base delle caratteristiche dei rifiuti, delle tecnologie disponibili (Allegato 4) e dei potenziali utilizzi delle materie prime secondarie e/o nuovi prodotti ottenuti a valle dei trattamenti di valorizzazione, tenendo conto del panorama nazionale e internazionale.

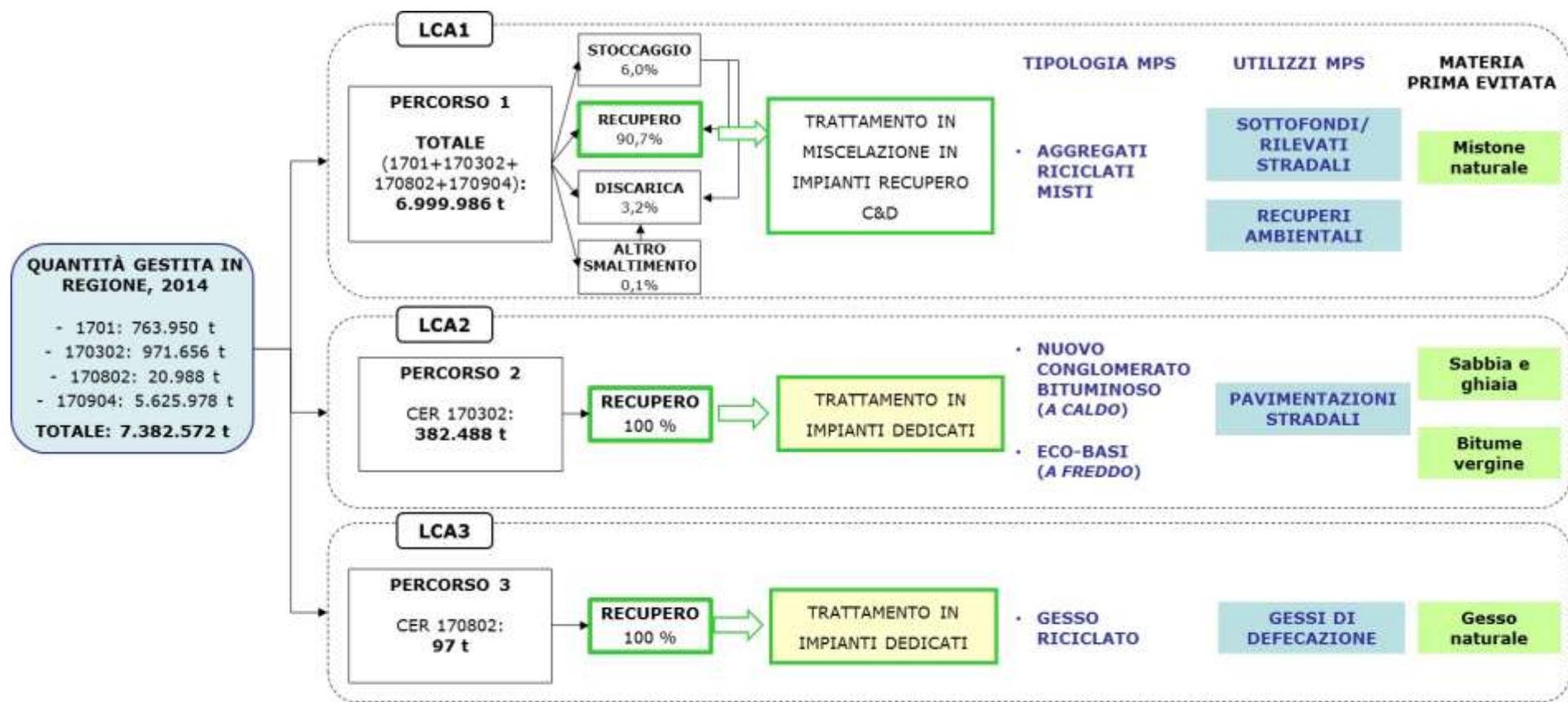


Figura 7. Schema di flusso delle diverse filiere di recupero dei rifiuti inerti C&D che compongono l'attuale sistema di gestione in regione Lombardia e relative analisi LCA.

## 2.2 Scopo ed obiettivi

L'analisi LCA è stata effettuata con l'obiettivo di mettere in luce i punti di forza e le criticità dell'attuale sistema di gestione regionale dei rifiuti inerti C&D, sulla base dei quali definire possibili scenari di sviluppo futuro che consentano di migliorarne le prestazioni ambientali. I risultati del presente studio serviranno come supporto alle decisioni per le politiche regionali al fine di ottimizzare la gestione di questi flussi di rifiuti e definire possibili linee di intervento volte ad incentivare l'intera filiera di recupero dei C&D e le sue connessioni con il settore costruttivo.

La presente analisi LCA si applica al contesto geografico della regione Lombardia e fa riferimento all'anno 2014. I confini del sistema includono tutti i processi di trattamento, dal momento in cui i rifiuti sono prodotti in cantiere e trasportati agli impianti, fino alla loro fuoriuscita dal sistema come emissione (solida, liquida o gassosa) o come materia prima secondaria. L'approccio impiegato per risolvere le multi-funzionalità associate alle operazioni di recupero (i.e. trattamento del rifiuto con contemporanea produzione di MPS) consiste nell'espansione dei confini del sistema, includendo quindi al loro interno anche le produzioni primarie evitate grazie alla produzione ed utilizzo delle risorse secondarie; in Figura 8 ne viene riportato un esempio per il sistema analizzato nell'LCA1. I confini del sistema e l'unità funzionale sono specifici per ciascuna analisi LCA e pertanto verranno descritti nel dettaglio all'interno di ciascuna sezione dedicata (cfr. paragrafi 2.3.1, 2.4.1 e 2.5.2).

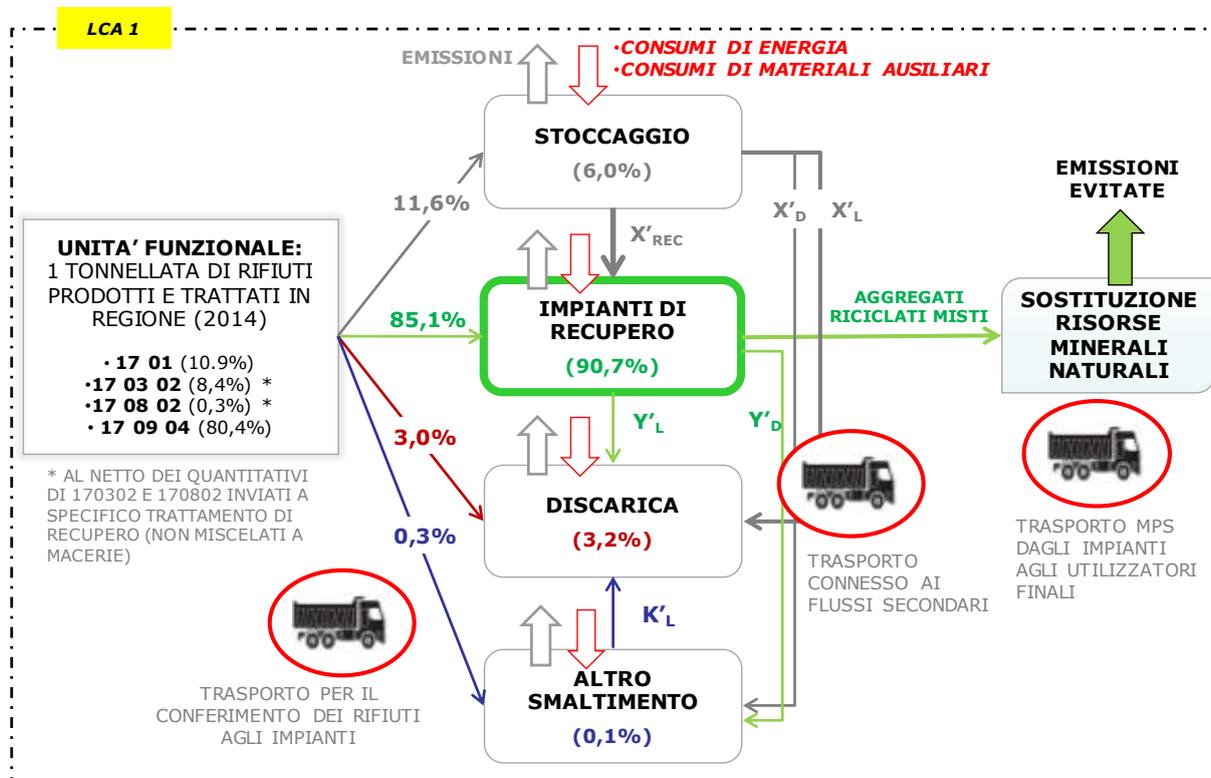


Figura 8. Espansione dei confini del sistema per la risoluzione delle multi-funzionalità nell'LCA1.

Un punto focale per l'impostazione dell'analisi LCA è stato comprendere, ad oggi, quale sia l'effettiva domanda di mercato dei materiali riciclati nel territorio (i.e. aggregati riciclati misti, gesso riciclato e asfalto riciclato in conglomerati bituminosi, basi e misti cementati ad alta duttilità), in quali applicazioni sono di solito utilizzati, in base alle specifiche caratteristiche, e quali sono le loro prestazioni tecniche in confronto a quelle dei materiali vergini. Le informazioni necessarie sono state raccolte sia attraverso sopralluoghi effettuati presso i maggiori impianti di riciclo sia attraverso interviste dirette ad alcune imprese stradali e impianti di produzione che ad oggi utilizzano gli aggregati riciclati e i prodotti riciclati ottenuti dai C&D. Questi dati sono serviti per la modellizzazione del rapporto di sostituzione tra le risorse secondarie e quelle primarie, nelle diverse applicazioni previste, che rappresenta un aspetto chiave nell'analisi di LCA del sistema in esame; per la quantificazione degli impatti ambientali complessivi, è infatti necessario associare alle azioni di riciclo i reali benefici indotti dall'effettivo utilizzo del materiale derivato dalla valorizzazione del rifiuto, che evita la produzione del rispettivo materiale vergine. All'interno della descrizione di ciascuna LCA sono riportate tutte le informazioni relative al calcolo del corrispondente rapporto di sostituzione.

L'analisi di LCA è stata effettuata utilizzando il software *SimaPro 8.3*. Per la creazione degli inventari delle analisi LCA1, LCA2 e LCA3, dove possibile, sono stati utilizzati i dati primari rappresentativi del livello tecnologico regionale raccolti durante le indagini dirette ed indirette. Per i processi principali sono quindi stati costruiti dei moduli *ad hoc*. Dati di letteratura sono stati utilizzati laddove i dati primari non erano disponibili ed il database *ecoinvent 3.3* (modello *allocation, recycled content*) è stato utilizzato per la modellizzazione dei processi di *background* (ad es. produzione di energia elettrica, trasporto, ecc.). Le fonti dei dati sono specifiche per ciascuna analisi LCA e pertanto verranno descritte nel dettaglio all'interno di ciascuna sezione dedicata (cfr. paragrafi 2.3.1, 2.4.1 e 2.5.2).

Per la valutazione degli impatti sono stati scelti due metodi di caratterizzazione presenti di *default* all'interno del software (i.e. ILCD 2011 e CED); inoltre, per la presente analisi, sono stati definiti *ad hoc* tre indicatori, due per la stima del consumo di risorsa naturale e uno che quantifica la volumetria di discarica risparmiata. Nello specifico, il metodo ILCD 2011 (Midpoint) è stato impiegato per la valutazione degli impatti ambientali mentre il metodo Cumulative Energy Demand (CED) per l'analisi dei consumi energetici del sistema. Gli indicatori del consumo di risorsa naturale consentono di valutare i quantitativi consumati/risparmiati di risorse minerali (i.e. sabbia e ghiaia per LCA1/LCA2 e gesso naturale per LCA3), mentre l'indicatore relativo alla discarica risparmiata permette di quantificare il volume di discarica risparmiato in seguito all'invio a recupero dei rifiuti C&D negli impianti di trattamento. Il paragrafo 2.2.1 riporta maggiori dettagli.

## 2.2.1 Metodi di caratterizzazione ed indicatori definiti *ad hoc*

### Il metodo ILCD 2011 Midpoint

Il metodo di caratterizzazione ILCD 2011 Midpoint è il risultato di un lavoro di ricerca della Commissione Europea (*Joint Research Centre - JRC*), pubblicato nel 2012; esso considera un'ampia gamma di categorie di impatto ed implementa fattori di caratterizzazione aggiornati per la valutazione degli impatti. Il metodo valuta gli impatti ambientali del sistema attraverso 16 categorie di impatto, presentate nella guida *Recomandation for Life Cycle Impact Assessment in the European context* (EC – JRC, 2011) e sintetizzate in Tabella 17 insieme ai rispettivi indicatori di categoria e modelli di caratterizzazione. Si sottolinea che nei risultati del presente lavoro di LCA non verranno mostrati gli impatti associati alle categorie di impatto relative alle radiazioni ionizzanti e all'uso del suolo, poiché non sono stati raccolti dati primari che ne consentissero la quantificazione. In particolare, per il consumo di suolo, i metodi di caratterizzazione sono ancora piuttosto incerti e dibattuti; le questioni ancora aperte riguardano i fattori di caratterizzazione, la differenziazione spaziale e temporale degli impatti, la reversibilità nell'uso del suolo e la valutazione dei sistemi di riferimento. L'impatto viene infatti calcolato in funzione della superficie occupata o trasformata, moltiplicata per un fattore di caratterizzazione che è composto da un parametro che tiene conto della differenza tra la qualità del suolo nella situazione oggetto di valutazione rispetto ad una situazione di riferimento e un parametro che tiene conto del tempo (tempo di occupazione, tempo di rigenerazione). Il metodo di Milà i Canals 2007 implementato nell'ILCD 2011 considera la sostanza organica del suolo (SOM) quale indicatore chiave della qualità del suolo. Tuttavia, per poter svolgere correttamente l'analisi degli impatti occorrerebbe conoscere la posizione, i tempi ed i valori di SOM prima e dopo l'occupazione del suolo così come il valore di SOM del sistema di riferimento del terreno.

**Tabella 17.** Categorie di impatto, indicatori di categoria e modelli di caratterizzazione del metodo ILCD 2011.

<b>Categoria di impatto</b>	<b>Indicatore di categoria</b>	<b>Modello di caratterizzazione</b>
Cambiamento climatico	Incremento della forzante radioattiva infrarossa (kg CO <sub>2,eq</sub> )	IPCC, 2007
Riduzione dello strato d'ozono	Incremento dell'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico (ODP)	WMO, 1999
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh <sup>1</sup> )	Modello USEtox
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	Unità tossica comparativa per gli esseri umani (CTUh <sup>1</sup> )	Modello USEtox
Assunzione di materiale particolato	Frazione di particolato fine inalata (kg PM <sub>2,5 eq</sub> )	Rabl and Spadaro, 2004 Greco et al., 2007
Radiazioni ionizzanti (salute umana)	Incremento della radiazione ionizzante (kg U235 eq)	Frischknecht et al, 2000
Radiazioni ionizzanti (sugli ecosistemi)	Unità tossica comparativa per gli ecosistemi (CTU <sub>e</sub> <sup>2</sup> )	Garner-Laplace et al., 2008
Formazione fotochimica di ozono	Incremento della concentrazione in troposfera di ozono (kg COVNM <sub>eq</sub> <sup>3</sup> )	Van Zelm et al., 2008
Acidificazione	Superamento accumulato del carico critico (moli H <sup>+</sup> <sub>eq</sub> )	Seppala et al., 2006 Posch et al., 2008
Eutrofizzazione terrestre	Superamento accumulato del carico critico (moli N <sub>eq</sub> )	Seppala et al., 2006 Posch et al., 2008
Eutrofizzazione (acqua dolce)	Frazione di nutrienti che raggiunge il compartimento finale acque dolci (kg P <sub>eq</sub> )	Metodo ReCiPe versione 1.5
Eutrofizzazione marina	Frazione di nutrienti che raggiunge il compartimento finale acque marine (kg N <sub>eq</sub> )	Metodo ReCiPe versione 1.5
Ecotossicità (acqua dolce)	Unità tossica comparativa per gli ecosistemi (CTU <sub>e</sub> <sup>2</sup> )	USEtox
Uso del suolo	Deficit di carbonio organico nel terreno (kg SOM <sup>4</sup> )	Mila i Canals et al., 2007
Impoverimento delle risorse idriche	Consumo di acqua equivalente (m <sup>3</sup> acqua eq)	Swiss Ecoscarcity, 2006
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	Impoverimento delle risorse abiotiche (kg Sb <sub>eq</sub> )	Van Oers et al., 2002

<sup>1</sup> Comparative Toxic Unit for human.

<sup>2</sup> Comparative Toxic Unit for ecosystem.

<sup>3</sup> Composti Organici Volatili Non Metanici.

<sup>4</sup> Soil Organic Matter.

<sup>5</sup> Nei risultati delle LCA1, LCA2 e LCA3 non verranno mostrati gli impatti associati alle categorie di impatto relative alle radiazioni ionizzanti e all'uso del suolo, poiché non sono stati raccolti dati primari che ne consentono la quantificazione.

### **Il metodo CED per la valutazione energetica**

Il metodo CED (*Cumulative Energy Demand*) consente di valutare gli impatti energetici legati al sistema di gestione dei rifiuti nell'ottica del ciclo di vita. L'analisi considera sia i consumi energetici "diretti" ovvero associati a tutte le fasi di gestione e trattamento dei rifiuti, sia i consumi energetici "evitati" grazie alle operazioni di recupero e all'utilizzo delle risorse secondarie in luogo di quelle primarie, così come i consumi energetici "indiretti" ovvero quelli associati ai processi secondari. Tale metodo quantifica l'impiego delle risorse energetiche, suddivise in cinque categorie di impatto: non rinnovabili-fossili, non rinnovabili-nucleari, rinnovabili-biomassa, rinnovabili-vento, sole, geotermia e rinnovabili-acqua. I risultati relativi al CED verranno mostrati in termini di consumo totale delle risorse energetiche.

### **Indicatori definiti ad hoc**

Sono stati definiti due indicatori che permettono di quantificare il consumo di risorsa minerale naturale (non rinnovabile), ritenuti significativi per il sistema in esame: il primo, esprime i kg di sabbia e ghiaia consumati o risparmiati per tonnellata di rifiuto C&D gestito in regione (per LCA1 e LCA2), mentre il secondo i kg di gesso naturale consumati o risparmiati per tonnellata di rifiuto in gesso recuperato (rappresentativo per l'LCA3). I valori di questi indicatori sono stati ottenuti attraverso l'analisi di inventario disponibile nei risultati del software *SimaPro*; infatti, i flussi di sabbia (*sand*), sabbia e ghiaia (*sand and gravel*) e gesso (*gypsum*) vengono quantificati nel software sulla base degli input ai singoli processi implementati nel sistema ma non vengono di fatto conteggiati nella categoria di impatto ambientale ILCD relativa all'impoverimento delle risorse minerali e fossili in quanto sono degli "unmapped flows", ovvero per questi flussi elementari non sono stati elaborati, ad oggi, dei modelli di caratterizzazione che permettano di stimarne l'impatto. Sommando i quantitativi di sabbia e di sabbia e ghiaia da un lato e i quantitativi di gesso dall'altro è stato possibile quindi costruire i due indicatori del consumo di risorsa minerale naturale non rinnovabile per le analisi LCA.

È stato poi definito un terzo indicatore che esprime il volume di discarica risparmiata in seguito all'invio a recupero dei rifiuti, calcolato come rapporto tra il peso dei rifiuti avviati a recupero nel sistema di gestione regionale e il rispettivo peso specifico.

## 2.3 Impostazione ed inventario dell’LCA1 (rifiuti misti)

### 2.3.1 Confini del sistema e unità funzionale

Come anticipato al paragrafo 2.1, l’analisi LCA1 si focalizza sulla gestione ed il recupero dei rifiuti C&D misti in miscelazione ai flussi minori (CER 1701, parte del CER 17 03 02 e 17 08 02) da cui si producono aggregati riciclati misti. Pertanto il flusso di rifiuti C&D inviati a recupero, e di conseguenza il quantitativo gestito totale, riportati in Tabella 18, non tengono conto delle quantità di rifiuti sottoposti a trattamento specifico in impianti dedicati per produrre altre tipologie di materie prime secondarie o prodotti. Nello specifico, rispetto ai valori riportati in Tabella 3 riferiti al sistema complessivo in regione, i flussi di riferimento per l’analisi LCA1 mostrati in Tabella 18 sono stimati escludendo dal quantitativo a riciclo e quindi dal gestito totale, la parte dei flussi di miscele bituminose (CER 170302: 382.488 tonnellate) e di rifiuti a base di gesso (CER 170802: 97 tonnellate), che sono stati destinati rispettivamente alla produzione di nuovo conglomerato bituminoso/eco-basi e al recupero dedicato dei rifiuti in gesso per la produzione di gesso riciclato. Inoltre, le tonnellate di rifiuti inviati ad “altro smaltimento” (6.351 tonnellate) sono state sommate al quantitativo inviato a discarica (220.908 tonnellate), in quanto l’operazione prevalente risulta essere il deposito temporaneo (D15) prima dell’invio a smaltimento; pertanto nella colonna “smaltimento” in Tabella 18 compare la somma dei due contributi, pari a 227.259 tonnellate.

**Tabella 18.** Quantità di rifiuti C&D gestiti nel sistema impiantistico regionale di riferimento per l’analisi LCA1.

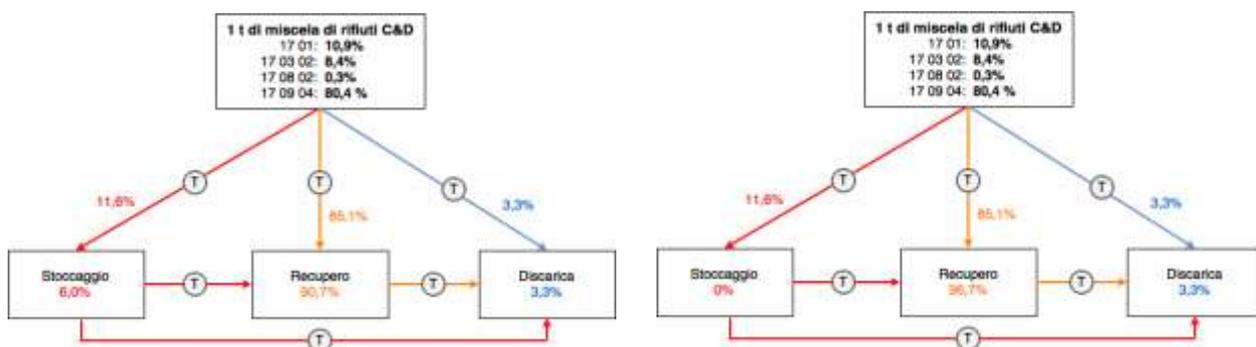
CER	Gestito [t]	Stoccaggio [t]	Riciclo [t]	Smaltimento [t]
17 01	763.950	45.669	704.270	14.011
17 03 02	589.168	68.502	510.465	10.201
17 08 02	20.891	2.951	17.696	244
17 09 04	5.625.978	303.243	5.119.930	202.805
<b>Totale</b>	<b>6.999.986</b>	<b>420.365</b>	<b>6.352.361</b>	<b>227.259</b>

L’unità funzionale adottata per l’analisi LCA1 è quindi rappresentata da una tonnellata di miscela di rifiuto C&D non pericoloso avente la seguente composizione (determinata sulla base del gestito in Tabella 18):

- 10,9% di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche (1701);
- 8,4% di miscele bituminose non pericolose (170302);
- 0,3% di rifiuti a base di gesso (170802);
- 80,4% di rifiuti misti da attività di costruzione e demolizione (17 09 04).

Dai dati in Tabella 18 è possibile calcolare le percentuali di rifiuti avviati alle diverse modalità di trattamento: 90,7% a riciclo, 3,3% a smaltimento e 6,0% a stoccaggio. Sono stati inoltre valutati i flussi diretti (ovvero i rifiuti direttamente conferiti agli impianti dai produttori iniziali) e secondari, derivanti cioè dalle operazioni intermedie di gestione, associati a ciascuna tipologia di impianto. Il risultato delle elaborazioni è riportato in Figura 9 (a sinistra), dove le percentuali sulle frecce indicano i flussi diretti, mentre le percentuali all'interno dei *box* rappresentano le quantità di rifiuto effettivamente gestite secondo ciascuna tipologia di trattamento e che tengono conto del bilancio tra i flussi secondari entranti e flussi uscenti.

Ai fini dell'analisi LCA, le quantità di rifiuti negli impianti di stoccaggio (R13) che non sono state inviate a successivo trattamento nel 2014 (pari al 6% del totale gestito) sono state ripartite tra recupero e smaltimento (Figura 9 a destra); questo perché lo stoccaggio rappresenta un'operazione temporanea, mentre l'analisi LCA ha come obiettivo la valutazione dell'intero ciclo di vita del rifiuto, da quando viene prodotto a quando diventa un'emissione finale o un nuovo materiale utile. La ripartizione tra recupero e smaltimento è stata effettuata assumendo le stesse percentuali di destino in cui si ripartiscono i flussi in uscita dallo stoccaggio nel 2014 (ovvero, il 98,6% dei rifiuti stoccati è inviato a recupero, mentre la restante parte è destinata allo smaltimento in discarica).



**Figura 9.** Gestione di una tonnellata di miscela di rifiuti C&D inerti in regione Lombardia nel 2014 nel sistema LCA1: sulla sinistra è riportato il bilancio di massa che emerge dalle elaborazioni delle dichiarazioni MUD (Tabella 18), mentre a destra il bilancio tiene conto della ripartizione del rifiuto stoccato tra recupero e discarica (sistema di riferimento per l'analisi LCA1). Il simbolo "T" sulle frecce indica il trasporto dei rifiuti.

I processi inclusi nel sistema sono:

- lo stoccaggio (operazione R13) ed i relativi consumi di combustibile associati alla movimentazione interna dei rifiuti;
- il recupero di materia in impianti di riciclo (operazione R5) per la produzione di aggregati riciclati; contestualmente viene considerato anche il quantitativo di metalli ferrosi separati e inviati alla rispettiva filiera di recupero;

- lo smaltimento in discarica;
- l'evitata produzione di aggregati naturali;
- l'evitata produzione di metalli ferrosi;
- i trasporti, che comprendono i trasporti associati al conferimento dei rifiuti agli impianti (flussi diretti e secondari) e i trasporti per la commercializzazione degli aggregati riciclati e di quelli naturali.

Per quanto concerne i processi inerenti il recupero dei C&D, l'evitata produzione di aggregati naturali, i trasporti associati al conferimento dei rifiuti e le operazioni di stoccaggio sono stati utilizzati dati primari, derivati da diverse fonti: dati statistici ufficiali (MUD, Statistiche Cave provinciali), dati ricavati tramite visite tecniche presso alcuni impianti di trattamento dei rifiuti e siti estrattivi e/o indagini telefoniche dirette agli utilizzatori finali degli aggregati riciclati (imprese stradali).

Per lo smaltimento in discarica dei rifiuti, invece, è stato impiegato un modulo di ecoinvent 3.3 già esistente (*Inert waste, Europe without Switzerland, treatment of inert waste, sanitary landfill*), modificato utilizzando dati sito-specifici di una discarica per inerti della provincia di Torino, presentati nel lavoro di Blengini et al., (2010) al fine di renderlo più rappresentativo del contesto italiano.

Per quantificare i benefici derivanti dalle operazioni di riciclo dei metalli ferrosi separati durante il trattamento dei C&D, invece, si è fatto riferimento al lavoro di Rigamonti et al., (2015) dove è stato analizzato il recupero dei metalli dai RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) in regione Lombardia.

## **2.3.2 Inventario dello scenario attuale**

### **2.3.2.1 Trattamento di riciclo dei C&D misti**

Per raccogliere i dati di inventario necessari a quantificare i flussi di materiali, energia e le emissioni nell'ambiente associate al trattamento di recupero dei rifiuti inerti C&D, sono stati effettuati alcuni sopralluoghi presso i principali impianti operativi in regione, individuati e selezionati sulla base dell'analisi della banca dati MUD. In totale sono stati visitati 9 impianti di riciclo, di cui:

- 2 impianti a struttura fissa alimentati ad energia elettrica (EE) indicati come impianti A: A1 e A2, entrambi situati nella provincia di MI;
- 4 impianti cingolati alimentati a gasolio, indicati come impianti B: B1 e B2 situati in provincia di MI, B3 in provincia di BS e B4 in provincia di BG
- 3 impianti cingolati a gasolio con annessa stazione di cernita degli imballaggi da cantiere, indicati come impianti C: C1 situato in provincia di MI, C2 in MB e C3 a LC.

Ai fini dell'analisi LCA1, gli impianti B e C sono stati raggruppati in un'unica categoria indicata come "impianti a gasolio", data l'analogia del processo di trattamento e della tipologia di aggregati riciclati prodotti.

Per le informazioni di dettaglio di ciascun impianto si rimanda al paragrafo 2.1.1 dell'Allegato 2 della presente relazione.

Per questi impianti, i rifiuti principali in ingresso sono rappresentati dai rifiuti misti (65,1% CER 17 09 04 e 4,2% CER 17 01) e dalle terre e rocce da scavo (CER 17 05 04, 29%), mentre i rifiuti da demolizione delle pavimentazioni stradali (CER 17 03 02) e gli altri rifiuti non minerali (CER 17 02, 17 04 e 17 08 02) sono piuttosto limitati, rispettivamente pari all'1,4% e allo 0,41%. I rifiuti conferiti agli impianti, dopo pesatura e controllo, vengono stoccati separatamente e miscelati tra loro prima del trattamento di recupero, o a valle di questo, ad esclusione delle terre e rocce da scavo (CER 17 05 04) che invece vengono trattate separatamente. Si sottolinea che, come emerso durante i sopralluoghi, anche le miscele bituminose (CER 17 03 02) e i rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02) vengono miscelati alle macerie per la produzione di aggregati riciclati misti, in misura tale da rientrare nei limiti in peso stabiliti negli Allegati C1 - C5 della Circolare del Ministero dell'Ambiente n°5205/2005 per i diversi destini di impiego.

### **Caratteristiche degli impianti di riciclo e bilanci di massa**

In relazione alle caratteristiche tecnologiche degli impianti visitati, ciò che è emerso dai sopralluoghi è che gli impianti a struttura fissa rispetto a quelli su cingoli sono dotati di macchinari più potenti e performanti che consentono di ottenere migliori efficienze di trattamento, in termini di rimozione dei metalli e delle altre frazioni indesiderate (legno, plastiche, etc.); questi impianti producono aggregati riciclati di diverse classi granulometriche con caratteristiche qualitative omogenee e migliori proprietà tecniche, rispetto agli impianti a gasolio, in cui le tecnologie impiegate sono più semplici, gli step meccanici meno efficaci e la vagliatura è spesso opzionale. Per contro, tuttavia, gli impianti a struttura fissa inducono un maggior consumo di suolo ma soprattutto hanno costi di costruzione e gestione più elevati e richiedono tempi di installazione più lunghi. Per tali ragioni, gli impianti cingolati a gasolio sembrano essere la soluzione tecnologica più diffusa in regione Lombardia. Per calcolare le percentuali di destino alle due tipologie di impianti di recupero, si è considerato il quantitativo di rifiuto conferito ai 9 impianti esaminati: risulta che circa l'86,1% dei rifiuti viene trattato in impianti a gasolio mentre la quota degli impianti fissi risulta pari al 13,9% (Figura 10). Si sottolinea che i 9 impianti visitati, che rappresentano un campione piuttosto ristretto rispetto ai 378 impianti di recupero operativi in regione, individuati dall'analisi dei dati MUD (vedi Tabella 4), hanno comunque ricevuto circa il 20% del rifiuto inerte C&D gestito complessivamente in regione. Per estendere l'indagine ad un campione di impianti più ampio è stato inviato un questionario a tutti i soggetti che nel 2014 hanno svolto operazioni di recupero dei rifiuti inerti C&D (si veda Allegato 2, paragrafo 2.1.2). L'invio dei questionari è stato effettuato da ARPA Lombardia per mezzo dell'applicativo O.R.SO, sulla base dell'elenco aggiornato degli impianti predisposto a tal scopo. Tuttavia, il tasso di risposta ai questionari è stato piuttosto esiguo:

sono pervenuti in totale 18 questionari compilati di cui solo 12 sono risultati idonei all'analisi. I dati raccolti in tal modo mettono in luce che la percentuale di impianti alimentati ad energia elettrica potrebbe essere maggiore di quella calcolata poco sopra (23% invece di 13,9%). Nello scenario base si è comunque deciso di assumere 13,9% come percentuale di trattamento dei rifiuti in impianti alimentati ad energia elettrica, in quanto i risultati dei questionari sono pervenuti in un secondo momento. I dati raccolti tramite i questionari confermano quanto emerso durante le visite tecniche ai 9 impianti in termini di efficienza del trattamento e di consumi associati. Pertanto, i dati di inventario mostrati nelle Tabella 19-Tabella 22 e derivanti dai 9 impianti possono essere considerati rappresentativi del recupero in miscelazione dei C&D in regione.

Si precisa che i dati forniti dal gestore dell'impianto A2 sono stati esclusi dal calcolo del bilancio di massa per gli impianti alimentati ad energia elettrica (presentato in Figura 10) in quanto ritenuti poco attendibili; infatti, le quantità di rifiuti trattati e le MPS prodotte risultano molto inferiori rispetto all'informazione contenuta nel MUD riguardo i rifiuti C&D conferiti all'impianto e sottoposti a recupero. Pertanto, nelle valutazioni non sono stati considerati i dati dell'impianto A2 per i flussi in uscita (aggregati riciclati prodotti, rifiuti separati e scarti) mentre è stata mantenuta esclusivamente l'indicazione qualitativa relativa alle caratteristiche e ai destini di impiego degli aggregati riciclati.

Oltre agli aggregati riciclati, negli impianti di recupero C&D vengono prodotti anche altri flussi di rifiuti e scarti di lavorazione, che seguono i seguenti destini:

- i metalli ferrosi, costituiti da barre di ferro contenute nelle macerie, sono separati tramite deferrizzatori e destinati a riciclo; il materiale ferroso viene inviato ad un primo impianto che esegue un pre-trattamento, con l'obiettivo di scartare l'eventuale materiale non recuperabile e di preparare la restante parte all'invio all'acciaieria per la produzione di acciaio secondario;
- il legno, la plastica e altri rifiuti recuperabili misti (ad esempio pezzi di tappezzeria, gomma e cavi) sono separati dalle macerie in ingresso tramite macchinari come classificatori ad aria (solitamente presenti solo negli impianti fissi) oppure tramite cernita manuale, effettuata sia prima che dopo la fase di frantumazione, e successivamente inviati ad appositi impianti di selezione; qui il materiale, in base alla sua qualità, può essere inviato a recupero di materia, ad incenerimento o smaltito;
- gli scarti del trattamento (non recuperabili) sono smaltiti in discariche per inerti.

Nell'analisi non è stato modellizzato il destino dei rifiuti recuperabili, del legno e della plastica, in quanto la quantità prodotta rappresenta una minima parte del totale (0,3% del quantitativo di rifiuti avviato a recupero – Figura 10); inoltre non si conosce di preciso quale sia il loro destino. Infine, queste frazioni non dovrebbero essere presenti nel sistema di riciclo dei rifiuti C&D perché dovrebbero essere separate alla fonte, ovvero direttamente in cantiere, tramite operazioni di demolizione selettiva e cernita in situ.

**Tabella 19.** Sintesi delle informazioni raccolte durante le visite tecniche agli impianti di recupero dei rifiuti C&D; gli impianti a gasolio comprendono il tipo B (B-B4) e il tipo C (B5-B7).

Tipologia impianto	C&D conferiti <sup>1</sup> nel 2014 [t]	C&D trattati <sup>2</sup> nel 2014 [t]	MPS prodotta <sup>2</sup> nel 2014 [t]	Altri prodotti e scarti [t] <sup>2</sup>				
				Metalli ferrosi	Legno	Plastica	Rifiuti misti	Scarti in discarica
Impianto ad EE A1	89.477	90.424	90.274	112	-	-	38	-
Impianto ad EE A2	88.249	25.250	24.000 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-
Impianto a gasolio B1	172.638	138.561	138.555	4,8	1	-	-	-
Impianto a gasolio B2	306.723	309.060	308.913	142,3	2,8	1,8	0,2	-
Impianto a gasolio B3	158.133	147.422	146.443	140	88	-	62	689
Impianto a gasolio B4	108.612	103.745	103.642	99	1,2	1,2	1,6	-
Impianto a gasolio B5	180.243	202.014	199.029	628	2.221	63	-	-
Impianto a gasolio B6	130.062	129.872	127.106	208	554	-	563	1.440
Impianto a gasolio B7	43.500	43.497	43.240	191	22	43	-	-
<b>Totale</b>	<b>1.277.817</b>	<b>1.164.595</b>	<b>1.181.201</b>	<b>1.525</b>	<b>2.890</b>	<b>109</b>	<b>665</b>	<b>1.129</b>

<sup>1</sup> Dati ricavati dalle schede MUD degli impianti.

<sup>2</sup> Dati raccolti durante le visite agli impianti di trattamento.

<sup>3</sup> Il bilancio di massa dell'impianto A2 non è stato considerato in quanto ritenuto poco attendibile dalle verifiche con i dati MUD.

### **Tipologia, caratteristiche ed utilizzi degli aggregati riciclati prodotti**

Durante l'attività di sopralluogo sono state raccolte le informazioni relative alle caratteristiche qualitative e quantitative delle MPS prodotte dal riciclo dei rifiuti inerti C&D ed il relativo destino di impiego, in relazione alle caratteristiche tecnico-prestazionali degli aggregati riciclati (AR).

I dati rilevati dimostrano che la tipologia e l'impiego degli AR varia in funzione del tipo di trattamento applicato e del livello tecnologico degli impianti: gli impianti a struttura fissa (tipo A) producono due o tre diverse classi dimensionali di AR, con elevate efficienze di recupero (pari a circa il 99,8%) che sono in parte dovute anche alle caratteristiche del rifiuto sottoposto a trattamento. Questi impianti, infatti, richiedono ai propri conferitori che il rifiuto sia il più possibile pulito e privo di frazioni indesiderate, applicando rigidi controlli all'ingresso. Ciò permette di ottenere AR con caratteristiche più omogenee e con migliori qualità rispetto agli AR prodotti negli impianti cingolati; solo negli impianti fissi, infatti, gli aggregati riciclati prodotti sono in parte utilizzati nella costruzione di strati di fondazione in misti cementati per la quale sono richiesti requisiti tecnico-prestazionali più stringenti rispetto ad esempio all'utilizzo in sottofondi stradali. Impieghi più nobili degli aggregati riciclati risultano comunque limitati, infatti solo lo 0,2% del totale dell'MPS prodotta dai 9 impianti è conforme all'utilizzo in strati di fondazione o nel confezionamento di calcestruzzi magri (Tabella 20 e Tabella 21). Tra gli impianti cingolati di tipo B, si è osservato che il 50% produce aggregati misti in frazione unica (classi 0/63 e 0/80) e il 50% effettua la separazione dimensionale a valle del processo di triturazione, producendo due tipi di aggregati riciclati: AR fine (classe 0/25), generalmente impiegato in ripristini ambientali, e AR grosso (25/63), utilizzato prevalentemente in sottofondi stradali. Nel caso invece degli impianti cingolati con annessa stazione di cernita (tipo C), il processo di trattamento consiste esclusivamente nella riduzione volumetrica, nella rimozione dei metalli e nella separazione manuale delle altre frazioni recuperabili. In questa tipologia di impianti, quindi, si producono aggregati riciclati misti in frazione unica, di classe dimensionale 0/63 o 0/80, prevalentemente utilizzati in ripristini ambientali e in sottofondi di piazzali industriali/stradali. In Tabella 20 e Tabella 21 sono mostrati i dati raccolti in merito alla quantità, tipologia e destino d'uso degli aggregati riciclati prodotti rispettivamente negli impianti ad energia elettrica (A) e negli impianti a gasolio (B e C). Siccome l'uso degli aggregati riciclati nella costruzione di strati drenanti conformi all'Allegato C5 è stato rilevato solo per l'impianto A1 e rappresenta una percentuale ridotta (2,6% del quantitativo totale di MPS prodotta), in una prima analisi questo utilizzo è stato trascurato ed il quantitativo corrispondente (30.091 tonnellate, Tabella 20) è stato assegnato all'utilizzo in sottofondi e rilevati stradali (Allegati C1/C2).

Si sottolinea, inoltre, che gli aggregati prodotti risultano in possesso della Marcatura CE apposta in conformità con la norma armonizzata UNI 13242 per l'impiego di aggregati non legati e legati con leganti idraulici in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade. Gli aggregati riciclati soddisfano inoltre i criteri degli allegati C della Circolare Ministeriale n. 5205/2005 ed in particolare: gli aggregati grossi e quelli in frazione unica risultano conformi e destinati prevalentemente all'utilizzo nella costruzione dei corpi del rilevato (Allegato C1) e nella realizzazione di sottofondi stradali o di piazzali (Allegato C2), mentre gli

aggregati fini (0/25) e, in alcuni casi anche quelli in frazione unica, vengono di solito utilizzati in ripristini ambientali, come i riempimenti (Allegato C4). Nell'impianto A1 è prodotta anche MPS grossolana (63/125) interamente destinata alla costruzione di strati drenanti (Allegato C5); nell'impianto A2, sebbene in percentuali molto modeste, parte degli aggregati è stato destinato alla realizzazione di misti cementati in strati di fondazione (Allegato C3), alla costruzione di strati drenanti (Allegato C5) e, la frazione fine 0/10, alla produzione di calcestruzzi magri. Tuttavia, vista l'incertezza dei dati di questo impianto, e i quantitativi piuttosto ridotti di MPS, tali utilizzi sono stati trascurati nella definizione dello scenario attuale di recupero dei C&D in regione. Si sottolinea inoltre che in Tabella 20 e in Tabella 21, così come in Figura 10, gli utilizzi dei materiali riciclati nei corpi del rilevato e nei sottofondi sono stati considerati come un'unica categoria perché le caratteristiche tecniche e prestazionali richieste per la conformità agli Allegati C1 e C2 sono molto simili (vedi schede della Circolare Ministeriale presenti nell'Allegato 3); infatti, i gestori degli impianti che producono aggregati da utilizzare nel corpo del rilevato (Allegato C1) attestano solitamente anche la loro conformità all'utilizzo nei sottofondi stradali (Allegato C2).

Le informazioni riguardo gli utilizzi dei materiali riciclati emerse da questa analisi sottolineano che, in regione Lombardia, gli aggregati riciclati misti vengono utilizzati per lo più in applicazioni di medio-basso livello (sottofondi stradali e riempimenti) e questo può essere dovuto a due aspetti: il primo, è legato al grado di qualità degli aggregati riciclati che può non essere tale da consentirne l'utilizzo in applicazioni che impongono limiti più restrittivi sulle proprietà tecniche (quali Allegato C3 e UNI EN 12620:2005), probabilmente a causa delle caratteristiche fortemente eterogenee del rifiuto in ingresso agli impianti, che deriva prevalentemente da operazioni di demolizione non selettiva. Il secondo aspetto, ugualmente importante, è legato alle caratteristiche locali del mercato e della domanda di aggregati riciclati: infatti, nonostante gli aggregati riciclati siano in possesso della marcatura CE, tutti i gestori degli impianti hanno evidenziato una forte resistenza da parte degli utilizzatori finali (Direzione Lavori) nell'impiego di questi materiali, a causa della loro origine dai rifiuti e della diffidenza nelle caratteristiche tecnico-prestazionali di questi prodotti in confronto con gli aggregati naturali. In mancanza di un mercato solido e stabile per questi materiali, i gestori degli impianti non sono incentivati a incrementare l'intensità della lavorazione per ottenere prodotti di maggiore qualità se non è certo il ritorno economico derivante dalla loro vendita.

**Tabella 20.** Sintesi dei dati relativi alla tipologia e destini d'uso degli aggregati riciclati prodotti negli impianti di riciclo alimentati ad energia elettrica visitati (tipo A).

Impianto	Tipologia MPS	Quantità prodotta (t)	Utilizzi aggregati riciclati (%)				
			Rilevati (C1) e sottofondi (C2)	Fondazioni (C3)	Ripristini ambientali (C4)	Strati accessori (C5)	CLS magri (bassa resistenza)
A1	(0/25)	30.091	0	0	100%	0	0
	(25/63)	30.091	90%	0	10%	0	0
	(63/125)	30.091	0	0	0	100% <sup>(1)</sup>	0
A2 <sup>(2)</sup>	(0/10)	12.000	90%	0	0	0	10%
	(10/60)	12.000	80%	10%	0	10 %	0

<sup>(1)</sup> La percentuale è stata assegnata a C1/C2 ai fini dell'analisi LCA1

<sup>(2)</sup> Non considerato ai fini del bilancio di massa degli impianti alimentati ad energia elettrica

**Tabella 21.** Sintesi dei dati relativi alla tipologia e destini d'uso degli aggregati riciclati prodotti negli impianti di riciclo alimentati a gasolio visitati (tipo B:B1-B4 e C:B5-B7).

Impianto	Tipologia MPS	Quantità prodotta (t)	Utilizzi aggregati riciclati (%)				
			Rilevati (C1) e sottofondi (C2)	Fondazioni (C3)	Ripristini ambientali (C4)	Strati accessori (C5)	CLS magri (bassa resistenza)
B1	(0/25)	66.634	0	0	100%	0	0
	(25/63)	71.921	90%	0	10%	0	0
B2	(0/25)	153.520	0	0	100%	0	0
	(25/63)	155.393	90%	0	10%	0	0
B3	(0/63)	146.443	100%	0	0	0	0
B4	(0/80)	103.642	50%	0	50%	0	0
B5	(0/63)	199.029	90%	0	10%	0	0
B6	(0/80)	127.106	10%	0	90%	0	0
B7	(0/80)	43.240	100%	0	0	0	0

### Consumi ed emissioni degli impianti di riciclo

Durante le visite agli impianti sono state raccolte anche informazioni inerenti i consumi di energia elettrica (solo negli impianti fissi), di gasolio e di altri materiali ausiliari, che comprendono la lega di acciaio-manganese per il ricambio delle parti meccaniche maggiormente soggette ad usura (mascelle dei frantoi) e l'acqua, utilizzata per l'abbattimento delle polveri che possono svilupparsi durante la triturazione delle macerie e lo scarico delle MPS dai nastri. I dati, forniti in termini di consumi totali registrati nel 2014, sono stati riferiti al quantitativo di rifiuti trattato nello stesso anno per poter stimare i valori medi dei consumi specifici, riportati in Tabella 22 insieme alla rispettiva deviazione standard indicata tra parentesi; si sottolinea che la deviazione standard per i consumi di energia elettrica e di gasolio negli impianti alimentati ad energia elettrica risulta nulla in quanto i risultati si riferiscono ai soli consumi dell'impianto A1. In seguito, dall'analisi dei questionari è emerso che, per i 6 impianti ad energia elettrica che hanno fornito dati rappresentativi, il consumo di elettricità medio è pari a 1,11 kWh/t (con una deviazione standard di 0,01), dato del tutto in linea con il consumo dell'impianto A1 utilizzato per la modellizzazione. La stessa considerazione è stata fatta per il consumo di gasolio, per cui si dispone solo del valore dell'impianto A1 (0,25 l/t): la media dei consumi di gasolio dei 6 impianti che hanno compilato il questionario è di 0,38 l/t, in linea con il dato di inventario in Tabella 22 (deviazione standard pari a 0,06). Si nota che negli impianti alimentati ad energia elettrica non compare il consumo di acqua, in quanto, nei due impianti visitati, in corrispondenza dei frantoi sono presenti sistemi di aspirazione che inviano l'aria carica di polveri ad un impianto di abbattimento con filtri a manica; trattamenti così sofisticati non sono presenti negli impianti mobili alimentati a gasolio, dove per l'abbattimento delle polveri vengono usati spruzzi d'acqua attraverso ugelli nebulizzatori disposti in corrispondenza dei punti più critici. La deviazione standard del consumo di acqua risulta abbastanza elevata (1,17) in ragione del fatto che tale consumo dipende dalle specifiche caratteristiche di ciascun impianto di trattamento. Ad esempio, in alcuni casi l'acqua utilizzata per l'abbattimento delle polveri, viene raccolta insieme all'acqua piovana di ruscellamento e ricircolata dopo una fase di sedimentazione e reintegrata quando necessario (impianti B1, B2 e B3); quindi, in questi impianti che implementano un "ciclo chiuso" per l'acqua, il consumo netto di acqua dipende dall'entità del reintegro annuale; in altri casi (impianto B7), invece, viene utilizzata solo acqua piovana proveniente dalle vasche di raccolta, di conseguenza il consumo di acque netto risulta nullo.

**Tabella 22.** Consumi specifici medi e deviazione standard (in parentesi) degli impianti di riciclo C&D visitati.

	Consumi <sup>1</sup>			
	Energia elettrica [kWh/t]	Gasolio [l/t]	Acqua [l/t]	Acciaio [kg/t]
Impianti alimentati ad EE	1,13 (0) <sup>2</sup>	0,25 (0) <sup>2</sup>	-	0,02 (0,01)
Impianti alimentati a gasolio	-	0,64 (0,166)	1,56 (1,17)	0,02 (0,01)

<sup>1</sup> I consumi specifici sono calcolati come rapporto tra i valori di consumo medi annui forniti dai gestori degli impianti e il quantitativo di rifiuto C&D trattato (riportato in Tabella 19).

<sup>2</sup> La deviazione standard dei consumi di energia elettrica e gasolio degli impianti alimentati ad energia elettrica risulta nulla in quanto i risultati di inventario si riferiscono ai soli consumi dell'impianto A1.

### **Il riciclo dei metalli ferrosi**

I metalli ferrosi separati durante il trattamento sono inviati a recupero per la produzione di acciaio secondario, dopo una fase preliminare di selezione e pressatura effettuata in impianti di cernita dei metalli. Il trattamento dei metalli ferrosi è simulato in SimaPro attraverso un processo costruito *ad hoc* sulla base del lavoro di Rigamonti et al., (2015) in cui è stato ipotizzato che i rifiuti metallici vengono inviati ad un impianto in cui prima si effettua una selezione del materiale (efficienza 91%) e in seguito la vera e propria operazione di riciclo (efficienza 88,1%); il rapporto di sostituzione tra acciaio secondario e primario è assunto 1:1 in massa. La distanza per il conferimento dei rifiuti metallici all'impianto di selezione è stata assunta pari a 10 km, dato ricavato dall'analisi dei MUD degli impianti di riciclo che dichiarano la quantità di metalli ferrosi separati durante il trattamento ed il rispettivo destino. Gli scarti della prima fase di selezione a cui sono sottoposti i rifiuti metallici vengono smaltiti in discarica per inerti, ipotizzando che siano composti da residui di cemento rimasti adesi alle barre di ferro. I trasporti dei metalli ferrosi dagli impianti di riciclo C&D alla selezione, degli scarti dalla selezione alla discarica e dei metalli dalla selezione all'acciaieria avvengono attraverso grandi camion, >32 tonnellate (di cui il 50% Euro3 e il 50% Euro4), per una distanza pari a 50 km (Rigamonti et al., 2015).

### **Lo smaltimento in discarica degli scarti**

Per lo smaltimento in discarica degli scarti della lavorazione degli impianti mobili è stato utilizzato un modulo di ecoinvent 3.3 già esistente, modificato *ad hoc* per meglio adattarlo al sistema oggetto di studio (si veda paragrafo 2.3.2.5 per approfondimento).

### **Sintesi del trattamento di riciclo**

In Figura 10 è rappresentato lo schema complessivo del bilancio di massa di una tonnellata di rifiuto misto in ingresso al sistema di recupero regionale, in cui sono riportati anche i consumi associati al trattamento e gli utilizzi delle MPS prodotte dagli impianti. Dai risultati si evince che i rifiuti ferrosi, il legno, la plastica e gli altri rifiuti recuperabili rappresentano, complessivamente, una piccola percentuale del rifiuto totale trattato negli impianti, pari allo 0,43%; anche gli scarti prodotti dal trattamento, che vengono smaltiti in discarica, sono piuttosto ridotti (0,17%) e presenti nei soli impianti mobili. Quindi, complessivamente, il sistema di recupero presenta efficienze piuttosto elevate, che si attestano al 99,4%, in termini di MPS prodotta rispetto al totale di rifiuti trattati.

Le ripartizioni percentuali della tipologia degli impianti di recupero (alimentati ad energia elettrica o a gasolio) e della tipologia/qualità degli aggregati riciclati prodotti saranno oggetto di un'analisi di sensitività mostrata al paragrafo 2.3.3.

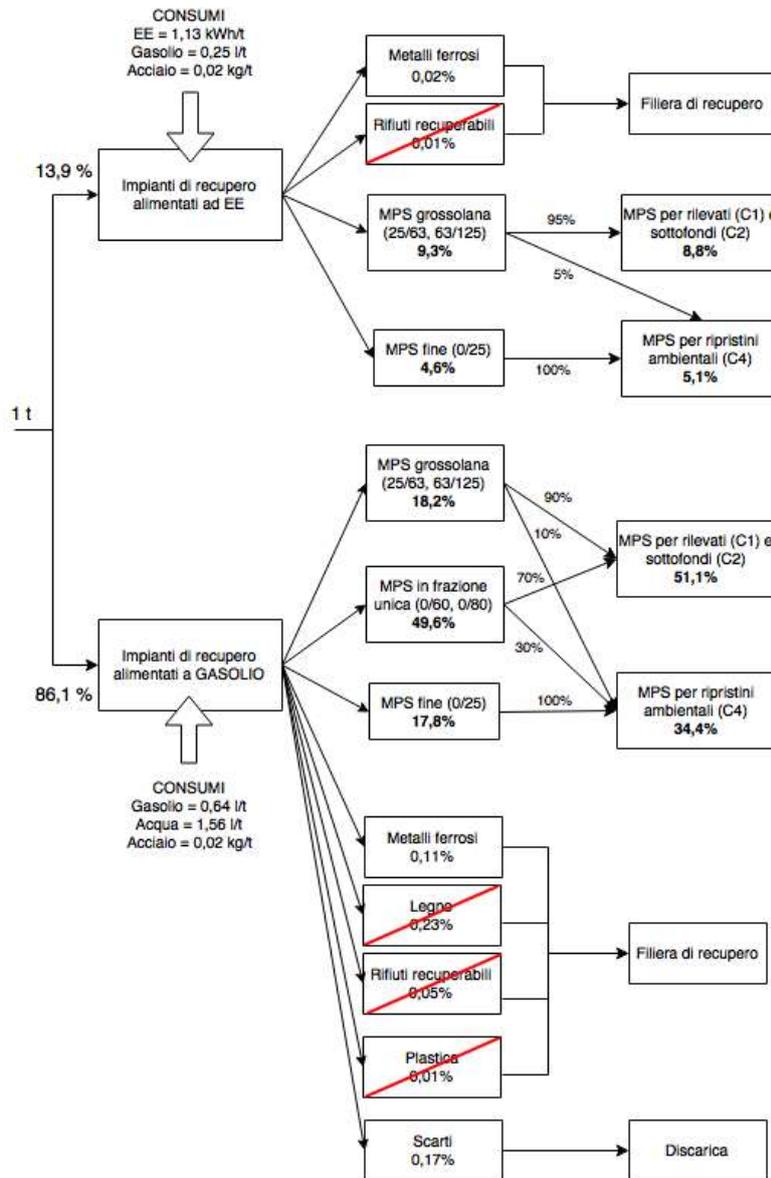


Figura 10. Bilancio di massa di 1 tonnellata di rifiuti C&D misti in ingresso al sistema di recupero in regione.

### 2.3.2.2 Risorse minerali naturali evitate

#### Modellizzazione dell'attività estrattiva

Effettuare la modellizzazione del processo di estrazione delle risorse minerali dalle cave di sabbia e ghiaia e quindi della produzione dei materiali vergini solitamente impiegati nel settore delle costruzioni ha permesso di quantificare gli impatti ambientali evitati grazie all'utilizzo degli aggregati riciclati in sostituzione delle risorse naturali non rinnovabili in regione Lombardia. L'attività estrattiva si compone di due fasi principali: l'estrazione di sabbia e ghiaia dai giacimenti naturali e la successiva lavorazione. Il materiale estratto e non sottoposto ad alcuna lavorazione, ma venduto ed utilizzato così com'è viene detto "mistone naturale", mentre

per “aggregati naturali” si intendono i materiali ottenuti dalla lavorazione del mistone e quindi sabbie, ghiaie, pietrischi, pietrischetti, etc., di diverse classi granulometriche. La raccolta di dati sito-specifici riguardo questo processo è di fondamentale importanza, in quanto i consumi specifici degli impianti di lavorazione del mistone, i trasporti, i prezzi di vendita dei prodotti finiti e la loro commercializzazione dipendono fortemente dal contesto geografico della zona di riferimento.

Per la modellizzazione dell'estrazione della risorsa naturale (mistone) e della produzione degli aggregati naturali di sabbia e ghiaia in regione ci si è serviti di diverse fonti di dati:

- i Piani Cave provinciali;
- le Statistiche Cave provinciali, fornite dai referenti degli *uffici settore estrattivo* presso le Province;
- sopralluoghi presso alcuni siti estrattivi e impianti di produzione degli aggregati naturali attivi in regione.

Analizzando tutti i Piani Cave relativi al solo settore estrattivo di sabbia e ghiaia, è stato possibile individuare i numeri degli Ambiti Territoriali Estrattivi (ATE) in ogni provincia, i volumi autorizzati totali e le tipologie di coltivazione prevalenti in regione, che risultano essere: a fossa a secco (tipica delle zone di pianura), a fossa in falda (tipica delle zone di pianura con presenza di falda superficiale) e a terrazzo/anfiteatro (tipica delle zone alpine e prealpine). Come si può notare dai dati riportati sinteticamente in Tabella 23, i giacimenti disponibili riguardano 10 province su 12 in quanto nella provincia di Lecco non sono presenti siti estrattivi di sabbia e ghiaia e non compare la provincia di Monza Brianza che non ha ancora presentato il proprio Piano Cave. Infatti, il Piano Cave della provincia di Milano è stato approvato nel 2006, quindi include anche gli ATE della provincia di Monza Brianza, istituita nel 2004, ma diventata operativa nel 2009. In Tabella 23 è riportato un riassunto dell'elaborazione dei dati effettuata sui Piani Cave approvati dalla regione e ad oggi vigenti: dalla tabella si evince che, in regione, la coltivazione più diffusa è quella a fossa, indice del fatto che i giacimenti di sabbia e ghiaia attivi sono ubicati principalmente nelle zone di pianura. Il numero totale di ATE autorizzati per l'estrazione di sabbia e ghiaia, pari a 241, non è in realtà indicativo del numero di cave attive sul territorio, in quanto in uno stesso ATE possono essere presenti più siti estrattivi, così come può accadere che alcuni giacimenti autorizzati per l'estrazione non siano ad oggi effettivamente attivi.

Il dato di maggior rilievo emerso da questa analisi è quello relativo all'elevato volume di sabbia e ghiaia autorizzato all'estrazione (283.074.399 m<sup>3</sup> in 10 anni), che evidenzia, da un lato, come il settore estrattivo risulti molto sviluppato in regione, in stretta dipendenza di un'intensa attività costruttiva, e, dall'altro, come la pianificazione territoriale sia poco restrittiva, rendendo disponibile un ingente volume di risorse naturali. Questo aspetto può rappresentare una potenziale criticità per lo sviluppo di un mercato delle risorse secondarie in regione: l'ampia disponibilità delle materie vergini e la ridotta tassazione associata al settore estrattivo rendono possibile un prezzo spesso al ribasso delle materie prime, contro il quale l'aggregato riciclato diviene poco competitivo.

**Tabella 23.** Sintesi dell'elaborazione dei dati estrapolati dai Piani Cave approvati in regione Lombardia.

Provincia	Anno approvazione	Numero ATE	Volume autorizzato [m <sup>3</sup> ]	Volume autorizzato [%]		
				Fossa a secco	Fossa in falda	Terrazzo
BG	2008	25	34.470.000	44,4	44,1	11,5
BS	2004	53	65.980.000	50,1	49,9	0
CO	2003	11	9.395.000	0	0	100
CR	2003	27	15.342.400	20,9	58	21,1
LO	2004	13	15.080.000	0	60,9	39,1
MN	2003	13	25.850.000	83,9	16,1	0
MI	2006	32	56.395.000	31,5	62,6	5,9
PV	2007	44	34.100.000	8,2	49,3	42,5
SO	2007	15	5.561.999	6,9	93,1	0
VA	2008	8	22.900.000	81,2	0	18,8
<b>Totale</b>	-	<b>241</b>	<b>283.074.399</b>	<b>39,3</b>	<b>43,9</b>	<b>16,1</b>

Poiché i Piani Cave forniscono informazioni qualitative sui volumi cavabili, è stato necessario contattare le singole Province per raccogliere i dati statistici inerenti l'attività di estrazione di sabbia e ghiaia nell'anno 2014. Ogni cava, infatti, ha l'obbligo di presentare annualmente entro il mese di aprile una dichiarazione alla provincia di riferimento. Tale documento, chiamato "Statistica Cave", contiene le informazioni inerenti l'attività estrattiva e produttiva dell'anno precedente, come ad esempio la quantità di materiale estratto, i consumi di combustibili ed energia elettrica, il materiale commercializzato ed i rispettivi destini. Ogni provincia, dopo aver ricevuto i dati dalle singole imprese autorizzate all'attività di estrazione, li trasmette alla regione, la quale a sua volta provvede alla loro aggregazione e li consegna all'ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) che effettua le elaborazioni e statistiche a livello nazionale.

Per comprendere al meglio come interpretare e utilizzare i dati presenti nelle Statistiche Cave, è stato utile effettuare dei sopralluoghi tecnici presso alcuni siti estrattivi, dove sono di solito presenti anche gli impianti di lavorazione della materia prima vergine. Si è deciso di visitare una cava per ogni tipologia presente sul territorio regionale, in modo da avere un riscontro diretto di come avviene nella pratica l'estrazione del materiale e la sua lavorazione e quali sono i consumi associati.

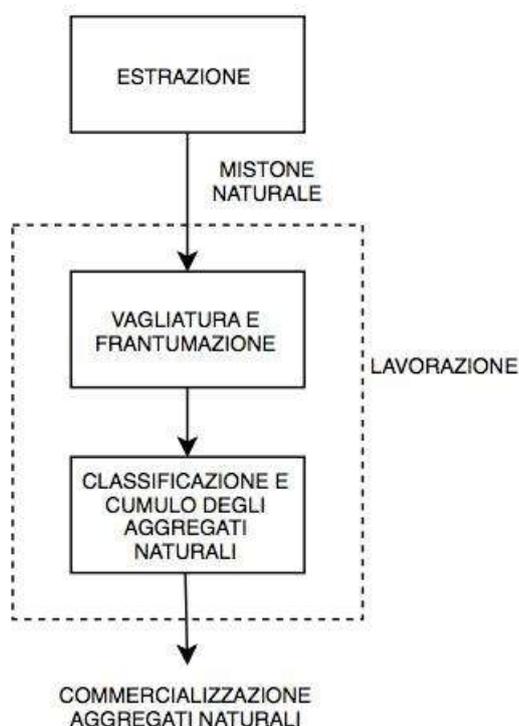
Unendo le informazioni presenti nei Piani Cave provinciali con quelle delle Statistiche Cave e delle visite tecniche è stato possibile creare il set di dati sito-specifici per la modellizzazione del processo di produzione dell'aggregato naturale in regione Lombardia da utilizzare nella successiva analisi di LCA.

#### Visite tecniche presso i siti estrattivi

Le visite tecniche sono state svolte con l'obiettivo di apprendere le differenze principali esistenti tra le tre tipologie di cave presenti sul territorio regionale e di capire quali sono i dati maggiormente rappresentativi del processo di estrazione e lavorazione della materia prima vergine. Consultando i Piani Cave provinciali della regione Lombardia è stato possibile selezionare alcuni siti estrattivi per ogni tipologia di coltivazione e

contattare telefonicamente i gestori degli impianti per organizzare i sopralluoghi. Per i dettagli inerenti ciascun sito estrattivo visitato si rimanda al paragrafo 2.4.1 dell'Allegato 2.

In Figura 11 è rappresentato lo schema che descrive in generale come avviene la produzione degli aggregati naturali, composta da una prima fase di estrazione del mistone e da una successiva fase di lavorazione. La lavorazione è composta solitamente da una linea di vagliatura per la produzione delle varie granulometrie di sabbia e ghiaia tondeggianti e da una linea parallela di triturazione e vagliatura delle frazioni più grossolane per la produzione degli "spaccati". Inoltre, le sabbie sono di solito sottoposte a cicli di lavaggio e ciclonatura con l'obiettivo di effettuare la separazione delle sostanze ultrafini e limose che attecchiscono sulla sua superficie e che vanno rimosse quando si vogliono utilizzare le sabbie nella produzione di cementi e bitumi.



**Figura 11.** Fasi principali della produzione di aggregati naturali: estrazione del mistone naturale e lavorazione.

I dati più rappresentativi emersi dalle visite tecniche effettuate, considerati per la modellizzazione del processo di estrazione del mistone e di produzione degli aggregati naturali (sabbie e ghiaie tondeggianti e “spaccati”), sono:

- la quantità di materiale cavato;
- i consumi di gasolio, energia elettrica ed acqua;
- i consumi di lega di acciaio per la manutenzione dei mulini a martelli e dei mulini a mascelle della linea di frantumazione per la produzione di spaccati;
- la quantità di materiale venduto ed i rispettivi destini, in quanto la distanza di commercializzazione dei prodotti influenza i consumi e le emissioni associate al trasporto.

Osservando poi le differenze nei dati raccolti per le diverse modalità estrattive, è possibile fare delle riflessioni di carattere generale, utili anche per la successiva interpretazione dei dati delle Statistiche Cave. I dati raccolti durante le indagini alle diverse cave vengono messi a confronto in Tabella 24, dove i consumi specifici si riferiscono alla quantità di aggregati commercializzati nell'anno di riferimento. Questa scelta di allocare i consumi sul materiale naturale venduto è giustificata dal fatto che le stime basate sui quantitativi di aggregati naturali commercializzati risultano molto simili a quelle basate sul materiale lavorato dalla cava (Tabelle 47 e 48 dell'Allegato 2 - paragrafi 2.4.1.1 e 2.4.1.2), in quanto l'attività viene di solito modulata sulla base della richiesta di mercato per ragioni economiche, e dunque i due valori tendono a corrispondere. In secondo luogo bisogna tenere presente che l'informazione inerente il materiale commercializzato è più facilmente reperibile nelle Statistiche Cave rispetto alla quantità di materiale sottoposto a lavorazione. Infatti le informazioni che devono essere dichiarate nei documenti delle Statistiche Cave comprendono i quantitativi di aggregati commercializzati e del materiale cavato; quest'ultimo dato, però, non sempre coincide con il quantitativo effettivamente lavorato. Infine, nell'ottica dell'analisi di ciclo di vita, si è ritenuto più coerente dal punto di vista metodologico allocare i consumi al materiale venduto, poiché l'aggregato riciclato prodotto dal recupero dei rifiuti C&D andrà di fatto a sostituire l'aggregato naturale immesso sul mercato nell'anno di riferimento.

**Tabella 24.** Confronto tra i consumi specifici delle cave oggetto delle visite tecniche, riferiti alla quantità totale di aggregati naturali commercializzati nell'anno di riferimento.

Cava	Materiale venduto [t]	Consumi specifici				
		EE [kWh/t]	Gasolio [l/t]	Acqua [m <sup>3</sup> /t]	Martelli [kg/t]	Mascelle [kg/t]
Fossa a secco	90.216	1,35	0,34	0,84	0,01	-
Fossa in falda	120.000	10,69	0,45	0	-	-
Terrazzo	104.000	3,07	3,85	0,35	0,03	0,002

La prima osservazione che si può fare riguardo i dati mostrati in Tabella 24 è che i consumi di energia elettrica della cava a fossa in falda sono molto più ingenti rispetto a quelli degli altri due siti: questo è dovuto al fatto che la cava a fossa in falda utilizza una draga galleggiante alimentata ad energia elettrica per l'estrazione del materiale, costituita da una benna molto pesante in grado di raggiungere una profondità fino a 20 m. Quindi, oltre ai consumi di energia elettrica derivanti dal funzionamento dell'impianto di vagliatura e frantumazione, si aggiungono quelli legati alla fase di estrazione. Nelle cave a fossa a secco e a terrazzo, i consumi elettrici sono essenzialmente legati alla fase di lavorazione del mistone naturale: il fatto che i consumi di energia elettrica della cava a terrazzo risultino più alti rispetto a quelli della cava a fossa a secco (rispettivamente 3,07 e 1,35 kWh/t) è da ricondursi alle caratteristiche del layout dell'impianto di lavorazione e alle caratteristiche litologiche del giacimento. Nello specifico, l'impianto visitato in provincia di Como è più articolato, produce una maggiore varietà di granulometrie di aggregati (11 tipologie granulometriche), ha due mulini a martelli e uno a mascelle e che effettuano una doppia frantumazione, mentre la cava in provincia di Bergamo ha un solo mulino a martelli e

produce 7 tipologie di aggregati naturali (per i dettagli consultare i report di ciascuna visitata in Allegato 2 – paragrafo 2.4.1).

I consumi di gasolio della cava a terrazzo sono più alti rispetto alle cave a fossa a secco e in falda, in quanto il metodo di escavazione adottato nelle cave di monte prevede lo spostamento del cappellaccio e il costipamento dei ripidi fronti di scavo attraverso mezzi meccanici molto potenti.

Per quanto riguarda i consumi di acqua netti, questi sono nulli per la cava a fossa in falda perché, per la lavorazione, non viene usata acqua estratta da pozzo, ma l'acqua è prelevata direttamente dal sito estrattivo e successivamente reimpressa nel lago artificiale. Si precisa che, il consumo d'acqua è da ricondursi alla fase di lavaggio delle sabbie, quindi un consumo più o meno elevato dipende dal contenuto di sostanze limose che attecchiscono sulla frazione fine del mistone, caratteristica intrinseca di ogni giacimento naturale di sabbia e ghiaia e pertanto non collegata al tipo di coltivazione specifica.

#### Analisi statistiche cave

La raccolta delle Statistiche Cave è stata effettuata contattando ogni provincia della regione per richiedere i dati statistici relativi all'attività estrattiva di sabbia e ghiaia dell'anno 2014. Come già introdotto, le informazioni contenute all'interno delle Statistiche Cave di interesse per la modellizzazione del processo di estrazione del mistone e produzione degli aggregati naturali comprendono: la quantità di materiale cavato, i consumi di gasolio, energia elettrica e acqua, le quantità di aggregati venduti, i rispettivi raggi di commercializzazione ed il prezzo medio di vendita dei prodotti. Alcune province hanno provveduto all'invio dei dati in forma disaggregata (Como, Cremona, Mantova e Sondrio), cioè fornendo i dati dichiarati da ogni sito estrattivo della provincia, mentre altre hanno inviato i dati in forma aggregata per l'intera provincia (Bergamo, Brescia, Lodi, Milano, Monza Brianza, Pavia e Varese). Dall'analisi dei dati è emerso che le province di Mantova e Sondrio non riportano all'interno delle statistiche i dati di consumo di energia elettrica; dopo aver approfondito ulteriormente questo aspetto con i responsabili provinciali del settore estrattivo, si è concluso che la mancanza del dato del consumo energetico è una peculiarità di questi territori, in cui i siti estrattivi di sabbia e ghiaia non hanno annesso l'impianto di lavorazione e le imprese vendono il mistone naturale a terzi per la lavorazione. Quindi, per queste province, l'elaborazione dei dati consente di ottenere i consumi specifici legati alla sola fase di estrazione del mistone naturale; per le altre province, invece, poiché i dati si riferiscono ai valori medi annuali complessivi dell'impianto, i consumi specifici ottenuti sono stati utilizzati per modellizzare l'intero ciclo produttivo di estrazione più lavorazione da cui si ottengono gli aggregati naturali. Alla luce di queste considerazioni, le Statistiche Cave sono state analizzate con l'obiettivo di dividere i dati in due gruppi e modellizzare due processi distinti:

- il processo di estrazione del mistone naturale;
- il processo di produzione di aggregati naturali (fase di estrazione più lavorazione).

Il set di dati rappresentativo delle cave che effettuano solo estrazione della materia prima vergine comprende le province di Mantova e Sondrio, in cui risultano attive rispettivamente 13 e 6 cave; a queste si sommano

due cave della provincia di Como e una cava della provincia di Cremona, che hanno fornito i dati in forma disaggregata e per le quali è stato possibile estrapolare le informazioni dei singoli siti estrattivi che effettuano solo l'estrazione del mistone naturale. Per le province che, invece, hanno fornito i dati in forma aggregata (dati rappresentativi di 176 siti attivi) e in cui è stato dichiarato il dato di consumo dell'energia elettrica, non è stato possibile fare nessuna elaborazione aggiuntiva, pertanto si è assunto che queste cave effettuano estrazione e successiva lavorazione in situ del materiale vergine.

In Tabella 25 e Tabella 26 sono riportate le elaborazioni dei dati per ogni provincia; per visionare i dati di partenza ricevuti dalle amministrazioni e approfondire la metodologia applicata per effettuare le elaborazioni delle statistiche si rimanda all'Allegato 2 -paragrafo 2.4.2. Per ottenere il set di dati di inventario caratteristico del contesto regionale in esame da usare nell'analisi LCA1, è stato necessario unire i dati di ogni provincia ottenuti dall'analisi delle Statistiche Cave: in particolare, i dati dei consumi specifici (energia elettrica, acque e gasolio) e del prezzo medio di vendita degli aggregati naturali sono stati pesati rispetto al quantitativo totale commercializzato in ciascuna provincia, mantenendo separati i due set di dati, uno per la modellizzazione della produzione del mistone naturale e l'altro per gli aggregati naturali. Nel caso in cui alcuni dati siano risultati mancanti nella statistica di singole cave, come il consumo di acqua o il prezzo medio di vendita, la media pesata è stata effettuata includendo le sole province che hanno dichiarato il dato. Dall'analisi è emerso che il consumo medio di gasolio per effettuare l'estrazione di mistone naturale è di 0,39 l/t; la produzione di aggregati naturali, invece, necessita di un consumo di energia elettrica di 1,83 kWh/t, un consumo di gasolio di 0,46 l/t e un consumo di acqua pari a 0,46 l/t. Dai dati pervenuti dai siti che effettuano solo estrazione di mistone naturale è emerso che il suo prezzo medio di vendita è di 5,3 €/t, mentre dalle statistiche delle cave che effettuano estrazione e lavorazione del materiale si ottiene un valore per il prezzo medio di vendita degli aggregati naturali di 8,7 €/t. Questi dati sono quelli utilizzati per la modellizzazione del prodotto evitato nell'LCA1.

**Tabella 25.** Elaborazione dei dati delle Statistiche Cave per le province e i siti estrattivi che producono solo mistone naturale.

Provincia	n. cave	Consumo gasolio [l/t]	Prezzo [€/t]	Destino					
				Sito	Comune	Provincia	Lombardia	Italia	Estero
Mantova	13	1,16	4,0	0,7%	0%	80,4%	17,5%	1,5%	0%
Sondrio	6	0,30	9,2	0%	9,6%	41,7%	42,1%	6,6%	0%
Como	2	0,40	4,6	0%	0%	68,9%	15,5%	15,5%	0%
Cremona	1	0,79	-	-	-	-	-	-	-

**Tabella 26.** Elaborazione dei dati delle Statistiche Cave delle province che producono aggregati naturali (estrazione più lavorazione).

Provincia	n. cave	Consumo EE [kWh/t]	Consumo gasolio [l/t]	Consumo acqua [l/t]	Prezzo [€/t]	Destino					
						Sito	Comune	Provincia	Lombardia	Italia	Estero
Bergamo	30	1,56	0,37	-	-	0%	0%	77,3%	19,1%	3%	0,6%
Brescia	62	0,64	0,45	-	-	16,4%	3,1%	50,5%	15,4%	14,5%	0%
Como	11	4,24	1,02	0,69	9,2	4,7%	1%	34,2%	19,2%	17,2%	23,8%
Cremona	5	2,57	0,92	0,9	6,9	1,3%	0,6%	33,7%	64,4%	0%	0%
Lodi	8	0,95	0,16	0,018	-	-	-	-	-	-	-
Milano	26	3,00	0,36	0,46	-	-	-	-	-	-	-
Monza Brianza	4	8,38	1,52	0,11	-	-	-	-	-	-	-
Pavia	17	1,48	0,3	-	-	15,8%	0%	22%	46,7%	15,5%	0%
Varese	13	2,66	0,75	0,51	-	5,4%	9,1%	37,8%	43,2%	0%	4,6%

### Calcolo del rapporto di sostituzione

Un punto focale nella valutazione degli impatti ambientali evitati dall'immissione sul mercato di aggregati riciclati è capire quali tipologie di materie prime sostituiscono e in che misura per le diverse applicazioni d'uso previste. La quantificazione della risorsa minerale vergine risparmiata avviene attraverso la definizione del rapporto di sostituzione.

Il metodo scelto per il calcolo del rapporto di sostituzione si basa su considerazioni riguardo le prestazioni tecniche (o meccaniche) e l'esistenza di un mercato degli aggregati riciclati. Esso prevede di calcolare il rapporto di sostituzione moltiplicando un primo termine,  $Q$ , che tiene conto delle caratteristiche prestazionali dell'aggregato riciclato nell'applicazione d'uso considerata, per un secondo fattore,  $M$ , rappresentativo del mercato dei prodotti riciclati in regione:

$$R = Q_1 * Q_2 * M$$

dove

- $R$  è il rapporto di sostituzione.
- $Q_1$  tiene conto delle caratteristiche qualitative dell'aggregato riciclato intese come "pulizia" dell'aggregato ovvero la presenza o meno di impurità, quali terra, legno, plastiche etc., che ne riducono il grado di qualità e ne determinano una minore appetibilità sul mercato;  $Q_1$  varia quindi tra 0 e 1. Ed è calcolato come rapporto tra le caratteristiche qualitative dell'aggregato riciclato a confronto con quelle della materia prima vergine che sostituisce. Dai sopralluoghi presso gli impianti di recupero C&D e dai colloqui con le imprese di costruzioni è emerso che, se un aggregato riciclato contiene un elevato contenuto di terra, l'utilizzatore finale tende a non accettare il carico, sia per evitare di avere maggiori difficoltà durante la posa in opera del materiale, sia per limitare i potenziali rischi associati a un maggior tenore di sostanze contaminanti nella componente terrosa durante i controlli in cantiere.
- $Q_2$  considera le prestazioni tecniche dell'aggregato riciclato riferite all'uso specifico rispetto a quelle della materia prima vergine sostituita e varia quindi tra 0 e 1.
- $M$  rappresenta il fattore di mercato ed è stato valutato come rapporto tra la quantità di aggregati riciclati venduta da un impianto e quella prodotta dalla lavorazione. Questo parametro è stato introdotto perché si sono riscontrate situazioni in cui il materiale riciclato pur essendo di buona qualità e quindi utilizzabile al posto di quello naturale, non riesce ad entrare nel mercato dei materiali da costruzioni rimanendo invenduto (ad esempio a causa della diffidenza che le imprese di costruzioni hanno nei confronti dei materiali riciclati, oppure perché l'utilizzatore non ne conosce le reali caratteristiche prestazionali) e, di fatto, non sostituisce alcun aggregato vergine. Si individuano due casi limite: il caso in cui l'impianto riesce a vendere interamente gli aggregati riciclati prodotti e allora  $M$  sarà uguale a 1; oppure il caso in cui gli aggregati riciclati prodotti risultino totalmente

invenduti, per cui il valore di M sarà assunto pari a 0. A seconda delle condizioni locali e dell'attività presente nel territorio, il valore di M oscillerà tra il valore minimo di 0 e il massimo di 1.

Dai dati raccolti negli impianti di recupero dei rifiuti C&D (Tabella 20 e Tabella 21 del paragrafo 2.3.2.1) emerge che gli aggregati riciclati sono utilizzati nella costruzione degli strati del corpo del rilevato e dei sottofondi (60% dell'MPS totale prodotta) e per ripristini ambientali (40% dell'MPS totale prodotta). Per capire quali materie prime vergini gli aggregati riciclati sostituiscono nelle varie applicazioni nel settore delle costruzioni civili e stradali e raccogliere informazioni riguardo alle loro prestazioni in confronto con i rispettivi materiali naturali, tramite l'Associazione Nazionale Costruttori Edili (ANCE) sono state contattate due imprese stradali che utilizzano aggregati riciclati e che hanno fornito informazioni utili per la presente valutazione del rapporto di sostituzione (per i dettagli si rimanda al paragrafo 2.6 dell'Allegato 2); sono stati consultati, inoltre, anche i Capitolati Speciali d'Appalto di grandi imprese di costruzioni. Dalle ricerche è emerso che, in base all'utilizzo, l'aggregato riciclato può sostituire mistone naturale oppure aggregato naturale (sabbia e ghiaia), in particolare:

- per gli usi nel corpo del rilevato e nei sottofondi (C1/C2) sostituisce il mistone naturale;
- per l'uso negli strati di fondazione (C3) sostituisce sabbia o ghiaia;
- per l'uso in ripristini ambientali come i riempimenti (C4) sostituisce mistone naturale;
- per l'uso in strati accessori (C5) sostituisce l'aggregato naturale (ad esempio se è utilizzato negli strati drenanti, il materiale sostitutivo potrebbe essere una ghiaia grossolana oppure uno spaccato);
- nella produzione di calcestruzzi a bassa resistenza sostituisce sabbia fine lavata oppure ghiaia fine.

In Tabella 28 sono riportati i dati riassuntivi inerenti le quantità di aggregati riciclati prodotti dagli impianti alimentati ad energia elettrica e dagli impianti alimentati a gasolio (riportati per ogni impianto visitato in Tabella 20 e Tabella 21) in base al rispettivo utilizzo nel settore delle costruzioni, con indicazione del materiale vergine che vanno a sostituire; dai risultati emerge che, ad oggi, gli aggregati riciclati sono quasi tutti destinati ad utilizzi legati alla costruzione del corpo del rilevato e dei sottofondi e/o alle operazioni di ripristino ambientale, andando quindi ad evitare l'impiego del solo mistone naturale. A questo proposito va evidenziato che i dati potrebbero non essere rappresentativi per l'intero contesto regionale, in quanto la presente analisi si riferisce alla produzione di aggregati e ai relativi destini d'uso finali valutati per i nove impianti visitati. È quindi possibile che alcuni destini d'uso, trascurati nella definizione e nell'analisi dello scenario attuale, come la realizzazione di strati accessori (C5) o l'impiego in misti cementati per strati di fondazione (C3), siano in realtà più diffusi rispetto a quanto emerso durante i sopralluoghi agli impianti di recupero dei C&D; date le incertezze, nel paragrafo 3.1.2.5 sono riportati i risultati dell'analisi di sensitività condotta variando le percentuali di uso e includendo negli scenari migliorativi anche quelle applicazioni al momento poco diffuse ma che potrebbero garantire benefici ambientali maggiori, in quanto il materiale naturale sostituito in questi casi è l'aggregato naturale lavorato (sabbia, ghiaia e pietrisco).

Riferendosi alla formula per il calcolo del rapporto di sostituzione precedentemente illustrata, per quanto riguarda la stima del parametro  $Q_1$ , ci si è basati sulle informazioni ricevute dai gestori degli impianti durante i sopralluoghi: in particolare, solo in due impianti (B4 e B5) il rifiuto in ingresso contiene molta terra e/o mattonelle e ceramiche, fatto che diminuisce la qualità dell'aggregato riciclato prodotto. Per questi due impianti, di conseguenza, il coefficiente  $Q_1$  è stato ridotto da 1 a 0,9, valore ipotizzato tenendo conto del fatto che gli aggregati riciclati devono rispettare comunque i limiti imposti dagli Allegati C1/C2, che impongono un limite sul contenuto di terra, pari al 15% in massa. Pesando il fattore  $Q_1$ , assegnato a ciascuno degli impianti visitati, rispetto alla rispettiva quantità di MPS prodotta, è stato ottenuto il valore medio di  $Q_1$  pari a 0,97, assunto rappresentativo per l'intero contesto regionale.

Per la stima del fattore  $Q_2$  è stato necessario differenziare il calcolo, in quanto, se si confrontano l'utilizzo nella costruzione del corpo del rilevato e nei sottofondi C1/C2 e i ripristini ambientali (C4), le modalità di posa in opera cambiano, insieme ai parametri tecnici di riferimento indicativi della relativa prestazione in campo. Quando l'aggregato riciclato conforme agli Allegati C1 e C2 viene utilizzato nelle costruzioni di sottofondi/rilevati stradali, la prestazione finale raggiunta dallo strato finito risulta del tutto paragonabile a quella degli aggregati naturali (mistone), come riferito dalle imprese stradali contattate: infatti, per superare le prove statiche su piastra, che si effettuano in cantiere dopo la costruzione di uno strato stradale, è necessario che gli aggregati raggiungano un valore minimo di portanza. A detta degli utilizzatori di aggregati riciclati, questo valore di soglia viene ampiamente soddisfatto sia dagli aggregati riciclati che da quelli vergini; per questo motivo, per l'utilizzo in rilevati e sottofondi (Allegati C1/C2), il fattore di prestazione  $Q_2$  è stato assunto pari a 1 in massa, ovvero per questa applicazione 1 kg di aggregato riciclato sostituisce 1 kg di mistone naturale. Per quanto riguarda l'utilizzo in ripristini ambientali (C4), le considerazioni da fare sono diverse: infatti, durante le azioni di riempimento, il materiale subisce solo una minima compattazione, viene cioè scaricato e livellato, quindi il parametro di riferimento, indicativo della prestazione, non è più la portanza, ma la massa volumica ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Quindi il fattore  $Q_2$  assunto per l'uso in C4 è stato determinato come rapporto tra la massa volumica media degli aggregati riciclati e quella del mistone naturale (materiale sostitutivo nei riempimenti). La massa volumica media per gli aggregati riciclati è di  $2.255 \text{ kg}/\text{m}^3$  (fonte ANPAR), mentre quella del mistone è  $2.000 \text{ kg}/\text{m}^3$  (fonte statistiche cave e visite tecniche); questo porta ad ottenere un valore di  $Q_2$  per l'uso in C4 pari a 0,89 (ovvero 1 kg di aggregato riciclato utilizzato in ripristini ambientali sostituisce 0,89 kg di mistone naturale).

Per la stima del fattore di mercato ci si è basati sulle dichiarazioni degli impianti di recupero C&D visitati. Gli impianti A1, B3 e B7 hanno dichiarato di riuscire sempre a vendere tutto il materiale prodotto e pertanto è stato assegnato  $M=1$ . Gli impianti B1 e B2 hanno dichiarato di avere una domanda molto variabile, ma di essere riusciti a vendere gran parte della MPS prodotta nel 2014: a questi è stato assegnato un valore di  $M=0,8$ , stimato anche sulla base delle giacenze di rifiuti dichiarate a fine 2014 (rapporto tra trattato e conferito). Tali giacenze, infatti, possono dare un'indicazione circa l'operatività dell'impianto che è a sua volta legata alla domanda locale di aggregati riciclati; quando la richiesta è ridotta, gli impianti tendono a

trattare una minore quantità di rifiuti, rispetto al quantitativo conferito, in quanto le aree di stoccaggio delle MPS risultano piene, e ciò comporta maggiori giacenze di rifiuto a fine anno; quando, invece, la richiesta è elevata, l'impianto tenderà a trattare il maggior quantitativo possibile di rifiuto e dunque le giacenze saranno minime. All'impianto A2 è stato assegnato un valore  $M=0,65$ , in quanto il gestore ha dichiarato di sottoporre a lavorazione il materiale in base alla domanda di mercato; siccome al momento della visita c'erano grandi volumi di rifiuti stoccati in attesa della lavorazione, il fattore di mercato è stato stimato facendo il rapporto tra il quantitativo di rifiuti trattati nel 2014 (56.700 tonnellate) e il rifiuto conferito nello stesso anno (88.429 tonnellate). Per l'impianto B4 è stato considerato il rapporto tra il quantitativo di MPS prodotta e venduta in un periodo di 3 anni: siccome i gestori hanno dichiarato che per un anno l'MPS prodotta è stata interamente venduta e per due anni è rimasta invenduta, il coefficiente  $M$  è stato assunto pari a  $1/3$  ( $M=0,33$ ). Per l'impianto B5, in analogia con il caso precedente, è stato assegnato ad  $M$  un valore pari a  $0,5$ , in quanto i gestori hanno dichiarato che per un anno l'MPS prodotta è stata interamente venduta, mentre l'anno successivo è rimasta invenduta. Solo l'impianto B6 ha dichiarato di non riuscire a vendere l'MPS prodotta e di essere costretto a dare via il materiale gratis per riuscire a svuotare i piazzali di stoccaggio, per cui è stato assegnato  $M=0$ . Pesando il fattore  $M$  assegnato ad ogni impianto in base alla quantità di MPS prodotta, il valore medio di  $M$  ottenuto è pari a  $0,67$ , assunto rappresentativo per l'intera regione Lombardia nello scenario attuale.

In Tabella 27 sono mostrati i coefficienti utilizzati per il calcolo del rapporto di sostituzione  $R$ : esso si differenzia in base all'utilizzo dell'aggregato riciclato in rilevati e sottofondi ( $S_1$ ) e in ripristini ambientali ( $S_2$ ). Dai risultati si può notare come il rapporto di sostituzione risulti piuttosto basso: ad esempio, per l'utilizzo delle MPS nella costruzione di rilevati e sottofondi  $S_1$  è pari a  $0,65$ , ovvero 1 kg di aggregato riciclato sostituisce  $0,65$  kg di mistone naturale. Questo è dovuto non tanto alla qualità del materiale ( $Q$  in entrambe le applicazioni è prossimo a 1), ma al fatto che il mercato è fortemente limitato in regione. Siccome il fattore di mercato  $M$  varia tra 0 (condizione peggiore in cui gli impianti sono costretti a consegnare gratuitamente il materiale prodotto) e 1 (condizione ottimale in cui gli aggregati riciclati sono interamente venduti e utilizzati), mentre  $Q$  rimane invariato, verrà condotta un'analisi di sensitività nel paragrafo 3.1.2.4 per valutare come variano gli impatti del sistema in esame al variare del mercato ( $M$ ): il minimo, per entrambi gli utilizzi ( $S_1$  e  $S_2$ ) è 0, mentre il valore massimo risulta di  $0,97$  e  $0,86$  rispettivamente per  $S_1$  e  $S_2$ .

**Tabella 27.** Calcolo del rapporto di sostituzione con il metodo che si basa su considerazioni riguardo le prestazioni e l'esistenza di un mercato per gli aggregati riciclati.

Utilizzo		Calcolo di R			Min <sup>1</sup>	Max <sup>2</sup>
		$Q = Q_1 * Q_2$	M	$Q * M$		
$S_1$	Rilevati (C1) e sottofondi (C2)	0,97	0,67	<b>0,65</b>	0	0,97
$S_2$	Ripristini ambientali (C4)	0,86	0,67	<b>0,58</b>	0	0,86

<sup>1</sup>  $M=0$ .

<sup>2</sup>  $M=1$ .

**Tabella 28.** Utilizzi degli aggregati riciclati prodotti dagli impianti di recupero dei rifiuti C&D e materia prima vergine sostituita nelle diverse destinazioni d'uso nel settore delle costruzioni.

	Rilevati (C1) e sottofondi (C2)	Utilizzi degli aggregati riciclati				MPS totale prodotta
		Fondazioni (C3)	Ripristini ambientali (C4)	Strati accessori (C5)	Calcestruzzi magri	
Impianti alimentati ad EE	57.173 t 63% <sup>1</sup>	0 0%	33.100 t 37%	0 0% <sup>1</sup>	0 0%	90.274 t 100%
Impianti alimentati a gasolio	637.923 t 60%	0 0%	429.005 t 40%	0 0% <sup>1</sup>	0 0%	1.066.927 t 100%
Materiale sostitutivo	Mistone Naturale	Aggregato naturale	Mistone naturale	Aggregato naturale	Aggregato naturale	

<sup>1</sup> La produzione di aggregati riciclati conformi all'utilizzo in strati drenanti (Allegato C5) dell'impianto fisso A1 (30.091 tonnellate) è stata assegnata interamente all'utilizzo in rilevati e sottofondi (Allegato C1/C2).

Nell'analisi di sensitività del rapporto di sostituzione è stato analizzato, inoltre, un secondo metodo per il calcolo, raccomandato dall'ILCD Handbook, che prevede di stimare il rapporto di sostituzione attraverso considerazioni sui prezzi di mercato degli aggregati riciclati e naturali:

$$R = \frac{P_{AR}}{P_{AN}}$$

dove:

- R è il rapporto di sostituzione;
- $P_{AR}$  rappresenta il prezzo medio di mercato degli aggregati riciclati;
- $P_{AN}$  rappresenta il prezzo di mercato della risorsa vergine che gli aggregati riciclati sostituiscono, ovvero in questo caso il prezzo medio di vendita del mistone naturale estratto dalle cave di sabbia e ghiaia.

Il prezzo del mistone naturale  $P_{AN}$  è stato stimato dai dati contenuti nelle Statistiche Cave ed è risultato pari a 5,26 €/t (vedi il paragrafo 2.4.2.1 dell'Allegato 2 per approfondimento). Dai sopralluoghi agli impianti e dai colloqui con le imprese di costruzioni stradali è emerso, tuttavia, che i prezzi variano molto da una zona all'altra in dipendenza di fattori specifici legati alla disponibilità di siti estrattivi sul territorio e alla domanda locale di risorse naturali. Per la stima del prezzo dell'aggregato riciclato  $P_{AR}$  ci si è basati sulle dichiarazioni dei gestori degli impianti visitati: gli impianti A1, B1, B2 e B3 hanno dichiarato di vendere in media gli aggregati riciclati a 2,5 €/t, l'impianto B5 dichiara il prezzo più basso di 0,8€/t, l'impianto B6 è costretto a regalare il materiale (0 €/t), mentre l'impianto B7 vende a circa 4,2 €/t. Il valore massimo del prezzo di vendita dell'aggregato riciclato si è registrato per l'impianto B7, situato in provincia di Lecco: in questo territorio sono presenti poche discariche e nessuna cava attiva di sabbia e ghiaia, fattori che favoriscono il riciclo dei rifiuti C&D e, di conseguenza, la crescita di un mercato per gli aggregati riciclati.

La media pesata dei prezzi rispetto al quantitativo totale di MPS prodotta in ciascun impianto restituisce il valore medio di 1,95 €/t.

In Tabella 29 sono riportati i dati per il calcolo del fattore di sostituzione con il secondo metodo: in questo caso non è presente la distinzione in base all'utilizzo, in quanto non sono state fornite informazioni così dettagliate. Anche in questo caso sarà effettuata un'analisi di sensitività, facendo variare solo il prezzo dell'aggregato riciclato tra il valore massimo (4,2 €/t) e il valore minimo (0 €/t) rilevati durante i sopralluoghi agli impianti di recupero dei rifiuti C&D, e tenendo costante il prezzo del mistone naturale.

**Tabella 29.** Calcolo del rapporto di sostituzione tramite il secondo metodo, che si basa su considerazioni inerenti i prezzi di mercato degli aggregati riciclati e naturali.

	Calcolo di R (secondo metodo)			Min <sup>1</sup>	Max <sup>2</sup>
	P <sub>AR</sub> [€/t]	P <sub>AN</sub> [€/t]	P <sub>AR</sub> /P <sub>AN</sub>		
S	1,95	5,26	0,37	0	0,8

<sup>1</sup> P<sub>AR</sub>=0 €/t

<sup>2</sup> P<sub>AR</sub>=4,2 €/t

### 2.3.2.3 *Analisi dei trasporti*

#### *Distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti*

La distanza media per il conferimento dei rifiuti agli impianti, associata sia ai flussi diretti (distanza tra produttore iniziale ed impianto) che a quelli secondari (distanza tra impianto-impianto), è stata calcolata analizzando i moduli RT e DR dei MUD degli impianti; sulla base di questi dati è stato possibile ricostruire, per ciascun codice CER, le matrici di spostamento dei rifiuti in regione, come presentato al paragrafo 1.3 (Tabella 9 e Tabella 10). Queste matrici, che contengono le percentuali di provenienza e destinazione dei flussi di rifiuti in ingresso e uscita dagli impianti, sono state moltiplicate per una matrice contenente le distanze medie provincia-provincia (espresse in km) calcolate sulla base dei percorsi stradali ([www.ladistanza.it](http://www.ladistanza.it)). Al fine di individuare un intervallo di variazione per la distanza media percorsa in regione, sono stati presi a riferimento due casi limite per la costruzione delle matrici delle distanze: il primo, massimizza le distanze percorse, in quanto considera che il trasporto all'interno della stessa provincia (es. BG-BG) avvenga su una superficie pari a quella dell'intera provincia di riferimento (valori lungo la diagonale in Tabella 30), mentre il secondo, che minimizza le distanze percorse, considera che il trasporto avvenga all'interno di una superficie pari a quella del comune capoluogo (valori lungo la diagonale in Tabella 31). Di seguito sono riportati i dati impiegati nella elaborazione: i valori sulla diagonale in Tabella 30 sono i raggi dei cerchi aventi come area quella della provincia, mentre in Tabella 31 lungo la diagonale ci sono i raggi dei cerchi aventi area pari a quella del comune capoluogo di provincia; per le distanze tra province diverse (invariate nei due casi) ci si è riferiti alla distanza tra i singoli capoluoghi di provincia ([www.ladistanza.it](http://www.ladistanza.it)). In questo modo, per ogni codice CER analizzato, è stato possibile ottenere un intervallo di variazione per la distanza di conferimento dei rifiuti, riferita sia ai flussi diretti che a quelli secondari, come mostrato in Tabella 32; pesando ogni distanza per la percentuale di ciascun codice CER, sono stati ottenuti i valori di distanza rappresentativi per l'intera miscela di rifiuti C&D gestiti in regione.

Dai risultati emerge che le distanze sono pressoché le stesse per il conferimento diretto (produttore-impianto) e secondario (impianto-impianto); pertanto, è stato assunto un valore uguale per entrambi i flussi, e pari a 35 km, nel caso di distanza massima, a 20 km nel caso di distanza minima e a 27,5 km come distanza media (valore utilizzato nello scenario base attuale).

Dai colloqui con i gestori degli impianti di recupero è emerso che il conferimento dei rifiuti (flussi diretti) avviene in parte con piccoli mezzi (3,5-7,5 tonnellate), di classi Euro3 e Euro5, e in parte con grandi mezzi (>32 tonnellate) generalmente di classe Euro5; sulla base dei dati forniti da quattro dei nove impianti visitati, è stato stimato che il 12% dei rifiuti viene conferito con piccoli mezzi, mentre l'88% con grandi mezzi.

Invece, il trasporto dei rifiuti da un impianto all'altro (flussi secondari), avviene sempre con mezzi di grandi dimensioni (>32 tonnellate) di classe Euro5.

**Tabella 30.** Distanza media percorsa provincia-provincia considerando che il trasporto avvenga all'intero della provincia di riferimento.

	BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA
BG	30	53	91	99	40	80	53	60	141	90	120	99
BS	53	39	136	54	94	83	97	104	96	116	143	144
CO	91	136	20	149	32	89	39	50	225	88	112	55
CR	99	54	149	24	147	68	117	97	66	86	228	155
LC	40	94	32	147	16	88	38	63	176	108	81	80
LO	80	83	89	68	88	16	58	38	133	32	169	96
MB	53	97	39	117	38	58	11	31	185	75	119	64
MI	60	104	50	97	63	38	31	22	185	46	136	60
MN	141	96	225	66	176	133	185	185	27	150	264	233
PV	90	116	88	86	108	32	75	46	150	31	188	95
SO	120	143	112	228	81	169	119	136	264	188	32	161
VA	99	144	55	155	80	96	64	60	233	95	161	20

**Tabella 31.** Distanza media percorsa provincia-provincia considerando che il trasporto avvenga all'interno del comune di riferimento.

	BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA
BG	4	53	91	99	40	80	53	60	141	90	120	99
BS	53	5	136	54	94	83	97	104	96	116	143	144
CO	91	136	3	149	32	89	39	50	225	88	112	55
CR	99	54	149	5	147	68	117	97	66	86	228	155
LC	40	94	32	147	4	88	38	63	176	108	81	80
LO	80	83	89	68	88	4	58	38	133	32	169	96
MB	53	97	39	117	38	58	3	31	185	75	119	64
MI	60	104	50	97	63	38	31	8	185	46	136	60
MN	141	96	225	66	176	133	185	185	5	150	264	233
PV	90	116	88	86	108	32	75	46	150	4	188	95
SO	120	143	112	228	81	169	119	136	264	188	3	161
VA	99	144	55	155	80	96	64	60	233	95	161	4

**Tabella 32.** Distanza massima e minima assunta per il conferimento dei rifiuti C&D agli impianti di trattamento della regione, per ciascun codice CER, e relativa ai flussi diretti e secondari.

Codice CER	Composizione miscela	Distanza massima di conferimento		Distanza minima di conferimento	
		[km]		[km]	
		Flussi diretti	Flussi secondari	Flussi diretti	Flussi secondari
17 01	10,9%	35,0	36,4	22,3	22,7
17 03 02	8,4%	39,8	39,1	29,0	27,4
17 08 02	0,3%	47,3	61,6	39,9	54,6
17 09 04	80,4%	34,8	33,7	19,9	18,6
<b>Totale</b>	---	<b>35,3</b>	<b>34,5</b>	<b>21,0</b>	<b>19,0</b>

### **Distanza di vendita della MPS**

A seguito dei colloqui con i gestori degli impianti di recupero, è emerso che il trasporto degli aggregati riciclati prodotti dagli impianti avviene solo con mezzi di grandi dimensioni (>32 tonnellate) Euro5 e che la distanza media di percorrenza dai riciclatori agli utilizzatori finali è di circa 15 km (valore utilizzato per lo scenario attuale), al fine di contenere i costi dovuti al trasporto del materiale. È stato fornito un range indicativo di 10 - 30 km, assunto a riferimento per l'analisi di sensitività; il trasporto non avviene per distanze maggiori di 30 km, data l'alta incidenza dei costi di trasporto e il basso valore degli aggregati riciclati, per cui non si avrebbe convenienza economica.

### **Distanza di commercializzazione del prodotto evitato: mistone e aggregati naturali**

Utilizzando i dati delle Statistiche Cave delle province che hanno fornito l'informazione riguardo i destini del mistone e degli aggregati naturali immessi nel mercato, è stato possibile stimare la distanza media percorsa per la vendita dei prodotti in regione. Di seguito sono illustrati i principali passaggi dell'elaborazione con cui è stato valutato il trasporto medio per la vendita del mistone e degli aggregati naturali; per approfondire le assunzioni fatte e i dati completi si rimanda al paragrafo 2.4.2.3 dell'Allegato 2.

- Per prima cosa, siccome l'obiettivo dell'analisi LCA si focalizza sul contesto della regione Lombardia, sono stati trascurati i casi in cui gli aggregati sono stati venduti fuori regione, in Italia o all'estero. Quindi, le percentuali estrapolate dai dati presenti nelle statistiche provinciali riguardo i destini del mistone e degli aggregati naturali sono state riproporzionate al netto di Italia e estero.
- Dopo questo primo step, è stata assegnata una distanza media ad ogni categoria di destino del materiale vergine. Precisamente, alla voce "Sito di produzione" è stato assegnato un valore pari a 0 km, poiché in questo caso, gli aggregati naturali prodotti vengono venduti ad imprese che lavorano il materiale nei pressi del sito. Alla voce "Comune di produzione" è stata assegnata una distanza pari al raggio del cerchio avente come area quella del comune capoluogo di provincia, nel caso in cui il dato è stato fornito in forma aggregata, mentre, per le province che hanno riportato i dati in forma

disaggregata, è stato possibile risalire al comune di ogni sito estrattivo e pesare i raggi di ogni comune rispetto al quantitativo commercializzato dai diversi siti estrattivi al fine di ottenere un valore medio. Per la voce "Provincia di produzione" ci si è riferiti al raggio del cerchio avente come area quella della provincia di riferimento. Infine, per il destino in Lombardia degli aggregati naturali immessi nel mercato sono stati messi a confronto due metodi: un metodo A, che ipotizza che il trasporto dell'aggregato abbia come destino le sole province confinanti con quella in cui è presente la cava in esame, e un metodo B, che invece tiene in considerazione che la commercializzazione potrebbe avvenire anche in province più lontane rispetto a quella di produzione, assegnando un peso pari a 0,75 alle province confinanti e 0,25 a quelle non confinanti per determinare il raggio medio in regione.

- Infine, per calcolare la distanza media di commercializzazione dell'aggregato naturale per ogni provincia, è stata effettuata una media delle distanze ottenute per ciascuna categoria (Sito, Comune, Provincia e Lombardia) pesata rispetto alla quantità di materiale commercializzato per ciascun destino (informazione contenuta nelle Statistiche Cave e riportata in Tabella 25 e Tabella 26). Le distanze associate a ciascuna provincia sono state a loro volta pesate rispetto al quantitativo di materiale commercializzato per stimare la distanza media di trasporto degli aggregati riciclati in regione Lombardia.

In Tabella 33 sono riportati i risultati dell'elaborazione, da cui emerge che le distanze di commercializzazione sono simili tra metodo A e metodo B (sia per la produzione di mistone naturale che di aggregati naturali); pertanto si è deciso di assumere nello scenario attuale il valore medio ottenuto attraverso il metodo A, pari a 40 km, e un range di variabilità tra 30 km e 60 km nell'analisi di sensitività. Il trasporto dei materiali vergini avviene solo con mezzi di grande dimensione (>32 tonnellate) Euro5.

**Tabella 33.** Dati di inventario per la distanza di commercializzazione del mistone naturale e degli aggregati naturali in regione Lombardia per i due metodi A e B e valori assunti nello scenario attuale.

	Mistone naturale		Aggregato naturale		Valore di distanza assunto nello scenario attuale
	A	B	A	B	
Distanza media di commercializzazione	43 km	49 km	37 km	40 km	40 km
Distanza minima di commercializzazione	27 km	30 km	30 km	36 km	30 km
Distanza massima di commercializzazione	66 km	74 km	57 km	69 km	60 km

#### 2.3.2.4 *Stoccaggio dei rifiuti*

I rifiuti conferiti agli impianti di stoccaggio vengono movimentati da macchine operative come ragni, pale o escavatori, per la formazione di cumuli e per il carico sui mezzi che effettuano il trasporto al successivo

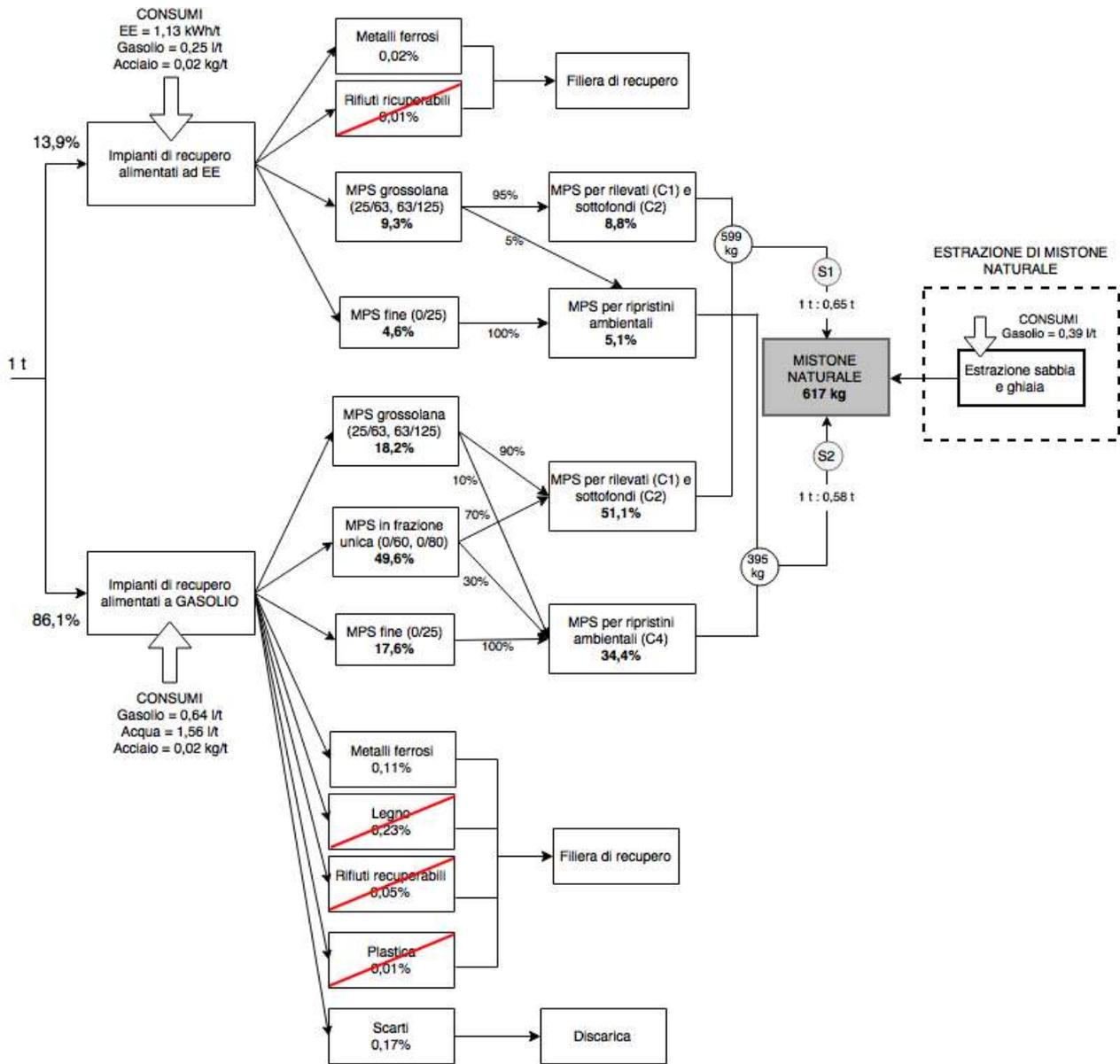
impianto di trattamento. A tali operazioni sono associati dei consumi di gasolio che devono essere presi in considerazione nell’LCA. Per ottenere dati primari da associare allo stoccaggio nell’analisi di inventario, sono state contattate telefonicamente alcune imprese che effettuano stoccaggio di rifiuti C&D; dalla ricerca è emerso che il consumo associato a questa operazione è di circa 0,11 litri di gasolio per tonnellata di rifiuto conferito.

#### **2.3.2.5 *Smaltimento in discarica***

Per la modellizzazione dello smaltimento in discarica dei rifiuti C&D inerti (e anche degli scarti della lavorazione dei C&D negli impianti mobili) è stato utilizzato un modulo di ecoinvent 3.3 già esistente, che simula lo smaltimento in discarica di un rifiuto contenente solo cemento (ipotesi che rispecchia oltretutto la situazione reale, in quanto la percentuale maggiore di rifiuti smaltiti è composta da scarti di cemento); tale processo include la produzione di percolato, contenente i composti inquinanti che derivano dalla lisciviazione a seguito del contatto del rifiuto smaltito con l’acqua piovana che si infila nell’ammasso. Il processo di default è stato in parte modificato, per poterlo adattare al contesto dello smaltimento dei C&D in Lombardia utilizzando i dati di letteratura di Blengini et al., 2012.

#### **2.3.2.6 *Sintesi dei dati di inventario per lo scenario attuale dell’LCA1***

In Figura 12 è riportato il bilancio di massa del sistema di recupero che include anche la *system expansion* del prodotto evitato per la quantificazioni dei benefici associati all’utilizzo degli aggregati riciclati nel settore delle costruzioni. Da una tonnellata di rifiuto C&D in ingresso al sistema impiantistico di recupero regionale è stato possibile risparmiare nel 2014 l’estrazione di circa 617 kg di mistone naturale, grazie a 139 kg di aggregati riciclati prodotti in impianti alimentati ad energia elettrica (che sostituiscono l’utilizzo di 87 kg di mistone) e 855 kg prodotti dagli impianti alimentati a gasolio (che sostituiscono l’utilizzo di 530 kg di mistone), di cui 599 kg destinati all’impiego della costruzione del corpo del rilevato stradale e degli strati di sottofondo e 395 kg utilizzati per ripristini ambientali.



**Figura 12.** Bilancio di massa di una tonnellata di rifiuto C&D che entra nel sistema di recupero regionale e consumi associati al trattamento; gli AR sostituiscono mistone naturale con rapporto di sostituzione diverso in base all'utilizzo.

In Tabella 34 sono riportati i processi implementati all'interno del software SimaPro 8.3 per costruire lo scenario attuale dell'analisi LCA, avente come unità funzionale una tonnellata di rifiuto inerte C&D misto gestita in regione. I processi che rientrano all'interno del sistema sono: il trasporto dei rifiuti, sia quelli diretti dai produttori agli impianti di trattamento sia quelli secondari tra impianto e impianto, lo stoccaggio, il sistema di recupero e lo smaltimento in discarica. Oltre a questi è stato necessario includere i processi inseriti nella *system expansion*, ovvero il processo inerente la produzione di mistone naturale, materiale sostituito dagli aggregati riciclati, e quello del riciclo dei metalli ferrosi separati durante la lavorazione negli impianti di recupero ed inviati alla rispettiva filiera di riciclo (Tabella 35 e Tabella 36).

**Tabella 34.** Processi del database ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per modellizzare lo scenario attuale dell'analisi LCA1 per una tonnellata di rifiuti C&D gestito in regione.

Modulo	Descrizione	Origine del processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Trasporto conferimento rifiuti all'impianto	Flussi diretti			1 t*27,5 km
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry&gt;32 ton, EURO5 (RER)</i>	88%
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 ton, EURO3 (RER)</i>	0,5*12%
		ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 ton EURO5 (RER)</i>	0,5*12%
	Flussi secondari			1 t*27,5 km*16,5% <sup>(1)</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry&gt;32 ton, EURO5 (RER)</i>	100%
Stoccaggio		<i>ad hoc</i>		1 t*11,6%
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO)/processing</i>	0,11 l/t
Recupero C&D		<i>ad hoc</i>		1 t*96,7%
	Impianti fissi	% trattata		13,9%
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO)/processing</i>	0,25 l/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) / market for</i>	1,13 kWh/t
	Consumo acciaio	ecoinvent 3.3	<i>Ferromanganese, high coal, 74,5% Mn (GLO) / market for</i>	0,02 kg/t
	Metalli Ferrosi	<i>ad hoc</i>	Recupero metalli ferrosi in Lombardia (Tabella 36)	0,02%
	Prodotto evitato	<i>ad hoc</i>	Estrazione mistone naturale (Tabella 35)	87 kg
	Trasporto AR	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry&gt;32 ton, EURO5 (RER)</i>	0,139 t*15 km
	Impianti mobili	% trattata		86,1%
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO)/processing</i>	0,64 l/t
	Consumo acqua	ecoinvent 3.3	<i>Water, unspecified natural origin, IT</i>	1,56 l/t
	Consumo acciaio	ecoinvent 3.3	<i>Ferromanganese, high coal, 74,5% Mn (GLO) / market for</i>	0,02 kg/t
	Metalli Ferrosi	<i>ad hoc</i>	Recupero metalli ferrosi in Lombardia (Tabella 36)	0,11%
	Scarti	ecoinvent 3.3 mod. <sup>(3)</sup>	<i>Inert waste (Europe without Switzerland) treatment of inert waste, sanitary landfill</i>	0,17%
	Trasporto scarti	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry&gt;32 ton, EURO5 (RER)</i>	1,4E-03 t*27,5 km <sup>(2)</sup>
	Prodotto evitato	<i>ad hoc</i>	Estrazione mistone naturale (Tabella 35)	530 kg
Trasporto AR	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry&gt;32 ton, EURO5 (RER)</i>	0,855 t*15 km	
Smaltimento in discarica		ecoinvent 3.3 mod. <sup>(3)</sup>	<i>Inert waste (Europe without Switzerland) treatment of inert waste, sanitary landfill</i>	1 t*3,3%

<sup>(1)</sup> 16,5% rappresenta il rapporto tra i flussi secondari e il quantitativo gestito.

<sup>(2)</sup> La distanza media di invio degli scarti in discarica è stata assunta pari alla distanza media dei flussi secondari (27,5 km).

<sup>(3)</sup> Processo modificato rispetto a quello di default presente nel database di ecoinvent 3.3

**Tabella 35.** Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione dell'estrazione di una tonnellata di mistone naturale commercializzato in regione.

Modulo	Descrizione	Origine del processo	Nome processo	Valore scenario base
Estrazione mistone naturale		<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo sabbia e ghiaia	ecoinvent 3.3	<i>Sand and gravel</i>	1,04 t/t <sup>(1)</sup>
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO)/processing</i>	0,39 l/t
	Trasporto mistone	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry&gt;32 ton, EURO5 (RER)</i>	1 t*40 km

<sup>(1)</sup> Il 4% del cavato è materiale di scarto che viene restituito alla cava (ipotesi di ecoinvent 3.3).

**Tabella 36.** Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione del riciclo di una tonnellata di metalli ferrosi separati negli impianti di trattamento dei rifiuti C&D, sulla base delle analisi effettuate per lo studio di Rigamonti et al., 2015.

Modulo	Descrizione	Origine del processo	Nome processo	Valore scenario base
Recupero metalli ferrosi		<i>ad hoc</i>		1t
	Selezione			100%
	Scarti	ecoinvent 3.3 mod <sup>(1)</sup>	<i>Inert waste (Europe without Switzerland) treatment of inert waste, sanitary landfill</i>	9%
	Trasporto scarti a discarica	ecoinvent 3.3	<i>Transport freight, lorry &gt; 32 ton 50% EURO3 e 50% EURO4 (RER)</i>	9E-03 t*50 km
	Trasporto met. ferrosi a riciclo	ecoinvent 3.3	<i>Transport freight, lorry &gt; 32 ton 50% EURO3 e 50% EURO4 (RER)</i>	0,91 t *50 km
	Riciclo			91%
	Prod. acciaio secondario	<i>ad hoc</i>	<i>Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER</i>	0,881 t
	Sost. acciaio primario	<i>ad hoc</i>	<i>Steel, converter, unalloyed, at plant/RER</i>	0,881 t

<sup>(1)</sup> Processo modificato rispetto a quello di default presente nel database di ecoinvent 3.3

### 2.3.3 Scenari alternativi

A partire dallo scenario base rappresentativo della situazione attuale in regione, sono stati costruiti e implementati alcuni scenari alternativi del sistema, di seguito descritti e sintetizzati in Tabella 37, anch'essi valutati applicando la metodologia LCA. Saranno poi confrontati i risultati dello scenario base con quelli degli scenari alternativi in termini di impatti ambientali, di consumo di risorse energetiche e di consumo di risorsa naturale non rinnovabile (sabbia e ghiaia) al fine di individuare le possibili azioni migliorative in grado di ridurre i carichi ambientali associati al sistema di gestione attuale.

**Analisi di diverse modalità di gestione.** Sono state valutate diverse alternative di gestione dei rifiuti C&D attraverso la definizione di due scenari alternativi, **SG1** e **SG2**. Nello scenario migliorativo **SG1** è stato rimosso lo stoccaggio come passaggio intermedio di gestione dei rifiuti C&D e quindi sono stati eliminati i flussi secondari ed i consumi associati al trasporto e alla movimentazione del rifiuto nelle piazzole di stoccaggio; il rapporto tra i flussi secondari e il quantitativo totale gestito risulta essere 3,9%, minore rispetto al 16,5% dello scenario base. Nello scenario **SG2**, invece, è stato considerato che tutto il rifiuto prodotto venga smaltito in discarica; in tale scenario, siccome non sono presenti le altre forme di gestione, il trasporto associato ai flussi secondari risulta nullo. Dal confronto con questo scenario e quello base è possibile valutare i benefici associati alle azioni di recupero del sistema di gestione attuale.

**Analisi di diverse tipologie di trattamento in impianti di recupero.** Sono stati considerati due scenari **SR1** e **SR2** in cui è stata variata la tecnologia adottata per il recupero dei C&D: nello scenario **SR1** i rifiuti inviati a trattamento (96,7% di 1 tonnellata gestita) vengono recuperati interamente in impianti alimentati ad energia elettrica, mentre nello scenario **SR2** lo stesso rifiuto è avviato esclusivamente ad impianti alimentati a gasolio. Tale confronto permetterà di capire quale delle due tecnologie consente di ottenere le migliori prestazioni ambientali ed energetiche.

**Analisi dei trasporti.** Poiché il trasporto ha una notevole incidenza sul sistema in esame (come evidenziato già da Blengini e Garbarino, 2010), è stata condotta un'analisi di sensitività facendo variare esclusivamente la distanza media di trasporto prendendo a riferimento i range individuati nell'analisi di inventario presentata nel paragrafo 2.3.2.3 per lo scenario attuale. Nello specifico, nello scenario **ST1** è stata variata la distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti assumendo  $d=20$  km in **ST1<sub>A</sub>** e  $d=35$  km in **ST1<sub>B</sub>**. Nello scenario **ST2** è stata variata la distanza media di vendita degli aggregati riciclati, assunta pari a 10 km nello scenario **ST2<sub>A</sub>** e 30 km nello scenario **ST2<sub>B</sub>**, mentre nello scenario **ST3** è stata modificata la distanza media di commercializzazione delle risorse naturali, pari a 30 km nello scenario **ST3<sub>A</sub>** e 60 km nello scenario **ST3<sub>B</sub>**. Tali confronti consentiranno di comprendere come variano gli impatti sul sistema di gestione regionale al variare della distanza di trasporto dei rifiuti, degli aggregati riciclati e del mistone naturale.

**Analisi dei rapporti di sostituzione.** Nello scenario **SR** viene fatto variare il fattore di mercato  $M$  nel calcolo dei rapporti di sostituzione  $S_1$  e  $S_2$ , simulando nello scenario **SR<sub>A</sub>** l'assenza di un mercato per gli aggregati riciclati ( $M=0$ ), in cui gli impianti sono costretti a consegnare gratuitamente il materiale prodotto, e

nello scenario **SR<sub>B</sub>** l'esistenza di un mercato solido ( $M=1$ ). È stato inoltre costruito uno scenario (**SM**) in cui viene variata la metodologia per il calcolo il rapporto di sostituzione e viene utilizzato  $S=0,37$  per entrambe le applicazioni degli aggregati riciclati, ottenuto come rapporto tra i prezzi medi di mercato degli aggregati riciclati e del mistone naturale; negli scenari **SM<sub>A</sub>** e **SM<sub>B</sub>** verrà effettuata l'analisi di sensitività del prezzo degli aggregati riciclati.

**Analisi di applicazioni alternative per gli aggregati riciclati.** Nello scenario attuale del sistema oggetto dell'analisi di LCA, gli aggregati riciclati sono utilizzati nel settore delle costruzioni solo per la costruzione del corpo del rilevato stradale (Allegato C1), per i sottofondi (Allegato C2) e nei ripristini ambientali (Allegato C4). In realtà, gli impianti di trattamento possono produrre non solo aggregati riciclati che sostituiscono il mistone naturale (situazione attuale), ma anche aggregati riciclati con prestazioni più elevate e pertanto utilizzabili in strati di fondazione (Allegato C3), strati accessori (Allegato C5) e nel confezionamento di calcestruzzi a bassa resistenza (norma UNI EN 12620:2005). Aggregati di qualità maggiore sostituiscono l'impiego di aggregati naturali (estrazione e lavorazione di sabbia e ghiaia) la cui produzione è maggiormente impattante dal punto di vista ambientale ed energetico. Per capire come possano cambiare gli impatti del sistema di gestione regionale dei rifiuti C&D nel momento in cui vengano prodotti aggregati riciclati di qualità maggiore, è stato creato uno scenario alternativo **SA** in cui si ipotizza che il 100% del quantitativo di MPS prodotta dagli impianti sia di alta qualità. Non avendo approfondito nel dettaglio le prestazioni degli aggregati riciclati nelle applicazioni più nobili (calcestruzzi, misti cementati, fondazioni non legate), il rapporto di sostituzione utilizzato nello scenario è 1:1; questa assunzione deriva dall'ipotesi che le prestazioni dei due materiali siano comparabili ( $Q=1$ ) e che il mercato di un aggregato riciclato di maggiore qualità sia più solido rispetto a quello degli aggregati prodotti attualmente ( $M=1$ ).

**Tabella 37.** Sintesi degli scenari alternativi analizzati nell’LCA1.

Scenario	Assunzioni	Valore	Valore scenario attuale
<b>SG1</b>	Eliminata operazione stoccaggio		
	Conferito	0%	11,6%
	Consumo gasolio	0 l/t	0,11 l/t
	%flussi secondari	3,9% <sup>1</sup>	16,5%
<b>SG2</b>	Solo smaltimento in discarica		
	Discarica	100%	3,3%
	Recupero	0%	96,7%
	% flussi secondari	0%	16,5%
<b>SR1</b>	Tecnologia utilizzata per il recupero: impianti alimentati ad energia elettrica		
	Conferito	96,7%	13,9%
<b>SR2</b>	Tecnologia utilizzata per il recupero: impianti alimentati a gasolio		
	Conferito	96,7%	86,1%
<b>ST1</b>	Distanza conferimento impianti		
	ST1 <sub>A</sub>	20 km	27,5 km
	ST1 <sub>B</sub>	35 km	
<b>ST2</b>	Distanza vendita AR		
	ST2 <sub>A</sub>	10 km	15 km
	ST2 <sub>B</sub>	30 km	
<b>ST3</b>	Distanza vendita AN		
	ST3 <sub>A</sub>	30 km	40 km
	ST3 <sub>B</sub>	60 km	
<b>SR</b>	Variazione fattore di mercato M		
	SR <sub>A</sub>	M=0	0,67
	SR <sub>B</sub>	M=1	
<b>SM</b>	Variazione del metodo di calcolo del rapporto di sostituzione	S=0,37	S <sub>1</sub> =0,65; S <sub>2</sub> =0,58
	SM <sub>A</sub>	S=0	
	SM <sub>B</sub>	S=0,8	-
<b>SA</b>	Variazione utilizzi aggregati riciclati		
	C3/C5/CLS (alta qualità)	100% (S=1)	0%

<sup>1.</sup> 3,9% rappresenta il rapporto tra i flussi secondari e il totale gestito quando viene eliminata l’operazione di stoccaggio (in questo scenario sono considerati solo i flussi secondari tra recupero e discarica).

## 2.4 Impostazione ed inventario dell’LCA2 (miscele bituminose)

### 2.4.1 Confini del sistema e unità funzionale

L’analisi LCA2 si focalizza sul recupero dedicato delle miscele bituminose non pericolose, ovvero senza miscelazione con gli altri rifiuti inerti C&D. Nello specifico, per questa analisi, si fa riferimento al fresato di asfalto (classificato con il CER 170302), proveniente dalla scarifica e dalla fresatura degli strati del manto stradale, definito secondo la norma UNI 13108 (Miscele bituminose – Specifiche del materiale) come conglomerato bituminoso di recupero ovvero un prodotto di elevate caratteristiche tecniche totalmente riutilizzabile nell’ambito delle stesse costruzioni stradali da cui proviene. Il fresato è infatti costituito da una miscela di inerti con una precisa curva granulometrica, caratterizzata da una notevole presenza di fini prodotti dall’effetto “taglio” del tamburo fresante sugli inerti, e contiene bitume “invecchiato” rimasto adeso agli inerti, ovvero gli stessi materiali che costituiscono i conglomerati bituminosi vergini; il bitume vecchio presente nel fresato, però, ha perso le caratteristiche di duttilità ed elasticità iniziali, che lo caratterizzavano nel momento della stesa, e pertanto necessita di idonei trattamenti e dell’aggiunta di additivi chimici per poter essere ringiovanito totalmente.

L’unità funzionale adottata per l’analisi LCA2 è rappresentata da una tonnellata di fresato di asfalto prodotta in regione e inviata a riciclo in impianti dedicati.

Come mostrato in Figura 13, il riciclo del fresato di asfalto può avvenire attraverso diverse soluzioni di trattamento, che possono essere effettuate in impianti fissi o direttamente in sito, presso il cantiere stradale, mediante appositi treni di macchine riciclatrici; per maggiori dettagli si rimanda all’Allegato 4. A seconda della temperatura alla quale vengono lavorati gli inerti e il fresato, si distinguono diverse modalità di trattamento:

- il riciclo a caldo, con utilizzo di energia termica per l’essiccazione ed il riscaldamento degli inerti a temperatura superiore a 150°C (tipicamente tra 150 e 190 °C): il fresato è impiegato in parziale sostituzione dell’inerte naturale, per la produzione di nuovi conglomerati bituminosi da destinare alla realizzazione di pavimentazioni stradali (strati di usura, binder e base della sovrastruttura stradale);
- il riciclo a freddo, per la produzione delle cosiddette eco-basi o di misti cementati ad alta duttilità (MCAD): il trattamento è realizzato a temperatura ambiente, mediante apposite attrezzature (in sito) o in impianti specifici (fissi) che consentono di miscelare in continuo il fresato con il legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato), il cemento e l’acqua. In questo caso il fresato può sostituire interamente, o quasi, l’inerte naturale; l’eventuale integrazione di inerte vergine di apporto è legata esclusivamente alla necessità di chiudere la curva granulometrica prevista da Capitolato per l’applicazione specifica.

- il riciclo a basse temperature, tiepido (110 – 130 °C) o semi-tiepido (80 – 90 °C), è una tecnica di recente concezione ed applicazione che rappresenta una via di mezzo tra le opzioni precedenti e che consente un certo risparmio energetico (fino al 35-40%) nonché minori emissioni in termini di polveri, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e sostanze idrocarburiche aromatiche (Capitão et al., 2012; Giani et al., 2015; Vidal et al., 2013) rispetto al processo tradizionale ad alta temperatura; inoltre, trattando i materiali a temperature minori, è possibile preservare le caratteristiche del bitume più a lungo. Applicazioni di questo tipo si stanno attualmente diffondendo in Danimarca, Norvegia, Francia, Repubblica Ceca, Svezia e USA (sito *European Asphalt Pavement Association*, EAPA – dati 2012). EAPA stima una riduzione del 50% dei fumi prodotti ogni 12°C di abbassamento della temperatura di esercizio, motivo che sta spingendo l'industria dell'asfalto ad adottare tecnologie che lavorano a temperature più basse. Tuttavia, al momento la produzione di conglomerati tiepidi o semi-tiepidi è poco diffusa in Italia sia per ragioni di carattere economico sia per le incertezze sulle prestazioni a lungo termine degli asfalti tiepidi (Capitão et al., 2012; Noferini, 2016). Infatti, le più basse temperature di processo riducono la lavorabilità dei prodotti finiti rendendo più difficile la loro stesa nei cantieri; per aumentare la viscosità di questi prodotti e migliorarne la lavorabilità è necessario aggiungere additivi chimici (tensioattivi), che hanno costi elevati e rendono di fatto questa soluzione poco appetibile dal punto di vista economico. In alternativa è possibile anche aggiungere nel mescolatore acqua insieme ad argille o zeoliti, materiali che riescono a trattenere l'umidità nell'impasto e ad aumentarne quindi la fluidità; negli impianti che hanno la possibilità di inserire il fresato nel mescolatore, è possibile sfruttare l'umidità del fresato e dosare di conseguenza le argille e l'acqua per ottenere il grado di umidità ottimale. Questa tecnica è però meno utilizzata rispetto all'aggiunta di tensioattivi, in quanto l'umidità del conglomerato dipende da molti fattori, che sono più difficili da controllare e mantenere costanti nel tempo.

I limiti di utilizzo del fresato nelle miscele, come verrà evidenziato nei prossimi paragrafi, sono dettati dalle dotazioni dell'impianto (anello di riciclaggio<sup>1</sup>, linea dedicata, doppio tamburo) e dalle modalità di lavorazione (pre-trattamento e vagliatura del fresato, riciclo a caldo, a freddo o a bassa temperatura); in linea generale, con il trattamento a caldo è possibile impiegare tra il 10% fino ad un massimo del 40-50% di fresato recuperato mentre le tecnologie a freddo consentono un reimpiego del fresato anche fino al 100%.

In Italia, le due tecnologie di recupero più diffuse sono il riciclo a caldo in impianto fisso e il riciclo a freddo in sito oppure presso impianto specifico (Noferini, 2016); l'analisi LCA2 si focalizza sul riciclo a caldo e a freddo presso impianti fissi mentre è escluso il riciclo in sito in quanto, in questo caso, si ipotizza che il fresato venga reimpiegato in sito e quindi non si verificano le condizioni di produzione del rifiuto.

---

<sup>1</sup> Termine tecnico utilizzato per indicare il sistema di inserimento del fresato nel forno essiccatore dell'impianto di produzione di conglomerati bituminosi a caldo (HMA).



**Figura 13.** Classificazione delle diverse soluzioni tecnologiche per il riciclo del fresato proveniente dalle pavimentazioni ammalorate; sono mostrate barrate in rosso le modalità escluse dal presente studio di LCA.

I processi inclusi nel sistema sono:

- il trasporto del fresato dal cantiere agli impianti di riciclo;
- il processo di riciclo del fresato, in impianti a caldo e a freddo, per la produzione di conglomerati bituminosi e di eco-basi (o MCAD); è incluso anche il pre-trattamento del fresato prima del suo inserimento all'interno del ciclo produttivo;
- l'evitata produzione di aggregati naturali;
- l'evitata produzione di bitume vergine (impiegato nel processo a caldo) e cemento (per il MCAD);
- il processo di produzione e il trasporto agli impianti degli additivi chimici rigeneranti (ACF) impiegati nel riciclo a caldo e dell'emulsione bituminosa e del cemento impiegati nel riciclo a freddo;
- l'evitato trasporto di aggregati naturali, bitume vergine e cemento.

Si specifica che è stato escluso dai confini del sistema il trasporto per la commercializzazione dei prodotti finiti dall'impianto di produzione al cantiere (conglomerati bituminosi a caldo, eco-basi e misti cementati ad alta duttilità) e quello dei materiali evitati; in questo caso, infatti, la distanza di trasporto risulterebbe esattamente la stessa per il prodotto "riciclato" e quello "evitato" in quanto si tratta del medesimo impianto che può confezionare miscele di soli inerti vergini oppure miscele contenenti diverse percentuali di fresato. Questa condizione è totalmente differente rispetto all'LCA1 e all'LCA3 dove il prodotto riciclato (i.e. aggregati misti e gesso riciclato) va a sostituire una risorsa naturale (sabbia/ghiaia e gesso naturale) estratta da cava, con provenienza quindi da un sito diverso rispetto all'impianto di riciclo.

Per poter conoscere quali sono i processi e le tecnologie di riciclo del fresato attualmente implementate in regione Lombardia, le effettive percentuali di reimpiego di fresato nelle diverse miscele e la tipologia/utilizzo dei prodotti ottenuti dal processo e al fine di raccogliere dati primari da utilizzare nella successiva analisi di LCA, sono state effettuate indagini dirette ad alcuni impianti di produzione che utilizzano fresato in regione (paragrafo 2.2 dell'Allegato 2).

Per quanto riguarda l'evitata produzione e trasporto di aggregati naturali sono stati utilizzati i dati ricavati dalle statistiche cave, come già mostrato nel paragrafo 2.3.2.2. mentre per stimare i trasporti associati al conferimento dei rifiuti sono stati utilizzati i dati MUD 2014. Per i processi legati alla produzione di bitume vergine, cemento, emulsione bituminosa e additivi ACF sono stati invece utilizzati i processi di default del databaseecoinvent 3.3 mentre per il trasporto si è fatto riferimento alle sedi dei principali fornitori agli impianti di tali materiali (raffinerie, cementifici, Iterchimica).

Riguardo la quantificazione del flusso di fresato avviato alle diverse modalità di riciclo, dall'elenco MUD degli impianti che hanno dichiarato il recupero (R5) di tali rifiuti, sono stati estratti quegli impianti che hanno ricevuto e trattato esclusivamente il CER 17 03 02. In totale, sono risultati 24 impianti che nel 2014 hanno effettuato un trattamento di riciclo del solo fresato, per un flusso complessivo pari a 382.488 tonnellate, quantitativo assunto di riferimento per l'analisi LCA2. Si specifica che tale flusso potrebbe essere sottostimato rispetto alla situazione reale in quanto, a meno di contattare direttamente tutti gli impianti della regione, non è possibile determinare con certezza il numero di impianti di riciclo del fresato solo sulla base delle informazioni contenute nel database MUD; può infatti accadere che una stessa impresa risulti titolare di più impianti e dichiarare quindi il recupero di diversi codici CER, effettuando però un riciclo dedicato del fresato che viene gestito in impianto separato facente parte della stessa società (come nel caso dell'impianto di LO, paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2).

Dei 24 impianti individuati, sono stati contattati i maggiori 7 che, complessivamente, coprono il 60% del fresato inviato a recupero specifico (dati MUD); dall'indagine telefonica è emerso che alcune imprese gestiscono più impianti e pertanto è stato possibile raccogliere i dati relativi a 16 impianti totali, che risultano localizzati nelle province di BS (5), LO (3), MB (3), MI (3) e BG (2). In Tabella 38 è mostrata una sintesi delle principali caratteristiche degli impianti in esame, in termini di tecnologie adottate, tipologia di prodotti finiti e ubicazione degli impianti, ottenuta a seguito dell'indagine.

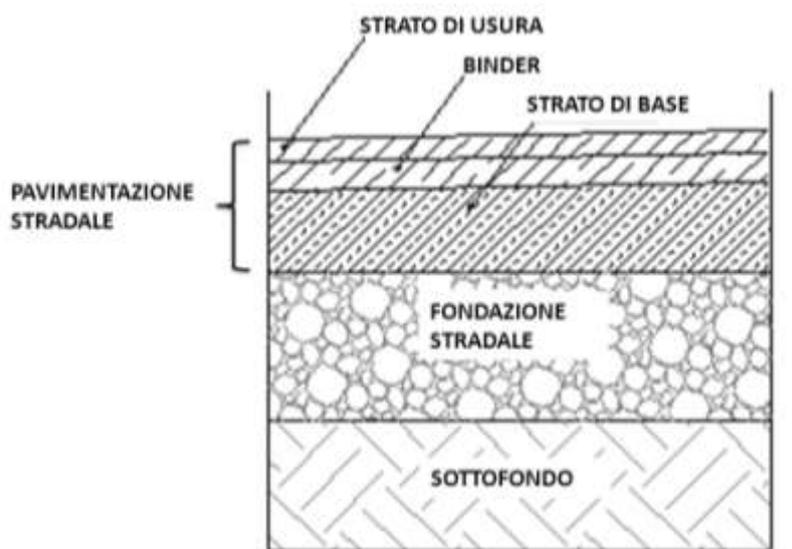
I risultati dell'indagine hanno permesso di valutare le tecnologie di recupero attualmente implementate in regione e di quantificare il fresato riciclato secondo ciascuna modalità: infatti, dei 16 impianti in esame (Tabella 38), 12 effettuano il riciclo a caldo in impianti per la produzione di nuovi conglomerati bituminosi (base, binder e usura) mentre 4 eseguono il riciclo a freddo in impianti *ad hoc* per la produzione delle eco-basi (3 impianti) e dei misti cementati ad alta duttilità (1 impianto).

**Tabella 38.** Ubicazione, tecnologia implementata e tipologia di prodotti confezionati negli impianti in esame (CB = conglomerato bituminoso); nell'ultima colonna è indicata la tipologia di pre-trattamento effettuato sul fresato in ingresso.

	<b>Impianto</b>	<b>Provincia</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Prodotti finali</b>	<b>Pretrattamento fresato</b>
1	Impianto 1A	LO	CB a caldo	Basi - Binder	< 20 mm
2	Impianto 1B	LO	CB a caldo	Basi - Binder	< 20 mm
3	Impianto 1C	LO	CB a freddo	Misti cementati alta duttilità	< 20 mm
4	Impianto 2A	BG	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 e 10/20
5	Impianto 2B	BG	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 e 10/20
6	Impianto 3A	BS	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 e 10/20
7	Impianto 3B	BS	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 e 10/20
8	Impianto 3C	BS	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 e 10/20
9	Impianto 4	MB	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	< 20 mm
10	Impianto 5	BS	CB a caldo	Basi - Binder	< 20 mm
11	Impianto 6A	MI	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	< 20 mm
12	Impianto 6B	MI	CB a freddo	Eco - basi	< 20 mm
13	Impianto 7A	MB	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 - 0/15 e 0/20
14	Impianto 7B	MB	CB a freddo	Eco - basi	classi: 0/10 - 0/15 e 0/20
15	Impianto 8	BS	CB a freddo	Eco - basi	< 20 mm
16	Impianto 9	MI	CB a caldo	Basi - Binder - Usura	classi: 0/10 e 10/20

Pertanto, i dati primari relativi al trattamento di riciclo del fresato sono stati ricavati combinando le informazioni raccolte attraverso l'indagine telefonica con i dati acquisiti durante i sopralluoghi svolti presso due impianti di produzione di conglomerati bituminosi a caldo ed un impianto a freddo (paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2).

Si specifica che con il riciclo a caldo del fresato possono essere prodotti nuovi conglomerati bituminosi per la realizzazione dei tre strati della pavimentazione stradale (Figura 14) mentre con il riciclo a freddo generalmente il prodotto che si ottiene viene impiegato solo per la costruzione dello strato di base a contatto con la fondazione stradale.



**Figura 14.** Sezione tipo di una pavimentazione stradale composta dall'alto verso il basso da: strato di usura, binder e strato di base.

## 2.4.2 Inventario dello scenario attuale

### 2.4.2.1 *Pre-trattamento del fresato*

Dalle visite tecniche effettuate, così come riscontrato anche attraverso l'indagine telefonica (Tabella 38), emerge chiaramente che un aspetto chiave nel riciclo del fresato è il suo preventivo trattamento e la sua classificazione dimensionale prima dell'inserimento nel ciclo produttivo, al fine di garantire un maggior controllo del fuso granulometrico della miscela in alimentazione all'impianto, una scelta più idonea dei dosaggi richiesti per gli altri materiali (bitume, filler e additivi chimici) e quindi assicurare una adeguata qualità dei prodotti finiti. Questa fase di analisi e pre-trattamento del fresato diviene imprescindibile qualora siano previste elevate percentuali di reimpiego di fresato nella miscela (30-50%) al fine di garantire caratteristiche omogenee dei conglomerati bituminosi prodotti e conformi ai limiti prestazionali previsti dal Capitolato per l'uso specifico (base, binder o collegamento e usura).

Pertanto, la tipologia di trattamenti effettuati sul fresato prima della sua alimentazione all'impianto di riciclo vero e proprio variano in base al quantitativo di fresato utilizzato nella miscela e alla tipologia di conglomerato che si intende produrre; ad esempio, negli impianti che impiegano fresato esclusivamente per la produzione di conglomerati bituminosi (CB) destinati a strati di base e binder, essendo i requisiti richiesti per la curva granulometrica della miscela meno restrittivi rispetto allo strato di usura, generalmente viene effettuato sul fresato un semplice trattamento di vagliatura, con reti da 20 mm, ed una riduzione volumetrica del sovrallò mediante frantoio a martelli (trattamento effettuato da 7 impianti su 16). Quando invece il fresato è impiegato anche nelle miscele per strati di usura (percentuali tipiche da Capitolato 10-15%), per le

quali sono richieste specifiche classi dimensionali degli inerti (dimensione massima 8-10 mm), oppure quando il fresato è usato in quantitativi elevati nei conglomerati per base/binder (30-40%), generalmente si effettua una gestione e un trattamento del fresato in ingresso più accurato: il fresato viene stoccato in aree dedicate dell'impianto e viene effettuata una pre-qualifica dei cumuli mediante test di laboratorio; il materiale viene quindi alimentato all'impianto di pretrattamento che consiste in una eventuale deferrizzazione iniziale, con nastri magnetici, per eliminare la presenza di residui metallici (es. tombini, parti di tubazioni, etc.) seguita da una fase di macinazione, che può avvenire con un singolo frantoio a martelli o mediante una doppia unità di frantumazione comprendente rullo fresa e rulli controrotanti (paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2); il frantumato può essere ulteriormente sottoposto a deferrizzazione prima della vagliatura finale. Generalmente, negli impianti contattati che eseguono la classificazione preventiva del fresato, vengono separate due classi dimensionali: la frazione fine, 0-8/10 mm, che viene impiegata nella produzione di conglomerati bituminosi per strati di usura, e la frazione grossolana 10-20/22 mm utilizzata prevalentemente negli strati di base e/o binder. Negli impianti più innovativi, come nel caso dell'impianto 7A/7B in provincia di MB, vengono selezionate tre granulometrie: 0/10 mm per la produzione di CB da usura, 0/15 mm per quelli di binder e la 0/20 mm per i CB di base. Inoltre, dai cumuli di scarico delle frazioni selezionate vengono di solito prelevati dei campioni da sottoporre ad analisi fisiche e chimiche per individuarne la specifica curva granulometrica ed il tenore residuo di bitume invecchiato rimasto adeso agli inerti. Infatti, le caratteristiche del fresato possono variare notevolmente sia in termini di granulometria che di bitume residuo a seconda della provenienza del materiale e della tipologia / tempo di vita della strada da cui è stato rimosso (strada veloce, urbana, extraurbana, a traffico alto, medio, basso; tempo di esposizione e condizioni atmosferiche). Le risultanze delle analisi di laboratorio permettono di definire il corretto mix design, ovvero le quantità di sabbia, pietrisco naturale e filler da dosare per ottenere il fuso granulometrico prestabilito per il prodotto finale e il quantitativo di bitume vergine e additivi rigeneranti da aggiungere, per ottenere alla fine una miscela di adeguata plasticità, viscosità e lavorabilità. Le "ricette" definite per ciascuna tipologia di CB che si intende produrre vengono poi testate attraverso "campi prove" eseguiti sia durante la produzione che la fase di posa in opera dei conglomerati bituminosi, per attestarne la conformità con i requisiti tecnico-prestazionali previsti in fase progettuale.

I risultati dell'indagine diretta, mostrati in Tabella 39 e relativi ai 16 impianti in esame, mostrano che il pretrattamento del fresato avviene prevalentemente attraverso impianti/macchinari alimentati ad energia elettrica (15 su 16) e solo in minima parte con motori a gasolio (1 su 16). Per i dati relativi al consumo di elettricità, assunto pari a 0,83 kWh/t nello scenario attuale dell'LCA2, si è preso a riferimento l'impianto visitato in provincia di BG (vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2) utilizzando la scheda tecnica del sistema di triturazione/vagliatura del fresato in esso presente (granulatore Wirtgen modello SBRG 2000); nel caso in cui il trattamento del fresato fosse molto articolato, come accade nell'impianto di riciclo a freddo in provincia di BS (impianto 8 in Tabella 38), i consumi risulterebbero maggiori e pari a 1,79 kWh/t (vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2); si è scelto di non utilizzare tale valore in quanto, per questo specifico caso,

l'impianto di pre-trattamento riceve, oltre al fresato, le scorie nere di acciaieria sulle quali si effettua un trattamento piuttosto spinto al fine di ottenere cinque diverse pezzature da vendere come aggregato riciclato sciolto o da impiegare nell'adiacente impianto di betonaggio.

Per il consumo di gasolio, invece, è stato assunto il valore fornito dal gestore dell'unico impianto che implementa tale sistema; il valore medio annuo risulta pari a 0,25 l/t.

Si sottolinea che i consumi specifici di energia elettrica e gasolio associati al pretrattamento del fresato, riportati in Tabella 39, sono stati assunti gli stessi per il riciclo a caldo e a freddo dello scenario attuale LCA2.

I consumi di elettricità e gasolio sono stati pesati sulla base del numero di impianti che implementano le due diverse tecnologie (15/16 per impianti alimentati a energia elettrica e 1/16 per impianti a gasolio) per ottenere i consumi specifici indotti dal pre-trattamento del fresato; complessivamente, quindi, per una tonnellata di fresato sottoposta al pre-trattamento si consumano 0,78 kWh/t di elettricità e 0,02 l/t di gasolio per ottenere in uscita 1 tonnellata di fresato vagliato che viene poi alimentata al successivo impianto di riciclo a caldo o a freddo (vedi Figura 19).

**Tabella 39.** Consumi energetici medi di elettricità e gasolio per il trattamento di 1 tonnellata di fresato ricavati dal campione di impianti in esame.

<b>Numero impianti in esame</b>	<b>16</b>	<b>Consumi energetici medi</b>		
Pre-trattamento a energia elettrica	15	Consumo elettricità	0,83	kWh/t
Ptre-trattamento a gasolio	1	Consumo gasolio	0,25	l/t

#### **2.4.2.2 Riciclo a caldo del fresato (SR1)**

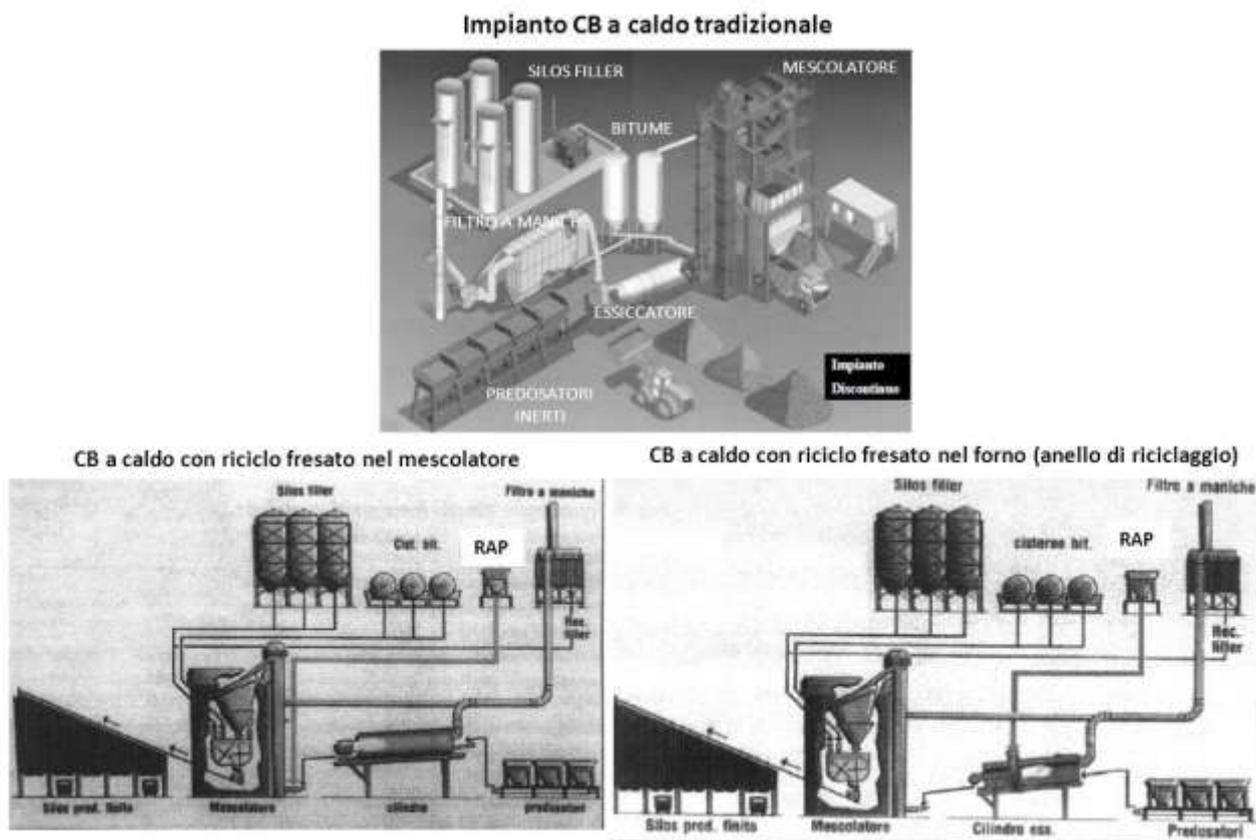
L'analisi precedentemente mostrata evidenzia che il riciclo a caldo in impianto risulta attualmente la soluzione più diffusa in regione; infatti, sulla base del campione di 16 impianti analizzati, emerge che il 75% del fresato viene utilizzato nella produzione di CB a caldo. Tale risultato è del tutto in linea con quanto presentato in alcuni studi (Ravaioli, 2016, EAPA 2011), in cui il riciclo a caldo in impianti discontinui appare, ad oggi, la tecnologia prevalente in Italia ed Europa (es. Francia, Spagna, Germania, Regno Unito) in quanto consente di ottenere prodotti finali di elevata qualità tecnica, con caratteristiche piuttosto omogenee, oltre a garantire una maggiore flessibilità nella produzione delle diverse miscele e un controllo costante del processo; per contro, i costi per l'acquisto e l'esercizio dell'impianto sono più elevati a causa della presenza della torre di mescolazione, degli elevatori a caldo di inerti e filler e del vaglio vibrante di selezione.

L'impianto di CB a caldo è un impianto discontinuo che lavora per cicli di produzione: nel processo tradizionale, gli inerti vergini vengono prelevati dai cumuli di stoccaggio dell'impianto e caricati separatamente, mediante pala meccanica, nelle apposite tramogge, indicate in gergo come pre-dosatori, ciascuna contenente una specifica pezzatura (sabbia, pietrisco, fresato, filler). All'inizio di ogni ciclo di

produzione, i diversi materiali inerti vengono dosati mediante regolazione automatica della velocità di apertura delle bocche delle tramogge e trasferiti, mediante il nastro trasportatore sottostante, all'interno del forno essiccatore dove vengono progressivamente asciugati e riscaldati per trasferimento del calore prodotto dalla fiamma; tipicamente, gli inerti avanzano lungo l'asse longitudinale in equi-corrente rispetto ai gas caldi (oppure in controcorrente) e vengono scaricati dopo un tempo di permanenza di qualche minuto (variabile dai 3 ai 7 minuti a seconda delle condizioni di umidità iniziali degli aggregati, della loro granulometria e della temperatura di uscita desiderata). Il forno consiste in un cilindro rotante leggermente inclinato verso lo scarico degli inerti, dotato di un bruciatore modulante (per la regolazione del calore nel forno), generalmente alimentato a gas naturale o BTX, e da un sistema di aspirazione che mantiene in depressione l'essiccatore e convoglia i gas di combustione al sistema di filtri a maniche prima dello scarico in atmosfera. Gli aggregati caldi ed essiccati (circa 160°C, 0,5% di umidità residua) raggiungono la sommità della torre di mescolazione per mezzo di un elevatore a tazze posto all'uscita dell'essiccatore e subiscono una ulteriore selezione per mezzo di vaglio vibrante prima dell'alimentazione al mescolatore al fine di garantire il fuso adeguato. All'interno del mescolatore vengono dosati il filler e il bitume caldo; qui è presente un doppio albero a palette controrotanti che agita e miscela tra loro i diversi materiali per un tempo variabile tra i 20 e i 50 secondi a seconda delle dimensioni, della potenzialità della macchina e delle esigenze produttive. Il conglomerato bituminoso così ottenuto viene scaricato dalla base del mescolatore e inviato al silos di deposito; con la chiusura dell'apertura di scarico del mescolatore ha inizio un nuovo ciclo produttivo.

Per effettuare il riciclo a caldo del fresato, l'impianto di CB deve essere opportunamente modificato per consentire l'inserimento del fresato nella miscela, come mostrato in Figura 15: il vincolo tecnologico principale è associato alla fase di riscaldamento degli inerti all'interno del forno essiccatore, dove bisogna evitare il contatto diretto del fresato con la fiamma per non "stressare" il bitume vecchio del fresato e, allo stesso tempo, per evitare che da questo si liberino sostanze dannose (IPA, COV e polveri) con conseguenti problematiche al sistema di filtrazione dei fumi.

La soluzione tecnologica più comunemente implementata per risolvere tale problematica è l'utilizzo del cosiddetto "anello di riciclaggio" che permette di inserire il fresato direttamente nel forno essiccatore, a circa un mezzo o tre quarti della sua lunghezza, in una camera di combustione secondaria separata rispetto a quella principale dove scorrono gli inerti vergini e all'interno della quale è presente la fiamma (Figura 15 in basso a destra).



**Figura 15.** Lay-out di un impianto di CB tradizionale (in alto) e confronto con impianti di CB che utilizzano il fresato (RAP: Recycled Asphalt Pavement) nella produzione di conglomerati bituminosi a caldo, per le due diverse configurazioni impiantistiche: immissione del fresato direttamente nel mescolatore (in basso a sinistra) oppure nel cilindro essiccatore tramite anello di riciclaggio (in basso a destra).

Negli impianti più innovativi, invece, solo gli inerti vergini da cava vengono riscaldati all'interno del forno essiccatore ed il fresato viene inserito direttamente nella torre di mescolazione (o mescolatore), come mostrato in Figura 15 in basso a sinistra. Questa soluzione impiantistica offre diversi vantaggi: l'utilizzo di percentuali di reimpiego di fresato nella miscela più elevate (fino al 40-50%), con minor rischio di incorrere nelle problematiche tecniche legate al riscaldamento del bitume vecchio contenuto nel fresato garantendo, al tempo stesso, un'elevata qualità dei conglomerati bituminosi prodotti; la riduzione delle emissioni, soprattutto di composti organici volatili e polveri che possono indurre il rapido intasamento dei filtri a maniche; una manutenzione meno ricorrente delle tubazioni e dei dispositivi di alimentazione e dosaggio del fresato che, essendo gestito a freddo, non determina i problemi di intasamento che sono invece frequenti quando il fresato viene rapidamente riscaldato nel forno. Per contro, poiché il fresato viene miscelato a freddo e si riscalda all'interno del mescolatore per effetto del contatto diretto con gli inerti caldi, è necessario scaldare di più gli aggregati vergini portandoli ad una temperatura leggermente superiore a quella di uscita dal forno essiccatore; tipicamente, negli impianti innovativi che implementano tale soluzione, gli inerti vergini vengono riscaldati a temperature di 170°C contro i 150-160°C generalmente raggiunti nei forni con

anello di riciclaggio. Tuttavia, il dosaggio a freddo del fresato nel mescolatore deve essere effettuato in modo accurato per evitare che, in corrispondenza della sommità della torre dove avviene l'alimentazione dei materiali, si verifichi un repentino sviluppo di vapore, a seguito del contatto del fresato freddo con gli inerti caldi, con conseguenti problemi al sistema di filtrazione. Nell'impianto visitato di BG (paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2), per ovviare tali criticità, si effettua un dosaggio graduale del fresato nella torre di miscelazione (tempo di inserimento di circa 10 secondi) in modo che il rilascio di vapore non sia repentino, agendo in contemporanea con un'adeguata regolazione del sistema di aspirazione, che deve lavorare in misura direttamente proporzionale al quantitativo di fresato che viene dosato.

Come si evince dalla Tabella 40, la tecnologia attualmente più diffusa in regione Lombardia per il riciclo a caldo del fresato è rappresentata da impianti di CB con immissione del fresato nel cilindro essiccatore tramite anello di riciclaggio (10 impianti su 12) mentre sono poco implementate le soluzioni impiantistiche che consentono l'inserimento del fresato all'interno del mescolatore (2 impianti su 12).

**Tabella 40.** Percentuali di impiego del fresato nelle diverse miscele di conglomerati bituminosi a caldo confezionati negli impianti esaminati e valori medi per ciascun impianto; nell'ultima colonna viene indicata la tecnologia utilizzata per l'inserimento del fresato (direttamente nel forno essiccatore, mediante anello di riciclaggio, oppure all'interno del mescolatore).

Impianto	Provincia	% di impiego del fresato nelle miscele di CB a caldo				Tecnologia implementata
		Base	Binder	Usura	Media	
Impianto 1A	LO	15%	15%	0%	10%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 1B	LO	15%	15%	0%	10%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 2A	BG	35%	20%	12,5%	23%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 2B	BG	35%	20%	12,5%	23%	Immissione nel mescolatore
Impianto 3A	BS	25%	20%	10%	18%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 3B	BS	25%	20%	10%	18%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 3C	BS	40%	35%	10%	28%	Immissione nel mescolatore
Impianto 4	MB	30%	-	15%	23%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 5	BS	35%	28%	0%	21%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 6A	MI	32,5%	32,5%	12,5%	26%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 7A	MB	30%	30%	20%	27%	Anello di riciclaggio forno
Impianto 9	MI	20%	15%	10%	15%	Anello di riciclaggio forno

### **Tipologia, dosaggi e provenienza dei materiali impiegati**

Nell'impianto di CB a caldo con impiego di fresato nella miscela, in genere, vengono prodotte diverse tipologie di conglomerati bituminosi, con composizioni specifiche in termini di materiali impiegati, a seconda che siano destinati a tappeti di usura, strati di collegamento o strati di base delle pavimentazioni stradali. I principali elementi che compongono le miscele sono:

- 1 gli inerti vergini da cava (sabbie e pietrischi), prevalentemente inerti frantumati e in piccola parte inerti tondi (<20%), in quanto il materiale spaccato garantisce migliori prestazioni per le prove Marshall e a trazione ed è generalmente quello richiesto da Capitolato. Di solito gli inerti naturali provengono prevalentemente da cave presenti nella stessa provincia o in province limitrofe e solo in parte da cave fuori regione (es. Piacenza, Alessandria) per gli approvvigionamenti di inerti con ottime caratteristiche meccaniche da impiegare nella produzione di particolari miscele come i tappeti di usura drenanti dotati di prestazioni superiori (esclusi dall'analisi LCA2).
- 2 il bitume vergine, prodotto dalla raffinazione del petrolio, viene trasportato con autobotti riscaldate e proviene dalle raffinerie di Genova, Livorno, Pavia e Ravenna; nell'impianto di CB il bitume viene stoccato in serbatoi riscaldati mediante serpentine oleotermiche alimentate da olio diatermico, che viene inviato anche alle tubazioni incamiciate di adduzione del bitume, per garantire che lo stoccaggio e il dosaggio del bitume avvengano a temperature adeguate (160-180 °C). Vengono utilizzate due tipologie di bitumi vergini, con diversi valori di indice di penetrazione: il bitume 50 – 70 impiegato in estate e il bitume 70 -100 in inverno (più morbido, per consentire una facile lavorazione a temperature più basse).
- 3 il fresato proviene da cantieri stradali in un raggio che dipende dalla convenienza economica, a seconda delle distanze per il trasporto all'impianto: alcuni gestori hanno indicato un raggio massimo di 30 km per la provenienza del fresato; tuttavia, si è preferito calcolare la distanza di trasporto del fresato dal cantiere all'impianto ricevente sulla base dei moduli MUD, come verrà mostrato al paragrafo 2.4.2.5.
- 4 il filler (dimensione < 0,075 mm), naturale da apporto o riciclato (ad esempio le polveri recuperate dal sistema di trattamento con filtri a maniche presente nell'impianto, come nel caso dell'impianto di LO e di di BG – vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2), utilizzato per colmare i vuoti intergranulari e raggiungere un'adeguata percentuale di vuoti residui (per conglomerati bituminosi *chiusi* la percentuale di vuoti residui deve essere inferiore al 6% mentre per quelli *aperti o drenanti* deve essere compresa tra 10-22%).
- 5 gli attivanti/rigeneranti chimici funzionali (ACF) che vengono aggiunti in caso di impiego di fresato nella miscela per modificare la struttura chimico-fisica del bitume invecchiato, al fine di garantire le caratteristiche tecniche ottimali nei conglomerati prodotti. L'aggiunta di ACF è necessaria in quanto il bitume presente nel fresato, essendo ossidato, ha perso le caratteristiche di plasticità e viscosità rispetto al bitume vergine risultando più rigido e meno lavorabile; sulla base di quanto dichiarato dagli impianti esaminati e delle prescrizioni previste da alcuni Capitolati Speciali di Appalto di imprese stradali che sono stati visionati, emerge un dosaggio medio di ACF intorno allo 0,15-0,3% rispetto al fresato immesso nella miscela. Gli ACF sono forniti principalmente da Iterchimica con sede a Bergamo. Si precisa che nel caso in cui vengano prodotti CB speciali, non considerati però in questa analisi LCA, si possono utilizzare altri tipi di additivi come i polimeri termoplastici che vengono inseriti all'interno del

mescolatore dove, per effetto delle elevate temperature, si sciolgono e si mescolano al prodotto conferendogli le caratteristiche equivalenti ad un bitume modificato.

A seconda delle caratteristiche e del destino dei CB prodotti (CB chiusi o drenanti per strati di usura o binder o base), vengono utilizzati diversi dosaggi dei materiali vergini e del fresato secondo “ricette” specifiche adottate nell’impianto e individuate mediante prove di laboratorio. In Tabella 40 vengono riportate a confronto le miscele tipiche utilizzate rispettivamente per la produzione di CB per strati di usura, di collegamento e base, fornite dal campione di impianti analizzato. Si nota che l’impiego di fresato spesso non è previsto per i CB destinati a usura, per i quali alcuni Capitolati Speciali di Appalto di imprese stradali prescrivono di utilizzare esclusivamente inerti naturali e bitume vergine. Il fresato viene aggiunto in percentuali variabili tra il 15% e il 40% (rispetto al peso degli inerti) per la produzione di conglomerati destinati a base; i dosaggi appaiono leggermente inferiori per il confezionamento di conglomerati destinati a strati di binder. Il valore medio di impiego di fresato che emerge dall’analisi è pari al 20% in peso sul totale della miscela di inerti (Tabella 41), valore assunto di riferimento per l’analisi LCA2 dello scenario attuale per il riciclo a caldo. A titolo di confronto, in Tabella 42 si riportano i dosaggi, in termini di percentuali di fresato, bitume vergine e ACF, richiesti dal Capitolato Speciale di Appalto di ANAS per i diversi tipi di CB a caldo.

I principali vantaggi derivanti dall’utilizzo del fresato nelle miscele di CB a caldo sono rappresentati dal risparmio di materie prime naturali (inerti da cava) e dalla riduzione del quantitativo di bitume vergine da aggiungere alla miscela, che è strettamente proporzionale alla percentuale di reimpiego di fresato. Durante l’indagine è stata quindi richiesta agli impianti un’indicazione circa il risparmio percentuale di bitume vergine ottenuto grazie all’impiego del fresato; i valori medi per ciascun impianto sono indicati in Tabella 41 e si riferiscono al 10% di impiego di fresato nella miscela di inerti.

Sulla base dei dati forniti dal campione di impianti in esame, emerge un risparmio medio di bitume pari allo 0,35% ogni 10% di fresato aggiunto alla miscela mentre il dosaggio medio di ACF risulta di 0,2% rispetto al contenuto percentuale di fresato; questi valori sono stati assunti per lo scenario attuale di base dell’LCA2. Ciò implica, a titolo di esempio, che se viene confezionato un CB per strati di base con il 20% di fresato, il dosaggio richiesto di bitume vergine sarà pari al 4,3%, invece del 5% che servirebbe per una base tradizionale costituita da soli inerti vergini, mentre gli ACF aggiunti saranno pari allo 0,04% della miscela finale.

In Figura 17 è riportato lo schema riassuntivo per il riciclo a caldo di 1 tonnellata di fresato, in termini di consumi indotti dal pre-trattamento, di dosaggi dei materiali richiesti per la produzione di conglomerati bituminosi contenenti il 20% di fresato e di materiali risparmiati (i. e. aggregati naturali da cave e bitume vergine) grazie all’evitata produzione di conglomerati bituminosi “tradizionali” ovvero contenenti esclusivamente materiali vergini.

**Tabella 41.** Percentuali medie di impiego di fresato (rispetto al peso totale di inerti) e di bitume vergine risparmiato (espresso rispetto al 10% di fresato nella miscela) ricavate dal campione di impianti di CB a caldo in esame.

Impianto	Provincia	% fresato (su peso inerti)	% bitume vergine risparmiato (ogni 10% di fresato)
Impianto 1A	LO	10%	0,25%
Impianto 1B	LO	10%	0,25%
Impianto 2A	BG	23%	0,4%
Impianto 2B	BG	23%	0,4%
Impianto 3A	BS	18%	0,35%
Impianto 3B	BS	18%	0,35%
Impianto 3C	BS	28%	0,35%
Impianto 4	MB	23%	ND
Impianto 5	BS	21%	0,33%
Impianto 6A	MI	26%	0,3%
Impianto 7A	MB	27%	0,50%
Impianto 9	MI	15%	0,5%
<b>Valore medio</b>		<b>20%</b>	<b>0,35%</b>

ND=non dichiarato

**Tabella 42.** Dosaggi richiesti dal Capitolato Speciale di Appalto (CSA) di ANAS per i conglomerati bituminosi destinati a strati di base, binder e usura.

CSA - ANAS	Base	Binder	Usura
% fresato (sugli inerti)	15% - 30%	15% - 25%	10% - 15%
% bitume (sulla miscela)	3,8% - 5,2%	4,1% - 5,5%	4,5% - 6,1%
% rigeneranti ACF (sul bitume)	3% - 5%	2% - 4%	2% - 4%

### 2.4.2.3 Riciclo a freddo del fresato (SR2)

La produzione dei conglomerati a freddo non necessita dell'asciugatura e del riscaldamento preventivo degli inerti e del fresato, in quanto le miscele vengono confezionate a temperatura ambiente con l'impiego di leganti in fase acquosa; tale soluzione tecnologica determina diversi vantaggi in termini di risparmio di risorse minerali non rinnovabili, di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni dirette in atmosfera, nonché di contenimento dei costi di installazione ed esercizio dell'impianto. Il riciclo a freddo garantisce inoltre elevate percentuali di reimpiego del fresato nella miscela (valori tipici: 80-90%) e caratteristiche prestazionali dei prodotti finiti comparabili con quelle dei conglomerati a caldo. Tuttavia, tale procedura risulta indicata solo per la realizzazione di strati di base per strade ad elevato traffico, o di strati di

base/binder per strade a basso regime di percorrenza; inoltre, tale tecnica prevede l'impiego di emulsione bituminosa che deve essere opportunamente formulata, tenendo conto delle caratteristiche del fresato che si vuole utilizzare, al fine di garantire “tempi di rottura<sup>2</sup>” adeguati ed evitare problemi di rigonfiamento.

Oltre al fresato e agli aggregati vergini possono essere impiegati anche altri tipi di materiali riciclati (ad esempio ceneri pesanti o scorie nere di acciaieria), come nel caso dell'impianto 8 (vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2); a questi vengono aggiunti cemento, acqua e diversi tipi di leganti bituminosi, di solito emulsioni bituminose oppure bitume schiumato (più raro), i cui quantitativi devono essere opportunamente definiti mediante le pre-qualifiche di laboratorio e i campi prove effettuati durante la produzione e la posa in opera dei prodotti finali.

Come mostrato in Tabella 38, il riciclo a freddo del fresato è effettuato dal 25% degli impianti della regione ed è mirato prevalentemente alla produzione delle cosiddette “eco-basi” (19%) e in misura minore al confezionamento di MCAD (6%); si specifica che quest'ultima è un'opzione “sperimentale” per la quale l'impianto sta ancora conducendo campi prova per testare le ricette più idonee e le proprietà dei prodotti finali ottenuti. Per questo motivo nello scenario attuale rappresentativo del contesto regionale (Figura 20), questa opzione non è stata considerata ed è stato assunto che il 25% del fresato venga trattato in impianti di riciclo a freddo destinati al solo confezionamento di eco-basi; la valutazione del processo a freddo con produzione di MCAD verrà affrontata all'interno dell'analisi di sensitività relativa alle soluzioni tecnologiche alternative (cfr. paragrafo 2.4.3).

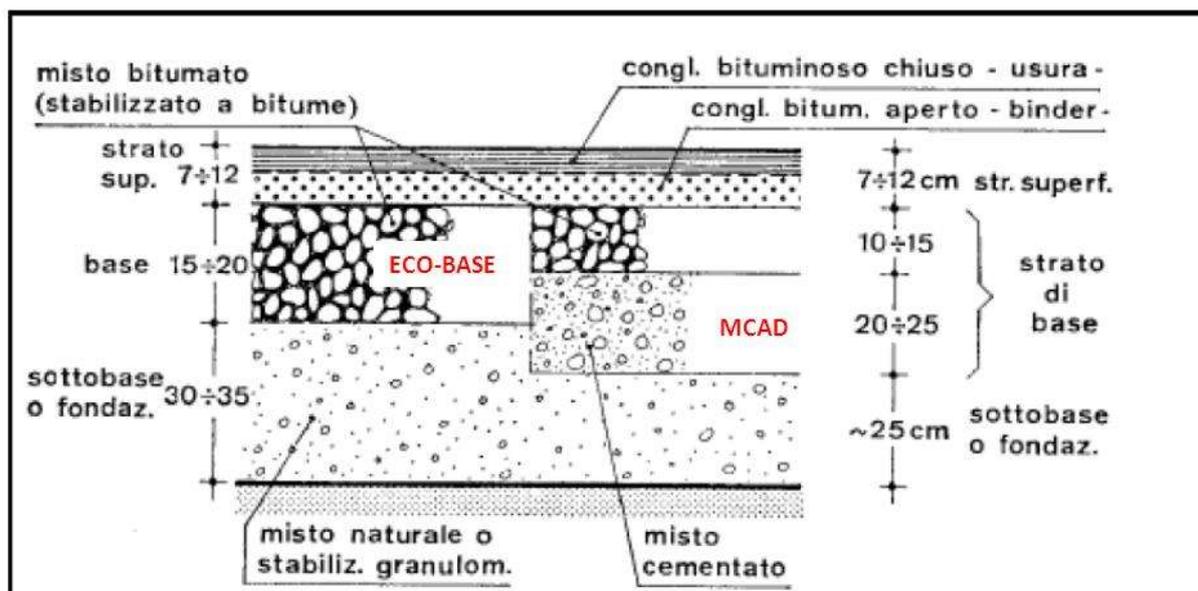
Il processo di confezionamento può assumersi lo stesso nei due casi, sia in termini di tecnologie adottate che di tipologie di materie prime impiegate, mentre cambiano le specifiche ricette e soprattutto il destino finale dei prodotti nella pavimentazione stradale e, di conseguenza, il tipo di prodotto evitato.

Le eco-basi vengono infatti utilizzate per la realizzazione degli strati di base del pacchetto della pavimentazione stradale e quindi sostituiscono il CB a caldo con cui generalmente si costruisce questo strato; al di sopra della eco-base, che ha uno spessore maggiore rispetto alla tradizionale base con conglomerato a caldo (30-50% in più, come indicato da alcune imprese stradali contattate), vengono posizionati gli strati di binder e usura (Figura 16 a sinistra).

I misti cementati ad alta duttilità vengono impiegati per la realizzazione delle fondazioni o sottobasi nelle pavimentazioni stradali di tipo semi-rigido (es. autostrade, aeroporti) o per “rinforzare” fondazioni particolarmente scadenti (Figura 16 a destra); pertanto, questi sostituiscono uno strato di analogo spessore composto da inerti vergini, cemento e acqua (i.e. misto cementato tradizionale).

---

<sup>2</sup> Per “rottura” si intende la completa separazione del bitume dall'acqua; generalmente, per una buona riuscita dello strato, sono indispensabili emulsioni sovrastabilizzate, ovvero a rottura molto lenta, capaci di impastare i diversi materiali della miscela (filler, cemento, fresato) e di liberare l'acqua solo dopo o durante la fase di costipamento.



**Figura 16.** Schema degli strati tipici che compongono una pavimentazione flessibile (a sinistra) e semirigida (a destra), nel caso di utilizzo di eco-base oppure di misto cementato ad alta duttilità (MCAD).

### Descrizione del processo a freddo

L'impianto di riciclo a freddo del fresato consiste in un impianto di miscelazione o betonaggio, dotato di un adeguato numero di tramogge di alimentazione, per il fresato (pezzatura inferiore a 20 mm) e per gli altri materiali naturali o artificiali (es. scorie) di diverse classi dimensionali, che vengono dosati in peso secondo la ricetta stabilita per la miscela che si intende produrre.

Vengono poi aggiunti l'emulsione bituminosa ed il cemento, che vengono pesati mediante un sistema a celle di carico installato sui rispettivi dosatori e alimentati mediante tubazioni al mescolatore monoalbero ad asse orizzontale; il dosaggio dell'acqua avviene invece attraverso un sistema di tipo volumetrico. All'interno del mescolatore il movimento dell'impasto viene generato da speciali pale elicoidali montate sull'albero rotante che fanno avanzare i materiali miscelandoli tra loro per poi inviarli al punto di scarico.

Terminato l'impasto, il materiale viene trasportato in cantiere e steso con la vibrofinitrice, come un normale conglomerato a caldo, e compattato con rullo statico.

### Tipologia e dosaggi dei materiali impiegati

Nelle eco-basi, le percentuali tipiche di impiego di fresato nella miscela di inerti sono piuttosto elevate e comprese nel range 80-90% come mostrato in Tabella 43. La restante parte degli inerti è sabbia naturale, spesso aggiunta per raggiungere la curva granulometrica ottimale; in alternativa può essere utilizzato altro materiale riciclato, come scorie d'acciaieria o ceneri pesanti, adeguatamente pretrattato per ottenere la granulometria richiesta.

**Tabella 43.** Dosaggi percentuali di fresato nelle miscele a freddo per eco-basi, forniti dai 3 impianti in esame e riferiti al peso totale degli inerti.

Impianto	Provincia	Prodotto finale	% impiego di fresato (sul totale inerti)
Impianto 6B	MI	Eco-basi	90%
Impianto 7B	MB	Eco-basi	90%
Impianto 8	BS	Eco-basi	80%

I dosaggi tipici di fresato, inerti naturali, emulsione bituminosa, cemento e acqua impiegati nel confezionamento delle eco-basi sono stati ricavati sulla base dei dati dichiarati dal campione di impianti in esame; i valori ottenuti e i rispettivi range sono riportati in Tabella 44 e sono riferiti al peso totale della miscela finale. I valori assunti nello scenario attuale LCA2 per i dosaggi dei diversi materiali nelle miscele eco-basi sono riportati in Tabella 49 a confronto con le miscele tradizionali di soli materiali vergini.

**Tabella 44.** Composizione percentuale delle miscele di eco-basi, espressa rispetto al peso della miscela finale, fornite dai 3 impianti analizzati e relativi range di variazione dei materiali impiegati.

<b>Materiali impiegati Eco-base</b>	
Inerti totali	88,5% - 91%
<i>di cui:</i>	
<i>fresato</i>	80% - 90%
<i>inerti vergini</i>	20% - 10%
Emulsione Bituminosa	2,5% - 4,5%
Cemento	1,5% - 2,5%
Acqua	4,5%

#### **2.4.2.4 Prodotti evitati**

Come anticipato nei paragrafi precedenti, la tipologia e quantità di prodotti evitati varia a seconda delle modalità con cui è effettuato il riciclo del fresato (a caldo/a freddo) e del tipo/destino dei prodotti finali ottenuti (nuovi conglomerati bituminosi/ eco-basi); pertanto la trattazione dei prodotti evitati verrà effettuata separatamente per i due casi in esame.

##### **I prodotti evitati nel riciclo a caldo del fresato**

L'impiego di fresato all'interno del processo di produzione a caldo di nuovi conglomerati bituminosi consente di ridurre sia i quantitativi di inerti naturali da cava sia il dosaggio di bitume vergine necessario per la composizione della miscela finale. In particolare:

- 1 kg di fresato nella miscela a caldo sostituisce una quantità leggermente inferiore di aggregato naturale in virtù del fatto che il fresato contiene anche una parte di bitume residuo; per il calcolo del rapporto di sostituzione tra fresato e inerti vergini sono state prese a riferimento le miscele presentate nel lavoro di Giani et al., 2015 e riportate in Tabella 45. In questa tabella sono mostrati i quantitativi dei materiali necessari per la realizzazione di strati di usura, binder e base di diverso spessore (rispettivamente 5 cm, 6 cm e 14 cm) nel caso in cui i CB siano prodotti da un processo a caldo tradizionale (solo materiali vergini) e da un processo con aggiunta di fresato (in percentuali 10% per strati di usura, 20% nel binder e 30% nella base). Il rapporto di sostituzione tra fresato e inerti naturali è stato calcolato, per ciascuna miscela, come rapporto tra il quantitativo di fresato impiegato e il quantitativo di aggregati naturali risparmiati (sabbia, ghiaia e filler) rispetto alla ricetta tradizionale, desunti dal confronto tra i quantitativi di materiali impiegati nei diversi strati, con e senza aggiunta di fresato (Tabella 45). Risulta che il rapporto di sostituzione è 1:0,969 per CB di usura, 1: 0,958 per CB di binder e 1:0,962 per CB di base (Tabella 46); Inoltre, dall'indagine telefonica effettuata è emerso che la produzione media di CB negli impianti regionali prevede il 50% di CB di usura, il 25% di CB di binder e il 25% di CB di base; pesando il rapporto sostituzione stimato per ciascuna miscela per la corrispondente percentuale di produzione si ottiene il valore medio del rapporto di sostituzione, pari a 1:0,965 e assunto nello scenario attuale di base per l'analisi LCA2 (Tabella 46). Pertanto, si assume che 1 kg di fresato aggiunto nel confezionamento delle miscele a caldo in regione consenta di risparmiare 0,965 kg di inerti naturali vergini.

**Tabella 45.** Materiali impiegati nelle diverse tipologie di conglomerati bituminosi (CB usura, binder e base), nel caso di produzione “tradizionale” con materiali vergini e produzione con inserimento di fresato (RAP) nella miscela. Fonte: Giani et al., 2015.

Materiali impiegati	CB usura - vergine	CB usura – 10% RAP	CB binder – vergine	CB binder - 20% RAP	CB base - vergine	CB base – 30% RAP
Sabbia (kg)	295,3	284,8	511,8	417,0	1.993,7	1.919,7
Ghiaia (kg)	1.263,4	1.123,6	1.457,4	1.173,0	2.546,5	1.431,2
Filler (kg)	99,6	83,9	40,0	40,0	187,5	0
Bitume (kg)	89,1	83,9	96,9	80,0	207,3	153,0
RAP 0/15 (kg)	-	171,3	-	-	-	-
RAP 0/25 (kg)	-	-	-	395,9	-	1.431,2
<b>Totale (kg)*</b>	<b>1.747,4</b>		<b>2.106</b>		<b>4.935</b>	

\* Il totale della miscela varia negli strati CB di usura, binder e base in quanto, nello studio di Giani et al., 2015 vengono considerati strati di diverso spessore, pari a 5 cm, 6 cm e 14 cm.

**Tabella 46.** Calcolo del rapporto di sostituzione (RS) medio sulla base del fresato impiegato e degli inerti vergini risparmiati in ciascuno strato di CB (dati da Tabella 45), considerando la produzione tipica di CB a caldo in regione.

Tipologia di CB	Produzione in regione	Fresato impiegato (kg)	Inerti vergini risparmiati* (kg)	RS (in massa)	RS medio (in massa)
CB usura	50%	171,3	166,0	1:0,969	
CB binder	25%	395,9	379,2	1:0,958	<b>1:0,965</b>
CB base	25%	1431,2	1376,8	1:0,962	

- Ogni 10% di fresato aggiunto alla miscela di conglomerato bituminoso si risparmia lo 0,35% di bitume vergine in quanto parte del bitume invecchiato presente nel fresato viene riattivato attraverso l'utilizzo degli ACF; il valore di 0,35% è stato determinato sulla base delle informazioni fornite dagli impianti come mostrato in Tabella 41 ed è in linea con il risparmio di bitume che si otterrebbe utilizzando i dati presentati nel lavoro di Giani et al., 2015, riportati in Tabella 47.

**Tabella 47.** Percentuali di bitume impiegato nelle diverse miscele CB per strati di usura, binder e base calcolati da valori di letteratura (Giani et al., 2015) per conglomerati tradizionali realizzati con solo inerti vergini o con dosaggi diversi di fresato (% RAP); risparmio percentuale di bitume per ogni 10% di fresato aggiunto nelle miscele CB e valore medio di bitume risparmiato in regione.

Tipologia di CB	% bitume - tradizionale	% bitume - con RAP	% risparmio di bitume ogni 10% di RAP	% risparmio medio di bitume ogni 10% di RAP*
CB usura	5,1%	4,8% con RAP = 10%	0,298	
CB binder	4,6%	3,8% con RAP = 20%	0,401	<b>0,341</b>
CB base	4,2%	3,1% con RAP = 30%	0,367	

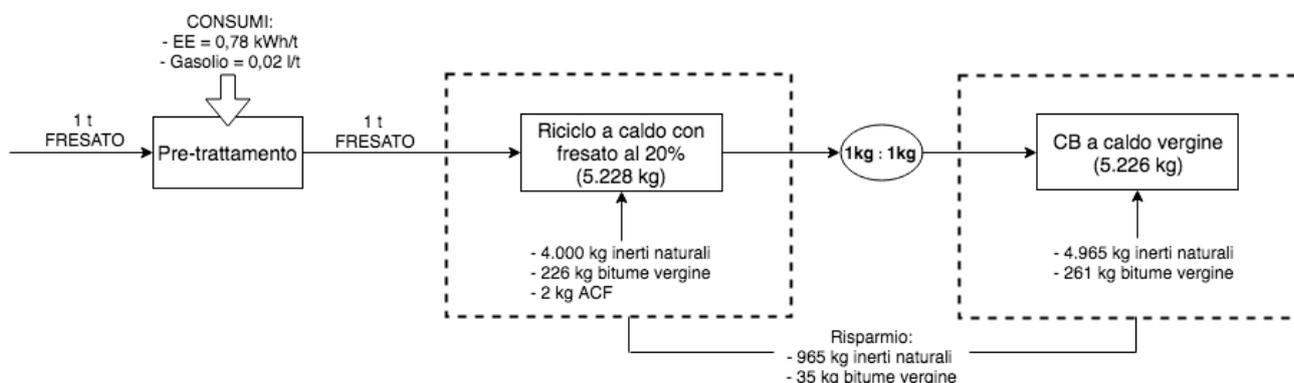
\* Calcolato considerando che la produzione di CB in regione è 50% CB usura, 25% CB binder e 25% CB base

Si è assunto, inoltre, che l'impiego di fresato nel processo di produzione dei CB a caldo non comporti alcun risparmio di energia elettrica né di combustibile per il forno o variazione delle emissioni prodotte dall'impianto rispetto al processo tradizionale che impiega solo inerti vergini (Figura 17).

La Figura 17 sintetizza i dati di inventario utilizzati per la modellizzazione del processo di riciclo a caldo di 1 tonnellata di fresato; in figura sono presentati i consumi di energia elettrica e gasolio necessari per il pre-trattamento del fresato in ingresso all'impianto, i quantitativi dei diversi materiali impiegati per la produzione del nuovo conglomerato contenente il 20% di fresato (rispetto al peso degli inerti) e il prodotto CB vergine sostituito (che si ipotizza costituito per il 95% da inerti naturali e per il 5% da bitume). I

quantitativi dei materiali che compongono le due miscele CB sono stati calcolati sulla base delle ricette riportate in Tabella 48.

In Figura 17 sono inoltre mostrate le risorse prime risparmiate, i.e. inerti naturali e bitume, calcolate per differenza tra i dosaggi dei due prodotti CB.



**Figura 17.** Schema del riciclo a caldo di 1 tonnellata di fresato per la produzione di CB (%RAP= 20%), inclusivo dei prodotti sostituiti.

**Tabella 48.** Valori di riferimento per i dosaggi dei materiali impiegati nel confezionamento di miscele a caldo, con inserimento di fresato (20% RAP) e senza (CB a caldo vergine).

Materiali	Riciclo a caldo	
	Prodotto finito	Prodotto evitato
	CB a caldo con 20% RAP	CB a caldo vergine
Inerti naturali (%)	76,5%	95,0%
RAP (%)	19,1%	-
Bitume (%)	4,33%	5,0%
ACF (%)	0,04%	-

### **I prodotti evitati nel riciclo a freddo del fresato**

Quando il fresato viene impiegato in un processo di riciclo a freddo per il confezionamento delle eco-basi, il prodotto che si ottiene è destinato alla realizzazione di strati di base del pacchetto stradale altrimenti realizzati con CB a caldo; in questo caso, però, le caratteristiche del prodotto finale, in termini di qualità tecniche e prestazionali, non sono completamente equivalenti a quelle del CB a caldo, motivo per il quale lo strato costruito con l'eco-base è generalmente più alto del 30% - 50% rispetto a quello tradizionale costituito di soli inerti vergini, come emerso dall'indagine telefonica (Figura 16). A titolo di esempio, se lo spessore previsto per lo strato di base composto da CB vergine è di 10 cm, lo stesso strato realizzato con eco-base avrà uno spessore di 15 cm. Il rapporto di sostituzione tra l'eco-base ed il CB a caldo sarà quindi di 1:0,67

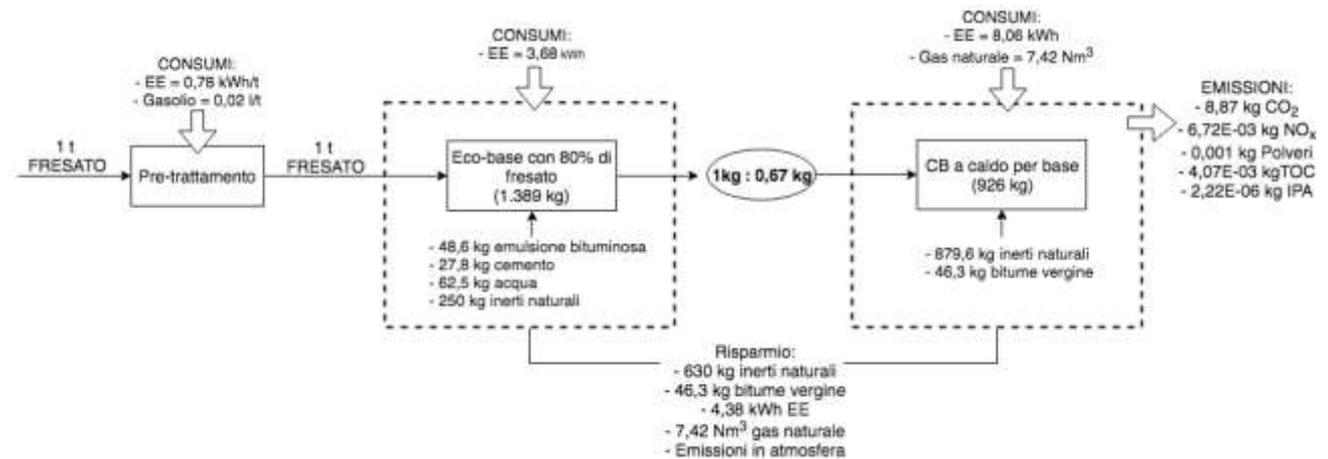
ovvero 1 kg di eco-base consente di risparmiare 0,67 kg di CB tradizionale che si assume composto per il 95% da inerti vergini da cava e per il restante 5% da bitume vergine. Ciò permette di risparmiare, oltre agli inerti vergini e bitume, anche i consumi di elettricità e gas naturale associati alla produzione di 0,67 kg di CB a caldo e le emissioni derivanti dal processo produttivo, calcolati a partire dai valori di letteratura riportati nello studio di Giani et al., 2015 e mostrati in Tabella 49. Per contro, la produzione di 1 tonnellata di eco-base necessita di materiali aggiuntivi, quali l'emulsione bituminosa (3,5% della miscela finale), il cemento (2% della miscela finale) e l'acqua (4,5% della miscela finale) e comporta consumi di energia elettrica pari a 2,65 kWh/t (valore fornito dall'impianto di BS, vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2), come mostrato in Tabella 49.

**Tabella 49.** Valori di riferimento per la composizione dell'eco-base e del CB a caldo vergine evitato e relativi consumi di elettricità e gas naturale espressi per tonnellata di miscela finale prodotta.

<i><b>Materiali</b></i>	Prodotto finito	Prodotto evitato
	Eco-base con 80% RAP	CB a caldo vergine
Inerti naturali (%)	18,0%	95,0%
RAP (%)	72,0%	-
Emulsione (%)	3,5%	-
Cemento (%)	2,0%	-
Acqua (%)	4,5%	-
Bitume (%)	-	5,0%
<i><b>Consumi</b></i>		
Elettricità (kWh/t)	2,65	8,7
Gas naturale (m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /t)	-	8,01
<i><b>Emissioni in aria</b></i>		
CO <sub>2</sub> (kg/t)	-	9,58
NO <sub>x</sub> (kg/t)	-	7,26E-03
Polveri (kg/t)	-	1,08E-03
COT (kg/t)	-	4,40E-03
IPA (kg/t)	-	2,4E-06

Prendendo a riferimento, come unità funzionale, 1 tonnellata di fresato che entra nel sistema di riciclo a freddo con produzione di eco-basi (Figura 18), ipotizzando che il fresato sia dosato all'80% rispetto al peso degli inerti totali (ovvero il 72% nella miscela finale), si ottengono 1,39 tonnellate di eco-base; vengono aggiunti, oltre al fresato, 48,6 kg di emulsione bituminosa, 27,8 kg di cemento Portland, 62,5 kg di acqua deionizzata e 250 kg di inerti vergini. Con 1,39 tonnellate di eco-base è possibile sostituire 926 kg di CB a caldo costituito da 880 kg di inerti vergini naturali e 46,3 kg di bitume. Inoltre, per 1 tonnellata di fresato sottoposta a trattamento di riciclo a freddo si consumano 3,68 kWh/t di energia elettrica mentre si evitano 8,06 kWh/t di elettricità e 7,42 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/t di gas naturale grazie alla mancata produzione di CB tradizionale a caldo. Al netto, quindi, il riciclo a freddo comporta un risparmio di 630 kg/t di inerti naturali, 46,3 kg/t di

bitume vergine, 4,38 kWh/t di energia elettrica, 7,42 m<sup>3</sup>/t di gas naturale nonché l'evitata emissione di 8,87 kgCO<sub>2</sub>/t, 6,7 10<sup>-3</sup> kgNO<sub>x</sub>/t, 1,0 10<sup>-3</sup> kgPolveri/t, 4,1 10<sup>-3</sup> kgCOT/t e 2,22E-06 kgIPA/t. Le emissioni evitate sono state calcolate moltiplicando i valori specifici di emissione associati alla produzione di CB a caldo in Tabella 49 il quantitativo di prodotto effettivamente sostituito (0,926 t) attraverso la realizzazione dell'eco-base.



**Figura 18.** Schema del riciclo a freddo di 1 tonnellata di fresato per la produzione di eco-basi (%RAP=80%), inclusivo dei prodotti e consumi evitati.

In Tabella 50 è mostrata una sintesi dei dati di inventario relativi al riciclo a caldo e a freddo del fresato, espressi per 1 tonnellata di fresato impiegato nella miscela finale; nella tabella sono mostrate le percentuali di impiego di fresato (%RAP), espresse rispetto alla miscela finale prodotta, la tipologia e quantità di prodotto finito ottenuto dal trattamento (CB a caldo 20%RAP, eco-basi 80%RAP) e i materiali aggiuntivi richiesti per il confezionamento delle due miscele. Sono inoltre riportati la tipologia e quantità di prodotti evitati, calcolati sulla base dei rapporti di sostituzione assunti, e quindi l'effettivo risparmio di materie prime (espressi per tonnellata di fresato impiegato nella miscela); vengono inoltre mostrati i consumi evitati, nel caso della produzione di eco-basi, in termini di energia elettrica e gas naturale.

Infine, tenendo conto della ripartizione dei flussi di fresato all'interno del sistema impiantistico regionale, è stato ricostruito il bilancio di massa per 1 tonnellata di fresato avviata a trattamento specifico, con indicazione della composizione delle miscele finali prodotte, del risparmio di risorse primarie naturali, dei consumi indotti ed evitati, come riportato in Figura 19.

**Tabella 50.** Sintesi dei dati di inventario per le diverse tecnologie di riciclo, riferiti a 1 tonnellata di fresato in ingresso agli impianti. Per ciascuna tipologia di prodotto finito (CB a caldo 20%RAP, eco-basi 80%RAP) sono indicate le quantità prodotte e le percentuali di fresato utilizzato nelle miscele finali, i dosaggi dei materiali aggiuntivi richiesti, la tipologia e quantità di prodotti evitati, le materie prime risparmiate ed i consumi energetici evitati.

Impianto di destino	% RAP	Quantità prodotto finito (t)	Tipologia prodotto finito	Prodotto evitato (t)	Risparmio aggregati naturali (kg)	Risparmio bitume (kg)	Materiali aggiuntivi (kg)	Consumi energetici evitati
Riciclo a caldo	19,1%	5,23	CB a caldo 20% RAP	5,23 t CB a caldo vergine	965	35,0	ACF: 2 kg	-
Riciclo a freddo (eco-basi)	72,0%	1,39	Eco-base 80% RAP	0,925 t CB a caldo vergine	630	46,3	Emulsione: 48,6 kg Cemento: 27,8 kg Acqua: 62,5 kg	Elettricità: 4,38 kWh/t Gas naturale: 7,42 m <sup>3</sup> /t

## 2.4.2.5 Analisi dei trasporti

### Distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti

La distanza media per il conferimento del fresato agli impianti di riciclo, è stata calcolata analizzando i moduli RT dei MUD presentati dai 24 impianti della regione che hanno ricevuto e trattato esclusivamente questo tipo di rifiuto. Sulla base di questi dati è stato possibile ricostruire la matrice di provenienza del rifiuto (fresato) in regione (Tabella 51), dai cui sono state calcolate le distanze di trasporto medie, minime e massime, adottando le stesse modalità di calcolo già presentate al paragrafo 2.3.2.3.

I risultati dell'analisi dei trasporti per il campione di 24 impianti sono mostrati in Tabella 52. La distanza di percorrenza varia da un valore minimo di 41 km ad un massimo di 50 km; il valore medio assunto nello scenario attuale di base per l'LCA2 è di 46 km. Da notare che i valori presentati in Tabella 52 risultano maggiori rispetto alle stime mostrate in Tabella 32 per il CER 17 03 02 in quanto queste si riferiscono a tutti gli impianti regionali che hanno ricevuto il rifiuto in esame (196 in totale, v. Figura 3 Capitolo 1) mentre la Tabella 52 si basa su un campione più ristretto e relativo ai soli 24 impianti che effettuano il riciclo dedicato.

**Tabella 51.** Percentuali di fresato (CER 17 03 02) conferito da soggetti terzi in regione ai 24 impianti che effettuano riciclo specifico (%RT) e direzioni di provenienza di tali rifiuti in regione, espresse in percentuali e relative al 2014.

		% RT	PROVINCIA DI ORIGINE DEI RIFIUTI											
			BG	BS	CO	CR	LC	LO	MB	MI	MN	PV	SO	VA
PROVINCIA DI UBICAZIONE DEGLI IMPIANTI DI RICICLO	BG	9,6	33,2	3,7	0,0	0,3	0,8	2,0	29,1	30,4	0,5	0,0	0,0	0,0
	BS	23,2	10,3	68,6	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	6,6	13,0	0,0	0,0	0,0
	CO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	CR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	LC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	LO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MB	16,6	0,0	0,0	10,2	0,0	2,0	0,1	17,1	61,3	0,0	0,0	0,3	9,0
	MI	33,2	25,1	20,2	9,9	0,0	0,2	0,0	7,9	31,8	0,0	0,5	0,0	4,4
	MN	5,2	31,7	44,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24,1	0,0	0,0	0,0
	PV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SO	2,5	0,0	10,0	2,3	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	86,2	0,0
	VA	9,6	0,0	0,0	10,6	0,0	0,0	0,0	9,6	48,2	0,0	0,0	0,0	31,7

**Tabella 52.** Distanza massima, minima e media assunta per il conferimento del fresato agli impianti in regione che effettuano il riciclo dedicato, a caldo e freddo (campione di 24 impianti)

Codice CER	Distanza massima di conferimento	Distanza minima di conferimento	Distanza media di conferimento
	[km]	[km]	[km]
17 03 02	50	41	46

Dall'analisi dei moduli RT è anche emerso che il rifiuto viene conferito prevalentemente (70%) con mezzi di grandi dimensioni (superiori a 32 t) e per la restante parte con mezzi di media dimensione (16 - 32 t); per la tipologia di camion impiegati, data la mancanza di questa informazione, si è scelto di considerarli di classe EURO 5.

### Distanza di trasporto dei prodotti evitati

Nel caso di impiego di fresato nella produzione di conglomerati a caldo, il prodotto evitato è rappresentato dagli aggregati naturali di primo impiego e dal bitume vergine.

Per l'evitato trasporto degli aggregati naturali (sabbia, ghiaietto, pietrisco, filler) valgono le considerazioni già presentate al paragrafo 2.4.2.4; i valori assunti per lo scenario attuale di base LCA2 e il relativo range di variazione per l'analisi di sensitività sono quelli mostrati in Tabella 60 (40 km nello scenario attuale, con una variazione nell'intervallo 30 - 60 km).

Per l'evitato trasporto del bitume vergine, le stime si basano sulle indicazioni fornite dalle aziende contattate e relative ai 12 impianti di CB a caldo in esame, che hanno acquistato bitume vergine dalle raffinerie di Ravenna, Genova, Livorno e Pavia. La distanza media di approvvigionamento, assunta nello scenario attuale, è pari a 210 km; il trasporto varia in un range di 186 - 240 km, considerato nell'analisi di sensitività, come mostrato in Tabella 53. I mezzi di trasporto considerati sono quelli di medie dimensioni 16 - 32 tonnellate di classe EURO 5 (in analogia con lo studio di Giani et al., 2015).

**Tabella 53.** Distanze stradali tra le raffinerie e gli impianti di conglomerato bituminoso a caldo in regione per la stima dell'evitato trasporto di bitume vergine.

Provincia	n. impianti CB a caldo	Comuni raffinerie				Distanza trasporto bitume (km)
		Ravenna (km)	Genova (km)	Livorno (km)	Pavia (km)	
BG	2	321	203	336	90	237
BS	4	275	232	290	116	228
LO	2	269	170	273	34	186
MB	2	306	171	310	69	214
MI	2	296	148	300	46	198
<b>TOTALE</b>	<b>12</b>			<b>DISTANZA MEDIA:</b>		<b>213</b>

### Distanza di trasporto dei materiali ausiliari al processo

La distanza per la fornitura di ACF e di emulsione bituminosa rispettivamente agli impianti di CB a caldo e di CB a freddo è stata calcolata come media rispetto alla sede di Iterchimica (BG) che fornisce la maggior parte degli impianti in esame. Nella Tabella 54 è riportato il calcolo effettuato; nel caso di CB a caldo e impianti di riciclo a freddo con produzione di eco-basi è risultata una distanza media di 48 km mentre la

percorrenza risulta di 56 km per l'unico impianto di confezionamento di misto cementato ad alta duttilità in provincia di Lodi.

**Tabella 54.** Calcolo delle distanze medie di percorrenza per la fornitura di ACF e di emulsione bituminosa.

<b>IMPIANTI DI CB A CALDO</b>			
Provincia impianto	n. impianti	BG (km)	Distanza media ACF (km)
BG	2	19,3	
BS	4	67,9	
LO	2	56,4	48
MB	2	34,2	
MI	2	42,3	
<b>IMPIANTI DI CB A FREDDO - ECOBASI</b>			
Provincia impianto	n. impianti	BG (km)	Distanza media emulsione (km)
BS	1	67,9	
MB	1	34,2	48
MI	1	42,3	
<b>IMPIANTI DI CB A FREDDO - MCAD</b>			
Provincia impianto	n. impianti	BG (km)	Distanza media emulsione (km)
LO	1	56,4	56,4

Per il calcolo della percorrenza media per la fornitura di cemento agli impianti a freddo con produzione di eco-basi sono state considerate le sedi dei cementifici della regione Lombardia (indicate in Tabella 55) e la loro distanza rispetto agli impianti di BS, MB e MI; il valore risultante, impiegato nello scenario attuale, è di 79 km.

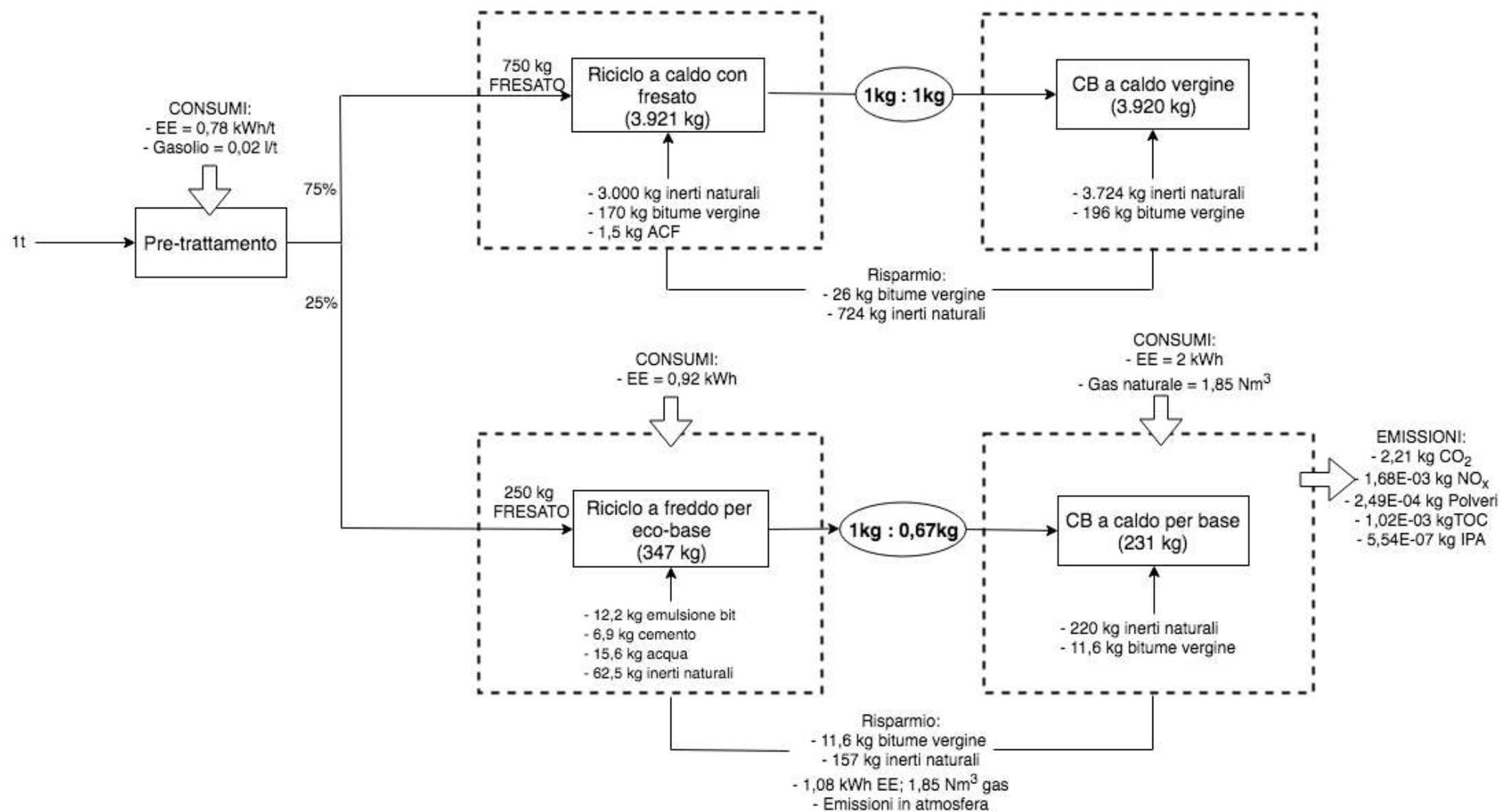
**Tabella 55.** Distanza media di fornitura del cemento agli impianti di produzione di eco-basi in regione.

Impianti a freddo (eco-base)	Cementifici					Distanza media (km)
	Caravate (VA)	Ternate (VA)	Calusco D'Adda (BG)	Rezzato (BS)	Tavernola Bergamasca (BG)	
MI	76	64	46	108	85	
MB	84	72	26	97	74	<b>79</b>
BS	161	149	72	18	48	

#### 2.4.2.6 Sintesi dei dati di inventario per lo scenario attuale dell'LCA2

In Figura 19 è riportato il bilancio di massa del sistema di recupero che include anche la *system expansion* del prodotto evitato per la quantificazione dei benefici associati all'utilizzo dei diversi prodotti ottenuti dal trattamento specifico di recupero del fresato. Da una tonnellata di rifiuto bituminoso in ingresso al sistema impiantistico di recupero regionale, composto per il 75% di impianti di CB a caldo e per il restante 25% da impianti a freddo, è stato possibile risparmiare nel 2014 l'estrazione di circa 881 kg di aggregati naturali, grazie ai 724 kg di inerti vergini risparmiati con la produzione di nuovi conglomerati bituminosi contenenti il 20% di fresato e di 157 kg di inerti evitati grazie alla produzione di eco-basi contenenti l'80% di fresato (percentuali di fresato espresse rispetto al peso totale degli inerti).

Nelle Tabelle 56-60 sono riportati i processi implementati all'interno del software SimaPro 8.3 per costruire lo scenario attuale dell'analisi LCA2, avente come unità funzionale una tonnellata di fresato inviata al sistema di riciclo attualmente implementato in regione. I processi che rientrano all'interno del sistema sono: il trasporto del fresato dal cantiere all'impianto ricevente (distanza percorsa 46 km), il pre-trattamento del fresato prima dell'inserimento nel processo di riciclo vero e proprio (consumi associati: 0,78 kWh/t di elettricità e 0,02 l/t di gasolio), il riciclo a caldo e a freddo con produzione di nuovi conglomerati bituminosi ed eco-basi che comporta l'impiego di materiali aggiuntivi (ACF, emulsione bituminosa, cemento e acqua). Si precisa che non vengono considerati i consumi di energia e le emissioni dirette nel caso del riciclo a caldo in quanto i prodotti finali vanno a sostituire le miscele "tradizionali" realizzate con soli inerti vergini ma con il medesimo ciclo produttivo (i consumi e le emissioni non cambiano nel caso di impiego del fresato nelle miscele realizzate con la stessa tecnologia impiantistica). Invece, nel caso di riciclo a freddo con produzione di eco-basi il prodotto finale va a sostituire un materiale realizzato con un processo tecnologico diverso, il conglomerato bituminoso a caldo; quindi, in questo caso, si è tenuto conto sia dei consumi di elettricità (8,06 kWh/t) e gas naturale risparmiati (7,42 m<sup>3</sup>/t di gas naturale), in quanto si evita il processo di produzione a caldo dei CB, sia dei consumi indotti dal confezionamento a freddo delle miscele (3,68 kWh/t), entrambi espressi per tonnellata di fresato impiegata nel processo di riciclo a freddo, nel caso di dosaggio del fresato pari all'80% degli inerti totali della miscela. Oltre a questi processi è stato necessario includere anche tutti i processi inseriti nella *system expansion*, ovvero il processo inerente la produzione di aggregati naturali vergini, materiale principale sostituito dai diversi prodotti finali, il processo di produzione e trasporto del bitume vergine agli impianti di CB a caldo e il confezionamento e il trasporto del cemento e dell'emulsione bituminosa agli impianti di confezionamento delle eco-basi.



**Figura 19.** Sintesi del bilancio di massa relativo ad una tonnellata di fresato in ingresso al sistema di recupero dedicato in regione Lombardia con indicazione del risparmio di materie prime, di consumi energetici e dell'evitate emissioni.

**Tabella 56.** Processi del database ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* utilizzati per modellizzare lo scenario attuale di recupero dedicato del fresato.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Conferimento fresato agli impianti				1 t * 46 km
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	70%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 ton, EURO5 {RER}</i>	30%
Pretrattamento fresato		<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage {IT}   market for</i>	0,78 kWh
	Consumo diesel	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}   market for</i>	0,02 l
Riciclo fresato		<i>ad hoc</i>		1 t
	Riciclo a caldo	<i>ad hoc</i>	Tabella 57	1 t * 75%
	Riciclo a freddo eco-base	<i>ad hoc</i>	Tabella 58	1 t * 25%

**Tabella 57.** Processi del database ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* utilizzati per modellizzare il recupero di una tonnellata di fresato nel processo a caldo con produzione di CB con 20%RAP. Con segno (+) i processi indotti dal riciclo e con segno (-) i processi evitati.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Riciclo a caldo		<i>ad hoc</i>		1 t
	Dosaggio ACF	ecoinvent 3.3	<i>Chemical, organic {GLO}   market for</i>	2 kg
+	Trasporto ACF	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	2,0E-03 t * 48 km
	Inerte vergine evitato	<i>ad hoc</i>	Produzione aggregati naturali in Lombardia (Tabella 60)	0,965 t
-	Bitume vergine evitato	ecoinvent 3.3	<i>Bitumen adhesive compound, hot {GLO}   market for</i>	35 kg
	Evitato trasporto bitume	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 ton, EURO5 {RER}</i>	0,035 t * 125 km

**Tabella 58.** Processi del database ecoinvent 3.3 e processi costruiti ad hoc utilizzati per modellizzare il recupero di una tonnellata di fresato a freddo per la produzione di eco-basi con 80%RAP. Con segno (+) i processi indotti dal riciclo e con segno (–) i processi evitati.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Riciclo a freddo	Produzione eco-base	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo acqua	ecoinvent 3.3	<i>Water, deionised, from tap water, at user {Europe without Switzerland}}</i>	62,5 kg
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage {IT}   market for</i>	3,68 kWh
	Emulsione bituminosa	ecoinvent 3.3	<i>Bitumen adhesive compound, cold {RER}   production</i>	48,6 kg
+	Cemento	ecoinvent 3.3	<i>Cement, Portland {Europe without Switzerland}   production</i>	27,8 kg
	Trasporto cemento	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	0,0278 t * 79 km
	Trasporto emulsione	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	0,0486 t * 48 km
	Inerte vergine evitato	<i>ad hoc</i>	Produzione aggregati naturali in Lombardia (Tabella 60)	0,63 t
	Bitume vergine evitato	ecoinvent 3.3	<i>Bitumen adhesive compound, hot {RER}   production</i>	46,3 kg
	Evitato consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage {IT}   market for</i>	4,38 kWh
-	Evitato consumo gas naturale	ecoinvent 3.3	<i>Natural gas, high pressure, {IT}   market for</i>	7,42 m <sub>n</sub> <sup>3</sup>
	Evitato trasporto bitume	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 ton, EURO5 {RER}</i>	0,0463 t*125 kg
	Evitate emissioni	<i>ad hoc</i>	Emissioni CB a caldo (Tabella 59)	0,926 t

**Tabella 59.** Emissioni in atmosfera riferite alla produzione di una tonnellata di conglomerato bituminoso a caldo vergine con processo HMA (dati di Giani et al., 2015).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Emissioni CB a caldo		<i>ad hoc</i>		1 t
	Emissione CO <sub>2</sub>	ecoinvent 3.3	<i>Carbon dioxide</i>	9,58 kg
	Emissione di polveri	ecoinvent 3.3	<i>Particulates, SPM</i>	1,08E-03 kg
	Emissione NO <sub>x</sub>	ecoinvent 3.3	<i>Nitrogen oxides, IT</i>	7,26E-03 kg
	Emissione COT	ecoinvent 3.3	<i>TOC, Total Organic Carbon</i>	4,43E-03 kg
	Emissioni IPA	ecoinvent 3.3	<i>PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons</i>	2,4E-06 kg

**Tabella 60.** Processo costruito ad hoc per la modellizzazione della produzione di una tonnellata di aggregati naturali in regione Lombardia (dati di inventario ricavati dalle statistiche cave provinciali del 2014, vedi paragrafo 2.3.2.2).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Produzione aggregati naturali		<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo d'acqua	ecoinvent 3.3	<i>Water, unspecified natural origin, IT</i>	0,00046 m <sup>3</sup>
	Sabbia e ghiaia	ecoinvent 3.3	<i>Sand and gravel</i>	1,04 t
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine {GLO}   market for</i>	15,62 MJ
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage {IT}   market for</i>	1,83 kWh
	Trasporto aggregati	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	1 t * 40 km

### 2.4.3 Scenari alternativi

Per una migliore interpretazione dei risultati del sistema attuale di LCA2, sono state messe a confronto le diverse tecnologie di riciclo del fresato in modo da quantificare i benefici e gli impatti associati a ciascuna modalità ed individuare i processi che risultano più critici sotto il profilo ambientale. Sono quindi stati confrontati i valori degli indicatori ambientali ed energetici e del consumo di risorsa naturale per 1 tonnellata di fresato che viene recuperata con riciclo a caldo (SR1) oppure con riciclo a freddo finalizzato al confezionamento di eco-basi (SR2).

A partire dai risultati dello scenario attuale di riciclo del fresato in regione e tenendo conto delle opzioni di riciclo ad oggi disponibili, sono stati costruiti alcuni scenari alternativi, di seguito sintetizzati, volti a individuare i parametri più significativi e a testare l'incidenza delle assunzioni e della variabilità dei dati di input sulle prestazioni ambientali complessive del sistema. Dal confronto dei risultati rispetto allo scenario attuale, in termini di impatti ambientali, di consumo di risorse energetiche e di consumo di risorsa naturale non rinnovabile (sabbia e ghiaia), è stato possibile individuare le possibili azioni migliorative in grado di ridurre i carichi ambientali associati al sistema di gestione attuale.

Nello specifico sono state effettuate le seguenti analisi di sensitività (Tabella 68):

**Analisi dei dosaggi dei materiali per il confezionamento delle miscele.** Nell'analisi di sensitività relativa al riciclo a caldo è stato modificato il risparmio di bitume per tonnellata di fresato aggiunto alla miscela finale, variando tale parametro da un valore minimo di 20 kg/t (scenario **SR1<sub>min</sub>**) ad un valore massimo di 50 kg/t (scenario **SR1<sub>max</sub>**) mentre nello scenario attuale è stato assunto pari a 35 kg/t. Il quantitativo di risorse risparmiate nei due scenari è mostrato in Tabella 61, a confronto con lo scenario attuale SR1.

Per il riciclo a freddo con produzione di eco-basi, sono stati valutati separatamente due parametri: l'emulsione bituminosa (3,5% della miscela nello scenario attuale) e il rapporto di sostituzione tra eco-base e lo strato realizzato con CB a caldo vergine (pari a 1:0,67 nello scenario base). Nello scenario **SR2\_E<sub>max</sub>** è stato ipotizzato un dosaggio di emulsione bituminosa pari al 4% (rispetto alla miscela finale) mentre nello scenario **SR2\_E<sub>min</sub>** il valore è pari al 3%; le miscele che si ottengono nei due diversi scenari, i dosaggi di materiali ausiliari ed i materiali/consumi evitati sono riportati in Tabella 62. Infine, nello scenario **SR2\_RS** è stato assunto un valore del rapporto di sostituzione tra eco-base e CB a caldo vergine pari a 1:0,8 in peso; in questo caso, poiché aumenta il quantitativo di prodotto evitato (CB a caldo), si ha un maggior risparmio di materie prime ed energia rispetto agli scenari precedenti, come mostrato in Tabella 62.

**Tabella 61.** Sintesi dei dati di inventario per i diversi scenari alternativi del riciclo a caldo con produzione di CB (20% RAP sul totale inerti) al variare del risparmio di bitume e confronto con lo scenario attuale SR1.

Scenari alternativi	RAP (t)	% RAP	CB a caldo (t)	Materiali aggiuntivi		Materiali evitati	
				ACF (kg)	CB a caldo vergine (t)	Aggregati naturali (kg)	Bitume (kg)
SR1	1	19,1%	5,23	2,0	5,23	965	35,0
SR1min	1	19,1%	5,24	2,0	5,24	980	20,0
SR1max	1	19,2%	5,21	2,0	5,21	956	50,0

**Tabella 62.** Sintesi dei dati di inventario per i diversi scenari alternativi del riciclo a freddo con produzione di eco-base (80% RAP sul totale inerti), variando il dosaggio di emulsione bituminosa (SR2\_Emin e SR2\_Emax) e il rapporto di sostituzione SR2\_RS (1:0,8) a confronto con lo scenario attuale SR2.

Scenari alternativi	RAP (t)	% RAP	Eco-base (t)	Materiali aggiuntivi			Materiali evitati			Consumi evitati	
				Emulsione (kg)	Cemento (kg)	Acqua (kg)	CB a caldo (t)	Aggregati naturali (kg)	Bitume (kg)	Elettricità (kWh/t)	Gas naturale (m <sup>3</sup> /t)
SR2	1	72,0%	1,39	48,6	27,8	62,5	0,926	630	46,3	4,38	7,42
SR2_Emin	1	72,4%	1,38	41,4	27,6	62,2	0,921	625	46,0	4,35	7,38
SR2_Emax	1	71,6%	1,40	55,2	27,6	62,2	0,931	628	46,0	4,40	7,46
SR2_RS	1	72,0%	1,39	48,6	27,8	62,5	1,11	806	55,6	5,99	8,90

**Analisi delle tecnologie per il confezionamento di conglomerati bituminosi.** Nello scenario SR3 è stato valutato il riciclo a freddo con produzione di misti cementati ad alta duttilità (MCAD) quale soluzione tecnologica alternativa a quelle attualmente in uso in regione. Si è assunto che nel MCAD l'impiego del fresato sia pari al 50% in peso (rispetto agli inerti totali) ed il restante è aggregato naturale; tuttavia, questa indicazione fornita dall'unico impianto presente in regione (impianto 1C di LO, in Tabella 38) è di massima, in quanto l'attività sperimentale è ancora in corso. Nella Tabella 63 sono mostrati i dosaggi tipici dei materiali impiegati rispettivamente nelle miscele MCAD e nei misti cementati tradizionali presi a riferimento per la costruzione dello scenario SR3. Per i misti cementati preparati con solo inerti vergini sono stati presi a riferimento i valori suggeriti dal Capitolato Speciale di Appalto di ANAS 2016 (CSA-ANAS) per questo tipo di fondazioni/sottobasi mentre i valori delle miscele MCAD sono stati forniti dall'impianto di Lodi (vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2).

**Tabella 63.** Composizioni percentuali delle miscele di MCAD e misto cementato vergine, espresse rispetto ad 1 tonnellata di miscela finale, fornite dall'impianto di Lodi e dal Capitolato Speciale di Appalto di ANAS.

Materiali impiegati	Misti Alta Duttilità MCAD	Misti Cementati (vergini) CSA -ANAS
Inerti totali	87% - 90%	88% - 92%
<i>di cui:</i>		
<i>fresato</i>	50%	0%
<i>inerti vergini</i>	50%	100%
Emulsione Bituminosa	2% - 3%	0%
Cemento	3%	3% - 5%
Acqua	5% - 7%*	5% - 7%

Nel caso di riciclo a freddo finalizzato alla produzione di MCAD, si ipotizza che il prodotto evitato sia uno strato di stesse dimensioni in misto cementato tradizionale composto per il 92% da inerti vergini, per il 3% da cemento e 5% da acqua (Tabella 64). Nel MCAD si ipotizza che il fresato sia dosato al 50% rispetto agli inerti totali e che vengano aggiunti l'emulsione bituminosa (3%), il cemento Portland (2%) e l'acqua deionizzata (5%). Pertanto, il rapporto di sostituzione tra il MCAD ed il misto cementato vergine è assunto pari al rapporto tra la percentuale in peso di inerti totali usate nelle due miscele (i.e. 90% nei MCAD e 92% nei misti cementati) ed è pari a 1 : 0,98.

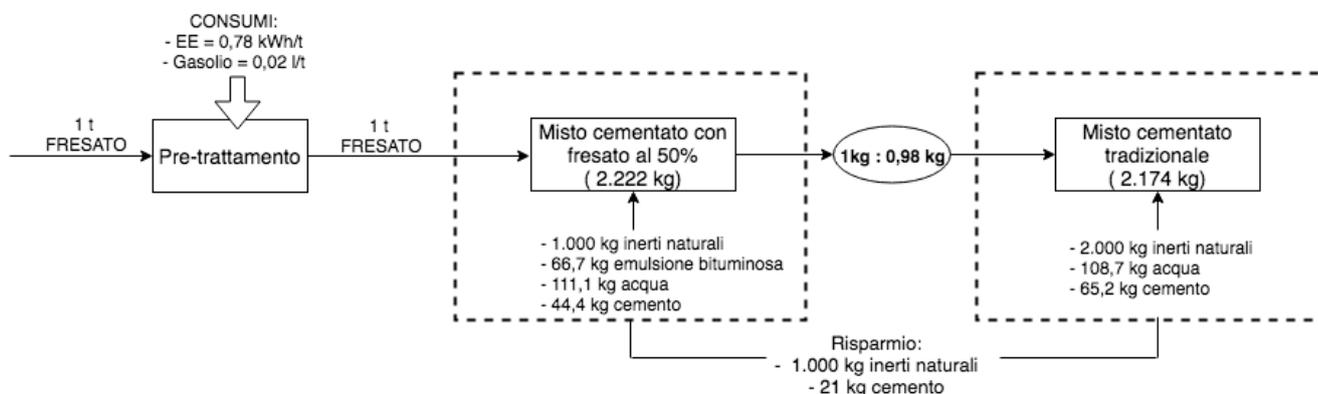
**Tabella 64.** Valori di riferimento per la composizione di MCAD con 50% di fresato (RAP) e di misto cementato tradizionale costituito da soli materiali vergini.

Materiali	Prodotto finito	Prodotto evitato
	MCAD con 50%RAP	Misto cementato vergine
Inerti naturali (%)	45,0%	92,0%
RAP (%)	45,0%	-
Emulsione (%)	3,0%	-
Cemento (%)	2,0%	3,0%
Acqua (%)	5,0%	5,0%

**Tabella 65.** Sintesi dei dati di inventario per 1 tonnellata di fresato in ingresso agli impianti di riciclo a freddo con produzione di misti cementati ad alta duttilità (MCAD), con indicazione del quantitativo di prodotto finito e delle percentuali di fresato utilizzato nella miscela finale, dei dosaggi di materiali aggiuntivi richiesti, della tipologia e quantità di prodotti evitati e delle materie prime risparmiate.

Impianto di destino	% RAP (sulla miscela)	Quantità prodotto finito (t)	Tipologia prodotto finito	Prodotto evitato (t)	Risparmio aggregati naturali (kg)	Risparmio bitume (kg)	Risparmio cemento (kg)	Materiali aggiuntivi (kg)
Riciclo a freddo (MCAD)	45,0%	2,22	MCAD 50% RAP	2,17 t misto cementato	1000	-	20,8	Emulsione: 66,7

Prendendo a riferimento 1 tonnellata di fresato che viene dosato al 50% rispetto agli inerti (corrispondente al 45% della miscela finale, Tabella 65), si producono 2,22 t di MCAD che sostituiscono 2,17 t di misto cementato tradizionale (sostituzione 1:0,98 in peso). Assumendo i dosaggi riportati in Tabella 64, per il confezionamento di MCAD vengono aggiunti 1000 kg di inerti naturali, 66,7 kg di emulsione bituminosa, 111 kg di acqua e 44,4 kg di cemento mentre il prodotto evitato, ovvero il misto cementato tradizionale, richiede 2000 kg di inerti vergini e 65,2 kg di cemento. Al netto, quindi, l'utilizzo di 1 tonnellata di fresato in MCAD consente di risparmiare 1 tonnellata di aggregati naturali ed evita la produzione di circa 21 kg di cemento, come mostrato in Figura 20.



**Figura 20.** Schema del riciclo a freddo di 1 tonnellata di fresato per la produzione di misti cementati ad alta duttilità (%RAP=50% inerti), inclusivo dei prodotti evitati.

La distanza dell'evitato trasporto di aggregati vergini è pari a 40 km come assunto nello scenario attuale. Per l'evitato trasporto del cemento sono stati presi in considerazione i cementifici della regione e la loro distanza rispetto all'impianto di Lodi (vedi paragrafo 2.2.1 dell'Allegato 2), l'unico che implementa il riciclo a freddo con produzione di misti cementati ad alta duttilità; la distanza media di approvvigionamento del cemento è risultata pari a 109 km come mostrato in Tabella 66. La distanza per la fornitura di emulsione bituminosa all'impianto è invece pari a 56,4 km (Tabella 54).

**Tabella 66.** Distanze stradali tra l'impianto di riciclo a freddo di Lodi e i cementifici della regione Lombardia e valore medio di trasporto del cemento.

Impianto di MCAD	Cementifici in regione Lombardia					Distanza media (km)
	Caravate (VA)	Ternate (VA)	Calusco D'Adda (BG)	Rezzato (BS)	Tavernola Bergamasca (BG)	
LO	137	123	89	102	95	<b>109</b>

La sintesi dei dati di inventario e dei processi utilizzati in SimaPro per la modellizzazione dello scenario SR3 è mostrata in Tabella 67.

**Analisi dei trasporti.** È stata modificata la distanza media di conferimento del fresato agli impianti di riciclo, assumendo nello scenario **ST1\_min** il valore minimo di 30 km, indicato da alcuni gestori degli impianti, e nello scenario **ST1\_max** la distanza massima calcolata dai MUD e pari a 50 km. Altre analisi sono state condotte variando la distanza di approvvigionamento del bitume vergine, assunta pari a 185 km nello scenario **ST2\_min** e 240 km nello scenario **ST2\_max**, e quella del cemento, riducendola a 60 km nello scenario **ST3\_min** e aumentandola a 100 km nello scenario **ST 3\_max**, rispetto al valore di 80 km assunto nello scenario attuale. Infine, nello scenario **ST4**, è stata variata la distanza di approvvigionamento degli additivi chimici (emulsione bituminosa e ACF), assunta pari a 48 km nello scenario attuale, riducendola a 30 km nello scenario **ST4\_min** e aumentandola fino a 70 km nello scenario **ST4\_max**.

**Tabella 67.** Processi del database ecoinvent 3.3 e processi costruiti ad hoc utilizzati per modellizzare il recupero di una tonnellata di fresato a freddo per la produzione di misti cementati ad alta duttilità (MCAD) con 50% RAP nello scenario SR3. Con segno (+) i processi indotti dal riciclo e con segno (–) i processi evitati.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SR3
Riciclo a freddo	Produzione M	<i>ad hoc</i>		1 t
	+   Emulsione bituminosa	ecoinvent 3.3	<i>Bitumen adhesive compound, cold {RER}   production</i>	66,7 kg
	+   Trasporto emulsione	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	0,0667 t * 56,4 km
	-   Inerte vergine evitato	<i>ad hoc</i>	Produzione aggregati naturali in Lombardia (Tabella 60)	1 t
	-   Cemento evitato	ecoinvent 3.3	<i>Cement, Portland {Europe without Switzerland}   production</i>	20,8 kg
	-   Evitato trasporto cemento	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt; 32 ton, EURO5 {RER}</i>	0,0208 t * 109 km

**Tabella 68.** Sintesi degli scenari alternativi analizzati nell’LCA2.

Scenario	Assunzioni	Valore	Valore scenario attuale
<b>SR1</b>	Recupero a caldo → variazione bitume vergine risparmiato		
	SR1 <sub>min</sub>	20 kg	35 kg
	SR1 <sub>max</sub>	50 kg	
<b>SR2</b>	Recupero a freddo → variazione % emulsione bit. nella miscela		
	SR2_E <sub>min</sub>	3%	3,5%
	SR2_E <sub>max</sub>	4%	
<b>SR2</b>	Recupero a freddo → variazione rapporto di sostituzione		
	SR2_RS	RS=0,8	RS=0,67
<b>SR3</b>	Recupero a freddo del fresato per produzione MCAD	1 t	-
<b>ST1</b>	Variatione distanza di conferimento del fresato		
	ST1 <sub>min</sub>	30 km	46 km
	ST1 <sub>max</sub>	50 km	
<b>ST2</b>	Variatione distanza di approvvigionamento del bitume vergine		
	ST2 <sub>min</sub>	185 km	210 km
	ST2 <sub>max</sub>	240 km	
<b>ST3</b>	Variatione distanza di approvvigionamento cemento		
	ST3 <sub>mn</sub>	60 km	79 km
	ST3 <sub>max</sub>	100 km	
<b>ST4</b>	Variatione distanza di approvvigionamento ACF ed emulsione bit.		
	ST4 <sub>min</sub>	30 km	48 km
	ST4 <sub>max</sub>	70 km	

## 2.5 Impostazione ed inventario dell’LCA3 (rifiuti a base di gesso)

### 2.5.1 Premessa

L’analisi LCA3 si focalizza sul recupero dedicato dei rifiuti non pericolosi a base di gesso, finalizzato all’ottenimento di gesso riciclato come materia prima secondaria. Si è assunto che questi rifiuti siano costituiti essenzialmente da pannelli in cartongesso *post-consumo*, 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. Tale ipotesi trova conferma nell’analisi condotta riguardo la produzione ed il consumo dei prodotti edili a base di gesso in Italia ed Europa basata sui dati Eurostat 2014; i risultati delle elaborazioni hanno evidenziato che oltre il 97% dei prodotti in gesso in Italia è rappresentato dai pannelli in cartongesso (individuati dal codice PRODCOM 23621050), e in minima parte da altri materiali edili in gesso, quali i blocchi di gesso, gli intonaci per soffitti, gli intonaci decorativi e gli stampi (individuati dal codice PRODCOM 23621090). Dunque si può supporre che anche i rifiuti a base di gesso siano costituiti essenzialmente da cartongesso, motivo per il quale l’analisi LCA3 è focalizzata sulle tecnologie di trattamento e recupero dei pannelli in cartongesso.

Nonostante i quantitativi dei rifiuti in gesso prodotti siano contenuti se confrontati con altre frazioni, come ad esempio i rifiuti C&D misti 170904 (cfr paragrafo 1.1), negli ultimi anni si è riscontrata una crescente attenzione verso il riciclo dei rifiuti a base di gesso ed il riutilizzo del gesso riciclato, in virtù di tre ragioni principali:

- 1) sono rifiuti facilmente recuperabili e il gesso riciclato ottenuto a valle del trattamento può essere reimpiegato in una vasta gamma di applicazioni, in sostituzione parziale o totale del gesso naturale, permettendo così di chiudere il cerchio della risorsa naturale;
- 2) lo smaltimento in discarica dei rifiuti a base di gesso comporta problematiche notevoli per la salute dell’uomo e dell’ambiente, legate alle potenziali emissioni di gas serra come metano (CH<sub>4</sub>) e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), dovute alla degradazione anaerobica della componente cellulosa che compone il cartongesso, e soprattutto di idrogeno solforato (H<sub>2</sub>S). Le alte concentrazioni di H<sub>2</sub>S in discariche con rifiuti C&D sono attribuite proprio alla presenza di rifiuti in cartongesso; infatti, quando questo rifiuto è smaltito insieme a rifiuti organici biodegradabili, i solfati reagiscono con le altre sostanze con cui vengono a contatto e si forma questo gas pericoloso e infiammabile, con effetti negativi sulla salute e sull’ambiente e con problemi di odori anche in piccole concentrazioni (Rivero et al., 2016).

Per questo, la recente direttiva europea 2003/33/CE del Consiglio obbliga gli Stati Membri a smaltire tali rifiuti in “lotti separati” o in “discariche mono-cella” di modo da limitare tali emissioni. Ciò assicura che i rifiuti siano fisicamente separati dagli altri, in particolare dai rifiuti biodegradabili. Tuttavia, in Europa, come evidenziato da Jiménez –Rivero e García – Navarro (2016), sono pochi i Paesi che,

attualmente, hanno implementato tale direttiva o hanno vietato lo smaltimento in discarica di questi rifiuti;

- 3) la creazione di nuovi canali di utilizzo e il potenziamento della domanda di gesso riciclato consentirebbe anche di evitare il ricorso ad una pratica, piuttosto diffusa attualmente in Italia e in alcuni Paesi europei (es. Spagna), di miscelare i rifiuti da costruzione a base di gesso con gli altri flussi C&D inerti negli impianti di riciclo; questo infatti riduce la qualità degli aggregati riciclati prodotti e ne peggiora le caratteristiche ambientali e prestazionali (Silva et al., 2014; Barbudo et al., 2012). Le principali problematiche sono legate a due aspetti: il gesso è un materiale friabile con basse caratteristiche meccaniche e la sua presenza all'interno dell'aggregato riciclato ne riduce la resistenza a compressione. Inoltre, se in contatto con l'acqua può indurre anche problemi di rigonfiamento dello strato. In secondo luogo, essendo il solfato il principale costituente chimico del gesso, la presenza di cartongesso negli aggregati riciclati comporta una maggiore lisciviazione dei solfati e un possibile superamento del limite previsto per il test di cessione, col rischio di ottenere a valle del trattamento aggregati riciclati non conformi alle normative di settore (DM 5 febbraio 1998 e s.m.i; Circolare Ministeriale 5205/2005.). La situazione rischierebbe di diventare critica se i quantitativi dei rifiuti di gesso aumentassero, come atteso, in quanto potrebbero ottenersi aggregati riciclati non più conformi ai limiti previsti per il loro impiego nel settore delle costruzioni stradali (cfr. Allegato 3).

La polvere di gesso ottenuta dal trattamento di recupero può essere reintrodotta nel processo produttivo di nuovi pannelli in cartongesso in sostituzione del gesso naturale (ovvero “closed-loop recycling”) oppure utilizzata in altre applicazioni diverse dal settore edilizio (“open-loop recycling”). Gli ambiti di utilizzo del gesso riciclato analizzati nell'analisi LCA3 comprendono: il settore edilizio, per la produzione di nuovi pannelli in cartongesso, l'industria cementiera dove il gesso è addizionato al clinker per regolare la presa del cemento, il trattamento dei fanghi da depurazione dove il gesso è impiegato come additivo per la produzione di gessi da defecazione e il settore agricolo, in cui il gesso è utilizzato come correttivo per regolare il pH dei terreni. Per ciascuno di questi ambiti di impiego sono state valutate sia le caratteristiche qualitative del gesso riciclato, in confronto con quelle della materia prima evitata, sia la potenziale domanda di gesso riciclato in regione, come verrà mostrato nei paragrafi 2.5.4.1, 2.5.4.2, 2.5.4.3 e 2.5.4.4. Si specifica che, per i primi tre ambiti di impiego, la risorsa primaria sostituita è il gesso naturale mentre nel caso di utilizzo del gesso riciclato in agricoltura si evita la produzione di correttivi a base di calce (CaO) oppure di carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>).

## **2.5.2 Confini del sistema e unità funzionale**

Attualmente, in regione, risulta un solo impianto in grado di effettuare un trattamento di recupero *ad hoc* per i rifiuti a base di gesso; nel 2014, tale impianto ha ricevuto 97 tonnellate di rifiuti, corrispondenti allo 0,5%

dei rifiuti totali gestiti. Queste 97 tonnellate rappresentano il flusso rispetto al quale sono stati calcolati gli impatti complessivi del sistema LCA3.

L'unità funzionale adottata per l'analisi LCA3 è rappresentata da una tonnellata di rifiuti in cartongesso prodotti in regione e inviati a riciclo nell'impianto dedicato dove, attraverso step successivi di macinazione e vagliatura viene separata la polvere di gesso dal rivestimento in carta/cartone del pannello. Per raccogliere i dati primari relativi all'efficienza di separazione e ai consumi energetici indotti dal trattamento di riciclo è stato effettuato un sopralluogo tecnico presso l'unico impianto operativo in regione (Allegato 2.3); in questa occasione sono state raccolte informazioni anche in relazione alla qualità e al destino di tutti i flussi uscenti dall'impianto (gesso riciclato, rifiuti in carta, rifiuti metallici).

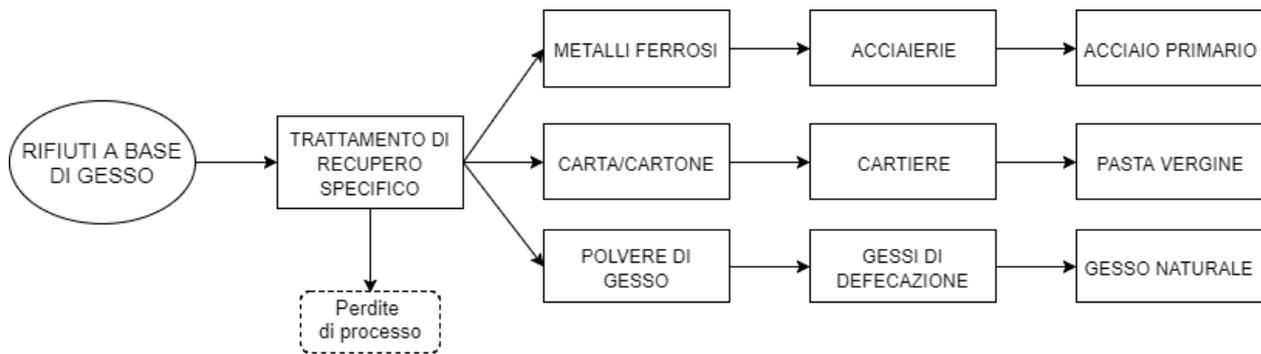
I dati e le informazioni ricavate hanno permesso di definire il sistema di riferimento per lo scenario attuale LCA3 che si basa sulle seguenti assunzioni:

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

Per risolvere il problema della multifunzionalità associata alle operazioni di riciclo, i confini del sistema sono stati espansi e sono stati inclusi anche gli impatti evitati per la produzione dei prodotti primari, sostituiti dall'impiego delle materie prime secondarie (Figura 21).

I processi compresi nel sistema sono quindi i seguenti:

- recupero di materia negli impianti di riciclo, che comprende sia i consumi associati al trattamento sia le quantità di gesso riciclato prodotto e il relativo destino di impiego.
- la separazione della frazione cellulosica e dei metalli ferrosi, entrambi inviati a recupero nelle rispettive filiere;
- la produzione evitata di gesso naturale grazie all'utilizzo del gesso riciclato nella produzione dei gessi di defecazione;
- la produzione evitata di pasta vergine e di acciaio primario;
- il trasporto per il conferimento dei rifiuti dai cantieri all'impianto di recupero
- i trasporti di commercializzazione del gesso naturale e riciclato all'impianto di trattamento dei fanghi con produzione di gessi di defecazione.



**Figura 21.** Racchiuso nel tratteggio in rosso, sistema di riferimento e processi inclusi nell'analisi LCA3.

## 2.5.3 Inventario dello scenario attuale

### 2.5.3.1 Riciclo dei rifiuti a base di gesso

Per effettuare la modellizzazione del processo di riciclo dei rifiuti a base di gesso e quantificare sia gli impatti ambientali indotti dal trattamento sia quelli evitati grazie all'impiego del gesso riciclato, è stata eseguita la raccolta di dati primari mediante visita tecnica presso l'unico impianto che effettua il riciclo dedicato dei rifiuti a base di gesso operativo in regione Lombardia nel 2014. L'impianto di riciclo visitato è un impianto fisso, alimentato ad energia elettrica, in provincia di Lodi autorizzato per il trattamento in fase sperimentale nel periodo 2014-2015; al termine della sperimentazione è previsto il successivo spostamento dell'impianto presso il sito di Cava di Grumello Cremonese (CR) dove sarà operativo come impianto innovativo. Durante la fase sperimentale sono state testate diverse tipologie di rifiuti a base di gesso e le prove hanno dimostrato che il trattamento risulta particolarmente efficace per i rifiuti in cartongesso.

Il lay-out riassuntivo del trattamento svolto nell'impianto, mostrato in Figura 22, comprende:

- l'alimentazione, mediante pala meccanica, dei rifiuti alla tramoggia di carico
- una prima fase di frantumazione con mulino a coltelli a bassa velocità che separa, per implosione, la polvere di gesso dal rivestimento in carta;
- una seconda frantumazione con mulino a rulli;
- un primo vaglio vibrante, con scarico della frazione fine di gesso;
- una terza frantumazione con mulino a rulli;
- un secondo vaglio rotante che separa la polvere di gesso dai residui di cartone.

I grumi di gesso più grossolani che vengono trattenuti dall'ultimo vaglio sono riciclati in testa al terzo frantumatore. Dal trattamento si ottiene polvere di gesso con una distribuzione granulometrica compresa principalmente nell'intervallo che va da 8 mm alle dimensioni del filler (0,063 mm). Prima dello scarico finale si può inserire un'ulteriore unità di vagliatura nel caso di specifiche richieste di mercato.

Sulla base dei dati registrati durante le due campagne sperimentali (vedi Allegato 2 paragrafo 2.3), è stato determinato il bilancio di massa complessivo per l'impianto di riciclo in esame (Figura 22), che risulta il seguente:

- l'83,9% è la materia prima secondaria, gesso in polvere;
- il 15,2% sono i rifiuti cellulosici derivanti dalla separazione del cartone;
- lo 0,02% sono i metalli ferrosi provenienti dalla separazione manuale iniziale e dalla separazione magnetica effettuate sul rifiuto in ingresso;
- lo 0,88% sono le perdite di processo, dovute ad esempio alla polvere aspirata e trattenuta nei filtri,

oppure a quella depositata sui macchinari o alle variazioni del contenuto di umidità dei rifiuti.

La qualifica della polvere di gesso come materia prima seconda avviene in seguito alle analisi chimiche volte a verificare la rispondenza ai requisiti stabiliti dalle seguenti norme:

- ISO 1587/1975: *Gypsum rock for the manufacture of binders specifications*. Si precisa che attualmente la norma è stata ritirata, senza essere stata sostituita, ma vengono considerate valide le specifiche in essa contenute data l'assenza di criteri di qualità specifici per il gesso riciclato. I 7 lotti analizzati durante le campagne sperimentali sono risultati tutti conformi ai criteri stabiliti da tale norma;
- Allegato 3, punto 2.1, Decreto Legislativo n° 75 del 29 aprile 2010, recante i requisiti del gesso agricolo; le analisi hanno dimostrato che 5 lotti su 7 sono idonei all'uso del gesso riciclato come correttivo per i terreni. Per i due lotti non conformi, il parametro fuori norma è rappresentato dal contenuto di SO<sub>3</sub>, che appare di poco inferiore al valore minimo del 35% su sostanza secca stabilito dalla normativa, mentre risultano sempre rispettati i limiti di concentrazione previsti per i metalli pesanti.

Nella Tabella 69 vengono riportate le caratteristiche medie del gesso riciclato in uscita dal trattamento di recupero, ottenute dalle analisi condotte sui sette lotti testati durante le campagne sperimentali e fornite dal gestore dell'impianto.

**Tabella 69.** Granulometria e principali parametri del gesso riciclato in uscita dall'impianto di riciclo in regione; valori medi delle analisi chimico-fisiche condotte sui sette lotti e relative deviazioni standard.

<i>Parametro</i>	<i>U.M.</i>	Valore medio	Dev.st.
Granulometria	mm	< 20 mm	-
CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O	% ss	79,5	5,9
Acqua libera (umidità 40°C)	%	0,49	0,54
Ossido di calcio(CaO)	% ss	36,7	4,9
Zolfo (come SO <sub>3</sub> )	% ss	37,0	2,7
pH	-	8,0	0,4
<i>Metalli pesanti</i>	<i>U.M.</i>	Valore medio	Dev.st.
Piombo	mg/kg ss	3,8	3,9
Cadmio	mg/kg ss	<0,2	-
Nichel	mg/kg ss	4,8	2,0
Zinco	mg/kg ss.	29,3	16,6
Rame	mg/kg ss	7,1	4,1
Mercurio	mg/kg ss	0,52	0,06
Cromo esavalente	mg/kg ss	<0,2	-

Come si può osservare dalla Tabella 69, le caratteristiche qualitative del gesso riciclato risultano stabili, con deviazioni standard dei valori piuttosto contenute; la maggiore variabilità appare associata al contenuto di umidità che risulta pari allo 0,49% con una deviazione standard dello 0,54%, dovuta alla registrazione di un valore anomalo durante le campagne (1,8% di acqua libera nel lotto di analisi n.5). La purezza media del gesso riciclato, in termini di titolo medio di gesso biidrato  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , si attesta intorno all'80%, il pH è intorno alle 8 unità e l'analisi granulometrica evidenzia che il 100% della polvere di gesso ha dimensione inferiore a 20 mm. Questi valori, insieme ai dati di consumo specifico mostrati in Tabella 70, sono stati utilizzati come dati di input al processo di riciclo sia per lo scenario attuale di gestione, sia per quelli alternativi che per lo scenario migliorativo proposto; in particolare, i valori dei parametri (granulometria,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , acqua libera, ossido di calcio, zolfo e pH) e dei metalli pesanti sono stati presi a riferimento per valutare se l'utilizzo del gesso riciclato nei vari ambiti di impiego è tecnicamente possibile e in che misura può sostituire la risorsa primaria in virtù delle caratteristiche riscontrate per il gesso riciclato (cfr. paragrafi 2.5.4.1, 2.5.4.2, 2.5.4.3 e 2.5.4.4).

I dati relativi ai consumi di energia elettrica e di gasolio dovuti al trattamento di riciclo sono stati ricavati attraverso l'elaborazione del conto economico di massima dell'impianto, fornito dal gestore durante la visita tecnica (Allegato 2 paragrafo 2.3); in Tabella 70 sono riportati i dati specifici espressi per tonnellata di rifiuto sottoposto a trattamento, ottenuti dividendo i consumi annui totali per la potenzialità dell'impianto che è pari a 14.080 tonnellate/anno.

**Tabella 70.** Consumi specifici dell'impianto di recupero in regione per tonnellata di rifiuto trattata.

<b>Consumo di energia elettrica</b>	6,11	kWh/t
<b>Consumo di gasolio</b>	0,44	l/t

### **Flussi in uscita dal trattamento e relativi destini**

Il gesso riciclato è stato interamente destinato ad un impianto di trattamento dei fanghi da depurazione con produzione dei gessi di defecazione, situato in provincia di Pavia, dove viene aggiunto come additivo, in sostituzione del gesso naturale, per stabilizzare ed igienizzare i fanghi e produrre contestualmente un fertilizzante da utilizzare in agricoltura. Per valutare i dosaggi, i requisiti richiesti e gli eventuali limiti tecnici dell'utilizzo del gesso riciclato in questa applicazione, è stato contattato direttamente l'impianto di Pavia che ha fornito le percentuali dei componenti della miscela da cui si ottengono i gessi di defecazione; i dosaggi impiegati, mostrati in Tabella 71, sono stati presi a riferimento per la modellizzazione della risorsa primaria evitata nello scenario attuale.

**Tabella 71.** Componenti della miscela per produrre una tonnellata di gessi di defecazione, forniti dall'impianto di PV.

Componenti della miscela	Dosaggio	U.M.
Gesso riciclato	0,15	t <sub>gesso</sub> /t
CaO	0,02	t <sub>calce</sub> /t
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,015	t <sub>acido</sub> /t
Fango da depurazione	0,815	t <sub>fango</sub> /t

Le analisi chimico-fisiche condotte dall'impianto di recupero sui flussi in uscita ottenuti dal trattamento hanno riguardato anche la frazione di carta/cartone per verificarne la qualità e l'idoneità per l'impiego nelle cartiere. I valori medi delle risultanze analitiche sono mostrati in Tabella 72; l'umidità dei rifiuti è intorno al 7,2% ( $\pm 0,3\%$ ), il contenuto di carta/cartone è risultato del 98,7% ( $\pm 0,4\%$ ) mentre le altre frazioni estranee, rappresentate da residui di vetro/inerti, appaiono piuttosto contenute e pari all'1,4% ( $\pm 0,5\%$ ). Secondo quanto affermato dal gestore, le caratteristiche dei rifiuti cellulose separati a valle del trattamento sono tali da consentirne il recupero nelle cartiere; pertanto, data anche la purezza del flusso separato (98,7%), è stato ipotizzato di inviare direttamente i rifiuti in carta/cartone alla cartiera più vicina senza che vi sia un trattamento di selezione intermedio.

I rifiuti ferrosi vengono rimossi sia manualmente, prima del carico dei rifiuti nella tramoggia di alimentazione dell'impianto, sia mediante deferrizzatore magnetico; come mostrato in Figura 22, i metalli rappresentano solo lo 0,02% del rifiuto sottoposto a trattamento e vengono destinati a riciclo nelle acciaierie, senza subire alcun ulteriore pretrattamento (selezione, cesoiatura, pressatura).

**Tabella 72.** Valori medi dei principali parametri relativi ai rifiuti in carta/cartone separati durante il trattamento di riciclo e relative deviazioni standard.

Parametro	Valore medio	Dev. St.
Umidità (%)	7,2	0,3
Contenuto carta/cartone (%)	98,7	0,4
Altre frazioni * (%)	1,4	0,5

\*vetro/inerti

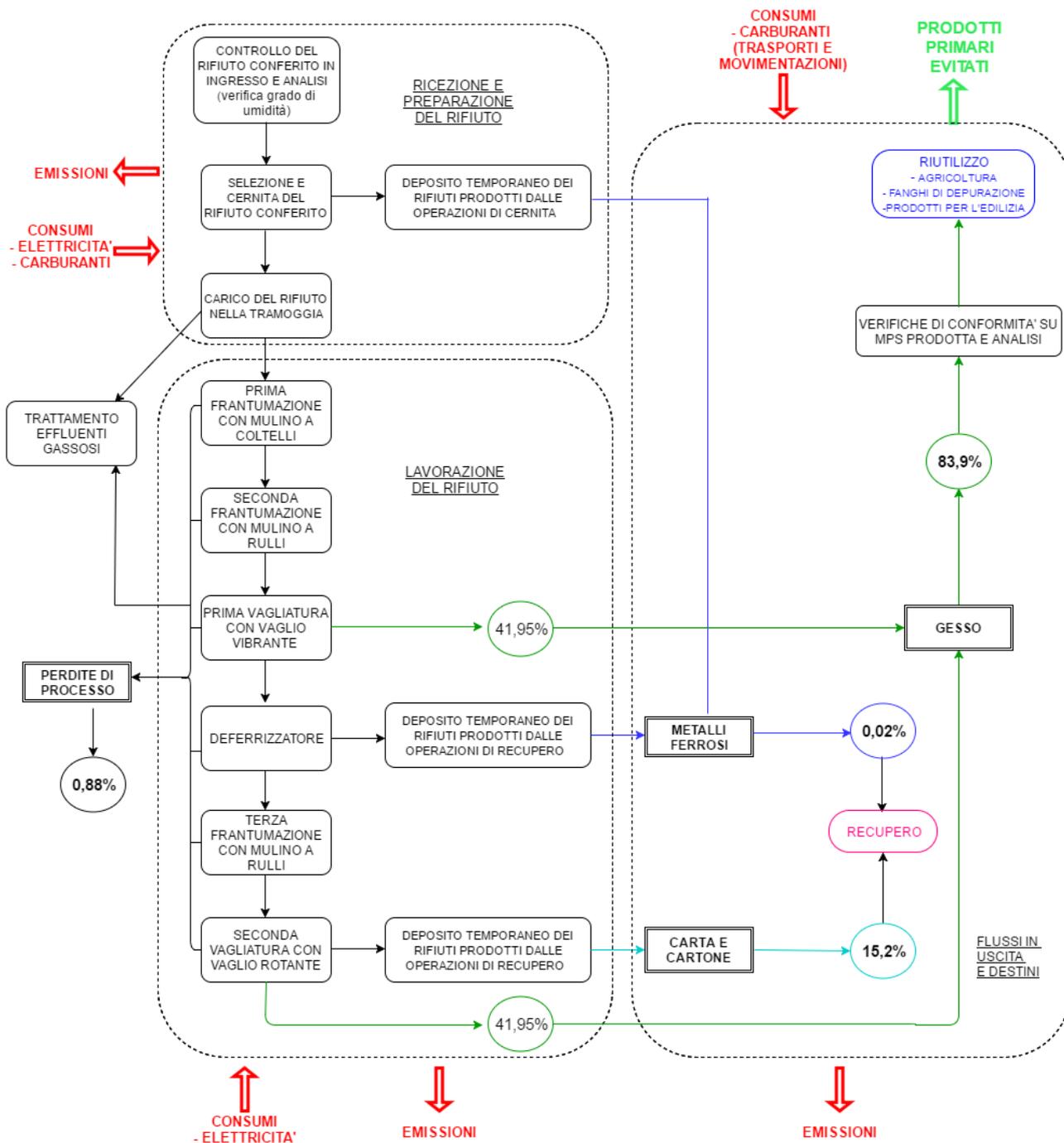


Figura 22. Lay-out dell'impianto di trattamento dedicato dei rifiuti a base di gesso in provincia di Lodi.

### 2.5.3.2 *Prodotti evitati*

Sono stati raccolti i dati primari anche in relazione alla materia prima vergine evitata grazie all'utilizzo del gesso riciclato; nello scenario attuale, in cui il gesso riciclato viene impiegato nel trattamento dei fanghi da depurazione per la produzione dei gessi di defecazione, la risorsa risparmiata è il gesso naturale. Al fine di quantificare gli impatti evitati, è stata caratterizzata l'attività di estrazione e lavorazione del gesso naturale in regione Lombardia, mediante sopralluoghi tecnici effettuati presso siti estrattivi, così da poter tener conto delle specifiche caratteristiche geologiche del contesto territoriale di riferimento.

Inoltre, poiché dal trattamento di riciclo dei rifiuti in cartongesso si recuperano anche carta e metalli ferrosi, di seguito viene spiegata la metodologia di calcolo adottata per modellizzare i processi di riciclo di questi due flussi.

#### **Il gesso naturale: estrazione e lavorazione in regione Lombardia**

Nei giacimenti naturali il gesso si trova principalmente nella forma bi-idrata oppure di anidrite a seconda delle caratteristiche del giacimento, da cui dipende anche il grado di purezza del gesso. Il processo di produzione del gesso naturale prevede una fase di estrazione, che può avvenire in sotterraneo o per sbancamento in cave a cielo aperto, e una successiva fase di lavorazione in un impianto dedicato posto nelle vicinanze del sito. Nell'impianto di lavorazione il gesso viene sottoposto ad una o più fasi di frantumazione e macinazione per rendere più agevole il passaggio ai forni e più efficace la fase di "cottura", che può avvenire per via secca o umida, a differenti temperature a seconda dei prodotti finali che si vogliono ottenere (*emiidrato  $\beta$* , l'anidrite solubile o *anidrite  $\alpha$*  e l'anidrite insolubile o *anidrite  $\beta$* ).

Per reperire i dati sito-specifici del gesso naturale, è stato innanzitutto consultato il sito del Catasto regionale delle cave attive in Lombardia, in cui sono presenti tutti i dati identificativi delle cave; da tale fase è emersa l'esistenza di un'unica cava di gesso naturale attualmente in esercizio in regione, situata in provincia di Bergamo e avente le caratteristiche mostrate in Tabella 73.

**Tabella 73.** Dati relativi alla cava di gesso attualmente attiva in Lombardia, situata in provincia di Bergamo.

Provincia	Settore	Materiale estratto	Tipo cava	Inizio	Vincoli	Tipo di recupero previsto
BG	Calcarei e dolomite	Gesso	A cielo aperto	Dal 1982	Idrogeologico, paesaggistico, ambientale	Insediativo, naturalistico

È stato quindi effettuato un sopralluogo presso il sito per reperire i dati primari necessari alla fase di modellizzazione del processo estrattivo del gesso naturale all'interno del software di LCA.

Come affermato dal gestore della cava, si tratta di un giacimento molto puro e quindi gli scarti di estrazione, rappresentati da materiali non utilizzabili (come marne o argille), sono minimi; pertanto, si è assunto che da 1 tonnellata di materiale estratto dalla cava si ottiene 1 tonnellata di gesso naturale. Il gesso nel giacimento si trova nelle due forme di gesso biidrato e anidrite (quest'ultima in minori percentuali) e viene estratto mediante l'uso di una macchina escavatrice a martello, che rompe direttamente la parete del fronte di escavazione; i blocchi di grandi dimensioni vengono frantumati nella cava stessa in modo da agevolare il caricamento dei camion, che avviene mediante pale meccaniche, ed il successivo trasporto all'impianto di lavorazione. Nella cava in esame vengono estratte circa 300 t/giorno di materiale, di cui circa 10 t/giorno sono inviate direttamente ai cementifici in regione (corrispondenti al gesso meno puro e contenente tenori maggiori di argille e marne). La parte restante della materia prima estratta (290 t/giorno) viene lavorata nel sito produttivo in provincia di Brescia, situato a circa 8 km dal sito estrattivo, dove viene macinata e cotta per la produzione di diversi intonaci e prodotti a base di gesso.

Il gestore della cava ha fornito il consumo orario dell'escavatore a martello (15 l/h) e il suo numero di ore di funzionamento (3 h/d), da cui si è determinato il consumo specifico del macchinario, risultato pari a 0,15 l/t. Per la pala meccanica, invece, non sono stati forniti i dati dei consumi di gasolio; pertanto, sono state utilizzate le schede tecniche delle macchine impiegate nel sito per calcolare il consumo medio della pala meccanica, che è risultato pari a 0,19 l/t.

Tali consumi, riportati in Tabella 74, sono stati convertiti in MJ/t, assumendo una densità del gasolio di 0,8 kg/l e un potere calorifico inferiore (PCI) pari a 42,7 MJ/kg e sono stati assunti per la modellizzazione della fase di estrazione del gesso naturale in regione. I consumi specifici degli escavatori e della pala meccanica sono stati simulati su SimaPro 8.3 usando il processo di ecoinvent 3.3 "*diesel, burned in building machine (GLO) market for*".

**Tabella 74.** Consumi specifici associati all'estrazione di 1 tonnellata di gesso naturale in regione.

<b>Consumi specifici - Estrazione gesso</b>	<b>l/t</b>	<b>MJ/t</b>
Escavatore a martello	0,15	5,12
Pala meccanica	0,19	6,49

È stato effettuato anche il sopralluogo presso l'impianto di lavorazione in provincia di Brescia, per poter comprendere a quali trattamenti viene sottoposto il gesso naturale e quali sono i consumi associati.

Il gesso estratto dalla cava è scaricato dai camion e sottoposto ad una prima macinazione in un frantoio a ginocchiera, dove viene ridotto in blocchi grossolani delle dimensioni di circa 10 cm. Viene in seguito fatto confluire ad un mulino a martelli, in cui è macinato una seconda volta e ridotto in polvere grossolana (circa 1 cm). La polvere così ottenuta è inviata a due diverse linee di trattamento, a seconda degli ambiti a cui si vuole destinare il materiale prodotto: una parte di gesso biidrato viene macinata molto finemente con mulini micronizzatori senza subire alcuna cottura (i.e. gesso crudo destinato alla produzione di pannelli in cartongesso, ai cementifici o all'agricoltura), mentre la restante parte di gesso viene immessa nel forno di

cottura a metano. Dopo la fase di cottura si effettua una terza macinazione attraverso l'uso di un mulino di raffinazione e una separazione della frazione più fine da quella grossolana attraverso un separatore a pale. Il gesso in uscita dall'ultimo mulino può avere quindi diverse dimensioni: la parte più grossolana è in genere utilizzata per produrre manufatti a base di gesso, mentre il gesso più fine viene usato per la produzione di intonaci o malte.

Per i dettagli riferiti alle diverse fasi della lavorazione si rimanda al paragrafo 2.5 dell'Allegato 2. Si sottolinea che il gestore dell'impianto non ha fornito i dati dei consumi di energia elettrica associati alle diverse fasi di macinazione, né il consumo di metano nel forno necessario per la fase di cottura, né il bilancio di massa complessivo dell'impianto. Per la modellizzazione del processo di lavorazione, quindi, sono stati utilizzati i dati ottenuti dalle schede tecniche dei diversi macchinari (frantumatore primario, mulino a martelli secondario e terziario), prendendo in considerazione la potenza e la portata in alimentazione, da cui poi si è potuto ricavare il consumo specifico di elettricità (kWh/t), riportato in Tabella 75 per i diversi macchinari considerati. Si specifica che, per la modellizzazione del prodotto evitato nello scenario attuale, poiché il settore di utilizzo considerato richiede gesso crudo (per la produzione dei gessi di defecazione), non è stata inclusa la fase di cottura ed i consumi ad essa associati, mentre vengono considerate le fasi di frantumazione primaria e secondaria ed anche la micronizzazione (frantumazione terziaria), in quanto la pezzatura richiesta in questo settore è molto fine (dell'ordine di pochi millimetri).

**Tabella 75.** Consumi specifici associati alla lavorazione di 1 tonnellata di gesso naturale, calcolati dalle schede tecniche dei macchinari considerati.

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

Al contrario, poiché il gesso riciclato ha una granulometria piuttosto fine, compresa prevalentemente nel range 0,063 mm - 8 mm, in quanto è stato sottoposto a più step di macinazione, si ritiene che il gesso riciclato non necessiti di alcuna ulteriore macinazione ma, eventualmente, di sola vagliatura per selezionare la parte passante al setaccio di 6,3 mm da inviare all'impianto di produzione dei gessi di defecazione; nello scenario attuale, quindi, si suppone che il gesso riciclato in uscita dall'impianto di riciclo venga inviato direttamente all'impianto di produzione dei gessi di defecazione, senza subire alcun ulteriore trattamento e dunque i consumi associati al processo di recupero sono quelli mostrati in Tabella 70.

Per quantificare il rapporto di sostituzione nello scenario attuale si è considerato il diverso dosaggio del gesso riciclato rispetto a quello naturale nella miscela usata dall'impianto di produzione dei gessi di defecazione in provincia di Pavia. Come riferito dal gestore tramite colloquio telefonico, quando si utilizza il

gesso riciclato, il dosaggio di gesso richiesto risulta del 15% in peso rispetto a 1 tonnellata di gesso di defecazione prodotto (Tabella 71), mentre nel caso in cui viene impiegato il gesso naturale, il dosaggio medio è leggermente inferiore e pari al 13%-14%, in virtù del minor contenuto di impurità nel gesso naturale rispetto a quello vergine. Assumendo il dosaggio medio del 13,5% per il gesso naturale, il rapporto tra tale dosaggio e quello del gesso riciclato nella miscela finale risulta pari a 0,9. Il valore del rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e naturale assunto nello scenario attuale è quindi di 0,9 con un intervallo di variazione di 0,87 – 0,93 all'interno del quale verrà condotta l'analisi di sensitività.

### **La carta vergine**

Per il riciclo della carta si è assunto che la materia prima sostituita sia la pasta vergine ottenuta da un processo termomeccanico (nel database diecoinvent 3.3 si è usato il processo *thermo-mechanical pulp (GLO) market for*); questo processo è stato scelto per 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 (pari a 0,987, Tabella 72) e di un coefficiente di sostituzione tra pulp secondario e pulp primario (pari a 0,833), ricavato in un precedente studio condotto dal DICA del Politecnico di Milano (GERLA: Rigamonti et al., 2013). Il rapporto di sostituzione finale, ottenuto come prodotto dei due fattori sopra citati, è pari a 0,822; ciò implica che 1 tonnellata di rifiuti in carta/cartone separati negli impianti di riciclo consente di risparmiare 822 kg di pulp primario.

### **L'acciaio primario**

Il riciclo dei metalli è stato simulato attraverso un processo costruito *ad hoc* sulla base di un precedente lavoro condotto dal DICA del Politecnico di Milano per la regione (GERLA: 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 del riciclo dei metalli 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.

### 2.5.3.3 *Analisi dei trasporti*

#### **Distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti**

La modellizzazione dei trasporti per il conferimento dei rifiuti è stata effettuata prendendo in esame, per l'impianto di riciclo esistente in regione, i moduli di trasporto dei soggetti conferitori dei rifiuti in gesso (RT) estratti dalla scheda MUD di gestione dell'impianto in esame. Dai dati MUD si è ricavata la distanza media, ottenuta pesando i quantitativi di rifiuti conferiti da ogni produttore per la relativa distanza percorsa, ed 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 RT dell'impianto di riciclo per determinare in che misura è avvenuto il conferimento di rifiuti con mezzi di grandi dimensioni (>32 tonnellate), medie dimensioni (16-32 tonnellate) e piccole dimensioni (3,5-7,5 tonnellate). Le relative percentuali, espresse rispetto al rifiuto totale conferito all'impianto, sono riportate in Tabella 76.

**Tabella 76.** Percentuali di conferimento dei rifiuti a base di gesso all'impianto di riciclo relative ai mezzi di grande, media e piccola taglia, e distanza media percorsa.

<b>Modalità di conferimento</b>	<b>Distanza (km)</b>
Mezzi di piccola taglia (3,5-7,5t)	7%
Mezzi di media taglia (16-32 t)	37%
Mezzi di grande taglia (>32 t)	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 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 stata ricavato considerando la distanza stradale tra la cava di BG e l'impianto di produzione dei gessi di defecazione di PV, che è risultata pari a 157 km. Si è ipotizzato, in questo caso, che il trasporto per la vendita del gesso naturale 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.

Per il trasporto dei rifiuti in carta, la tipologia dei mezzi impiegati è la stessa e 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 del GERLA (Rigamonti et al., 2013).

#### **Distanza di trasporto del gesso riciclato**

La distanza di trasporto del gesso riciclato è stata ricavata calcolando la percorrenza stradale tra l'impianto di riciclo, assumendo la sua collocazione definitiva in provincia di Cremona, e l'impianto di gessi di defecazione in provincia di Pavia, con cui l'impianto di riciclo ha avuto contatti e accordi commerciali per la vendita della polvere di gesso. La distanza di trasporto del gesso riciclato è risultata, in questo caso, 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.

#### **2.5.3.4 Sintesi dei dati di inventario**

In Tabella 77 e Tabella 80 vengono riassunti i processi implementati nel software SimaPro 8.3 per costruire lo scenario attuale di gestione dell'analisi LCA3 riferito al flusso di rifiuti a base di gesso sottoposti ad un trattamento di recupero dedicato, senza che siano miscelati agli altri rifiuti C&D. I dati sono riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso che entra nel sistema di riciclo regionale.

**Tabella 77.** Processi del database di ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per la modellizzazione dello scenario attuale LCA3 relativo ad una tonnellata di rifiuti a base di gesso in ingresso al sistema di riciclo dedicato in regione

<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Tipo processo</b>	<b>Nome processo</b>	<b>Valore scenario attuale</b>
Conferimento rifiuti	Trasporto all'impianto di riciclo			1 t * 31 km
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	7%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	37%
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	56%
Riciclo gesso (attuale)		<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	15,1 MJ/t
	Consumo elettricità	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	6,1 kWh/t
	Gesso Riciclato			83,9%
	Metalli ferrosi	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero metalli ferrosi (Tabella 80)</i>	0,02%
	Carta/cartone	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero carta (Tabella 79)</i>	15,2%
	Perdite di processo			0,88%
	Prodotto evitato	<i>ad hoc</i>	<i>Gesso naturale (Tabella 78) (destino: produzione di gessi da defecazione)</i>	0,755 <sup>1</sup>
	Trasporto gesso riciclato			81 t*km <sup>(2)</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dall'impianto di riciclo (0,839) e il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e gesso naturale (pari a 0,9 per i gessi di defecazione)

<sup>2</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dall'impianto di riciclo (0,839 t) e la distanza di trasporto all'impianto di riutilizzo del gesso riciclato per produrre gessi di defecazione (97 km)

**Tabella 78.** – Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione della produzione di una tonnellata di gesso naturale in regione, comprensivo del trasporto del suo trasporto all'impianto di produzione di gessi di defecazione (senario attuale).

<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Tipo processo</b>	<b>Nome processo</b>	<b>Valore scenario attuale</b>
Produzione gesso naturale (attuale)		<i>ad hoc</i>		1 t
	Estrazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo gasolio (escavatore)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	5,12 MJ/t
	Consumo gasolio (pala meccanica)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	6,48 MJ/t
	Lavorazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo energia elettrica (frantoio a ginocchiera)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	0,5 kWh/t
	Consumo energia elettrica (mulino a martello secondario)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	1,9 kWh/t
	Consumo energia elettrica (mulino terziario)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	3 kWh/t
	Trasporto gesso naturale			1 t * 157 km
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

**Tabella 79.** Processo costruito per la modellizzazione del riciclo di una tonnellata di rifiuti in carta, separati nell'impianto di recupero dei rifiuti a base di gesso ed inviati alla cartiera più vicina.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Recupero carta (attuale)				1 t
	Pasta vergine evitata	ecoinvent 3.3	<i>thermo-mechanical pulp (GLO) market for</i>	0,822 t <sup>(1)</sup>
	Trasporto alla cartiera			1 t*19 km
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup>calcolato come prodotto tra la purezza della carta separata (98,7%) e il coefficiente di sostituzione ricavato nel precedente lavoro del DICA (83,3%)

**Tabella 80.** Processo costruito ad hoc per la modellizzazione del riciclo di una tonnellata di metalli ferrosi, separati nell'impianto di recupero dei rifiuti a base di gesso e inviati a in acciaieria secondaria.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario attuale
Recupero metalli ferrosi		<i>ad hoc</i>		1 t
	Trasporto Me ferrosi a riciclo	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 50% EURO3 e 50% EURO4 (RER)</i>	1 t*50 km
	Riciclo			
	Produzione acciaio secondario	<i>ad hoc</i>	<i>Steel, electric, un and low allowed, at plant /RER</i>	88,1% <sup>1</sup>
	Acciaio primario evitato	<i>ad hoc</i>	<i>Steel, converter, unalloyed, at plant/RER</i>	881 kg

<sup>1</sup>si assume che i metalli separati dal trattamento di riciclo abbiano 100% di purezza (nessuno scarto di lavorazione), da cui si ottiene 88,1% di acciaio secondario

<sup>2</sup>rapporto di sostituzione tra acciaio secondario e primario pari a 1:1

## 2.5.4 Definizione di scenari alternativi per l'analisi LCA3

Gli scenari alternativi sono stati costruiti considerando diversi ambiti di applicazione del gesso riciclato, ottenuto dal recupero dedicato dei rifiuti in gesso. Nello specifico sono stati valutati quattro diversi scenari di impiego del gesso riciclato:

- **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 (come già avviene 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 (CaCO<sub>3</sub>), essendo questi prodotti più facilmente reperibili in commercio rispetto al gesso naturale e a costi contenuti.

Si ipotizza quindi 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.

Per ciascuno dei quattro campi di applicazione modellizzati negli scenari alternativi, è stata quindi valutata la potenziale richiesta di gesso riciclato, così da capire quale potrebbe essere il rapporto tra domanda e offerta in regione Lombardia per i destini di utilizzo considerati.

Poiché l'obiettivo futuro è quello di raggiungere il 100% di riciclo dedicato dei rifiuti in gesso prodotti in regione, nei diversi scenari alternativi si è deciso 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. Ciò implica la necessità di realizzare almeno due nuovi impianti che effettuano il recupero dedicato dei rifiuti in cartongesso e che, insieme a quello già esistente, siano in grado di "coprire" l'intera produzione dei rifiuti a base di gesso in regione (pari a 31.405 t nel 2014, cfr. paragrafo 1.4). Per i due nuovi impianti è stata assunta la stessa linea di trattamento e lo stesso bilancio di massa che caratterizza l'impianto presente in regione, mostrato in Figura 22 e preso come riferimento; anche i quantitativi e i destini dei rifiuti in carta e dei metalli separati sono stati considerati gli stessi.

Al fine di valutare come variano i trasporti, sia per il conferimento dei rifiuti ai tre impianti di riciclo, sia per la commercializzazione del gesso riciclato e dei prodotti evitati, è stato necessario stabilire dove localizzare i nuovi impianti di riciclo, oltre a quello già esistente che si ipotizza posizionato nella sede definitiva in provincia di Cremona. Per localizzare i due nuovi impianti, sono state considerate le quantità di rifiuti in gesso prodotte nelle singole province nel 2014 (da elaborazioni MUD) e si è calcolato il peso percentuale

associato ad ogni provincia rispetto al rifiuto complessivamente prodotto in regione (Tabella 81). Ciò ha permesso di capire come accorpare tra loro le diverse province, al fine di suddividere il territorio regionale in tre macro-aree aventi analogo peso in termini di rifiuto prodotto; ciascuna area rappresenta il potenziale “bacino di utenza” di ogni impianto di riciclo negli scenari alternativi analizzati. I risultati ottenuti dalle elaborazioni sono riportati in Tabella 81. Si nota il contributo notevole alla produzione di rifiuti della provincia di Milano (61%), seguita da quella di Bergamo (9,3%) e Monza Brianza (7,1%). Si è deciso di trascurare, ai fini dell’individuazione delle tre macro-aree e la successiva ubicazione degli impianti di riciclo, le province di Mantova e Sondrio, in quanto il loro contributo alla produzione totale risulta molto basso. Infine, è giusto menzionare che i dati in Tabella 81 si riferiscono alla situazione nell’anno 2014; tuttavia si suppone che il modello rappresentativo della produzione dei rifiuti a base di gesso in regione mantenga un trend simile anche negli anni futuri simulati negli scenari alternativi, immaginando che Milano sia la provincia dove si concentra più del 60% della produzione, seguita da BG, MB, CO e BS.

**Tabella 81.** Peso percentuale di ciascuna provincia sulla produzione totale di rifiuti in regione.

<b>Provincia</b>	<b>% sulla produzione totale in regione</b>
BG	9,3%
BS	4,8%
CO	6,0%
CR	4,1%
LC	1,0%
LO	0,5%
MB	7,1%
MI	60,7%
MN	0,4%
PV	1,5%
SO	0,1%
VA	4,7%
<b>Totale regione</b>	<b>100%</b>

Sulla base delle precedenti assunzioni, il territorio regionale è stato suddiviso in tre macro-aree, all’interno delle quali sono stati posizionati gli impianti di riciclo previsti negli scenari alternativi (Figura 23). Si precisa che è stata mantenuta inalterata la posizione dell’impianto di riciclo già presente in regione, la cui ubicazione definitiva è prevista in provincia di Cremona e dunque a servizio della macro-area 3, mentre l’impianto 2 e l’impianto 3 di nuova realizzazione sono stati situati indicativamente nel baricentro pesato (in funzione di dove si producono più rifiuti) delle altre due macro-aree (Figura 23), in modo da poter ottimizzare i trasporti per il conferimento dei rifiuti provenienti dalle varie province. L’impianto 2 sarà indicativamente posizionato a nord di Milano mentre l’impianto 3 a sud-ovest di Bergamo.



**Figura 23.** Suddivisione del territorio regionale in tre macro aree e posizionamento indicativo degli impianti di riciclo, assunto di riferimento per la modellizzazione degli scenari alternativi.

Per valutare le distanze medie di conferimento dei rifiuti dai produttori in regione agli impianti di riciclo, è stato ipotizzato che il conferimento avvenga secondo le percentuali riportate in Tabella 82, che mostrano indicativamente il bacino di affluenza di ciascun impianto di riciclo futuro. Per le province il cui territorio cade in due o più aree, come Milano, Brescia e Pavia, si è scelto di proporzionare il flusso inviato a trattamento nei 3 impianti di riciclo, in base alla percentuale di territorio della provincia rientrante in ciascuna macro-area e alla produzione dei rifiuti relativa a ciascuna provincia.

**Tabella 82.** Ipotesi sul bacino di affluenza dei tre impianti di riciclo previsti negli scenari alternativi.

Provincia	Impianto 1	Impianto 2	Impianto 3
BG	0%	0%	100%
BS	50%	0%	50%
CO	0%	100%	0%
CR	100%	0%	0%
LC	0%	0%	100%
LO	100%	0%	0%
MB	0%	0%	100%
MI	25%	50%	25%
PV	50%	50%	0%
VA	0%	100%	0%

#### **2.5.4.1 Scenario SA1: utilizzo del gesso riciclato nella produzione di pannelli in cartongesso**

Nello scenario alternativo SA1 è stato ipotizzato che il 100% dei rifiuti in gesso gestiti in regione sia inviato ai 3 impianti di riciclo ipotizzati al paragrafo 2.5.4, ognuno con le caratteristiche e le efficienze già descritte per l'impianto di riciclo dello scenario attuale (paragrafo 2.5.3.1), e che la polvere di gesso riciclata sia interamente utilizzata nel processo di produzione dei pannelli in cartongesso, in sostituzione del gesso naturale, come mostrato in Figura 24.

Per valutare la validità di questa ipotesi, sono state considerate le principali caratteristiche del gesso riciclato ottenuto a valle del trattamento, determinate sulla base delle analisi chimico-fisiche condotte nell'impianto durante le campagne sperimentali, e confrontate con i requisiti tecnici previsti dalle normative di settore. Si sottolinea che, allo stato attuale, non esiste alcuna norma europea di riferimento che fissa i criteri minimi per l'impiego del gesso riciclato nella produzione dei prodotti per l'edilizia: infatti, la norma ISO 1587/1975 è stata revocata senza essere sostituita, lasciando un "buco" nella definizione dei requisiti di conformità dei gessi destinati a tale applicazione. In mancanza di requisiti tecnici stabiliti da norme di settore, quindi, nasce il problema di come valutare la qualità del gesso riciclato e la sua idoneità all'uso nella produzione dei prodotti per l'edilizia in cui rientrano, in maniera preponderante, i pannelli in cartongesso. A tal fine, nel progetto europeo GtoG, sono stati condotti test pilota per valutare le caratteristiche dei gessi in relazione alla diversa origine (naturale, sintetico e riciclato) ed il re-inserimento potenziale del gesso riciclato nel ciclo produttivo del pannello in cartongesso (Eurogypsum, dc2 2015). Sulla base di queste indagini, tenendo conto anche delle specifiche già esistenti in alcuni paesi Europei (e.g. *PAS – WRAP 2008* nel Regno Unito, *Gypsum Draft quality criteria* in Germania), al termine del progetto sono stati determinati i criteri minimi di qualità del gesso riciclato, concordati sia a livello europeo che nazionale e condivisi dai diversi riciclatori e produttori coinvolti nel progetto (i.e. Knauf, Placopatre, Saint-Gobain Belgium, Siniat UK e Siniat France). Tali criteri, riportati nel report di Eurogypsum (dc2, 2015), comprendono:

- parametri tecnici: la distribuzione granulometrica delle particelle, il contenuto di acqua libera, la purezza espressa in termini di titolo di solfato bi-idrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), il residuo di carta nella polvere di gesso (misurato come carbonio organico totale, COT), il tenore massimo delle impurità fisiche e chimiche, il colore e l'odore;
- parametri tossicologici: concentrazioni di metalli pesanti (rame, zinco, mercurio etc.) e altri composti non metallici (es. sali di magnesio, sodio, potassio e cloruri) che sono potenzialmente rischiosi per la salute umana ed il cui contenuto deve essere limitato affinché il prodotto finale (pannello) rispetti i criteri di qualità interni.

Per valutare se il gesso riciclato prodotto dall'impianto in regione possiede le caratteristiche per essere impiegato nella produzione di nuovi pannelli in cartongesso, sono state messe a confronto le principali caratteristiche della polvere di gesso riciclata con le specifiche di qualità stabilite nel progetto europeo GtoG,

come mostrato nelle Tabella 83 e Tabella 84. Alcuni parametri e metalli, come il contenuto di sali, i cloruri, le concentrazioni di As, Co e Mn, non sono stati determinati nelle analisi chimico-fisiche condotte dall'impianto di riciclo in regione, in quanto non previsti dall'autorizzazione.

**Tabella 83.** Granulometria e principali parametri tecnici del gesso riciclato in uscita dall'impianto di riciclo in regione; valori medi delle analisi chimico-fisiche condotte sui sette lotti e relative deviazioni standard (tra parentesi). Confronto con i parametri tecnici del gesso riciclato concordati nel progetto europeo GtoG e pubblicati nel report di Eurogypsum (dc2, 2015).

<i>Parametri</i>	<i>Valori medi impianto 1 (dev.st.)</i>	<i>Specifiche gesso – Progetto GtoG</i>
Granulometria	< 20 mm	< 15 mm
Acqua libera	0,59% (± 0,54%)	<10 %
Purezza T <sub>g</sub> (CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O)	79,5% (± 5,9%)	>80 %
COT	NM	<1,5 %
Sali di magnesio solubili	NM	<0,1%
Sali di sodio solubili	NM	<0,06%
Sali di potassio solubili	NM	<0,05%
Cloruri	<0,1%	<0,02%
pH	8,0 (± 0,4)	6 - 9

Dal confronto si può osservare che, mentre l'umidità e il pH rientrano pienamente nei valori indicati da GtoG, il tenore medio di solfato bi-idrato appare di poco inferiore al valore minimo stabilito nel progetto GtoG. Per quanto riguarda la granulometria, le analisi dell'impianto riportano solo l'informazione generica del diametro massimo (100% passante a 20 mm) ma, come affermato dal gestore, la dimensione media della polvere di gesso è piuttosto fine e inferiore a 10 mm, quindi conforme alle specifiche indicate da GtoG.

Per quanto riguarda il contenuto di metalli pesanti (Tabella 84), per quelli che sono stati rilevati durante le misure nell'impianto di riciclo, i valori di concentrazione determinati nel gesso riciclato risultano tutti inferiori ai limiti indicati nel progetto GtoG.

**Tabella 84.** Contenuto di metalli pesanti nel gesso riciclato in uscita dall’impianto di riciclo in regione; valori medi (per kg di sostanza secca) delle analisi chimico-fisiche condotte sui sette lotti e relative deviazioni standard (tra parentesi). Confronto con i parametri tossicologici del gesso riciclato concordati nel progetto europeo GtoG e pubblicati nel report di Eurogypsum (dc2, 2015).

Elementi [mg/kg <sub>ss</sub> ]	Valori medi impianto (dev. st.)	Specifiche gesso – Progetto GtoG
As	NM	<4
Be	NM	<0,7
Pb	3,77 (± 3,9)	<22
Cd	<0,2	<0,5
Cr.	<0,2	<25
Co.	NM	<4
Cu	7,1 (± 4,1)	<14
Mn	NM	<200
Ni	4,8 (± 2,0)	<13
Se	NM	<16
Te	NM	<0,3
Ti	NM	<0,4
V	NM	<26
Zn	29,3 (± 16,6)	<50

NM = Non Misurato

Sulla base delle risultanze analitiche fornite dall’impianto in regione si può dedurre che il gesso riciclato ottenuto dal trattamento di recupero possiede le caratteristiche idonee per il suo impiego nella produzione dei pannelli in cartongesso. L’unico parametro critico è rappresentato dal tenore di solfato di calcio bi-idrato (Tabella 83) che potrebbe non rientrare nei limiti previsti; tuttavia, è doveroso precisare che, secondo quanto emerso durante i test pilota del progetto GtoG, i principali parametri del gesso riciclato che possono comportare difficoltà nella gestione e nel controllo della qualità dei prodotti finali sono l’umidità del gesso, che se elevata rischierebbe di rendere meno efficiente la lavorazione con consumi anche più elevati, ma soprattutto il tenore di impurità contaminanti, quali la carta. Quest’ultima è stata indicata come un fattore determinante per il reinserimento di percentuali elevate di gesso riciclato senza conseguenze negative sulla qualità dei pannelli prodotti, motivo per il quale è stato stabilito il valore limite di COT<1,5%. Tuttavia, questo parametro non è stato determinato durante le campagne di analisi condotte nell’impianto di riciclo per cui, per una valutazione più completa, sarebbe necessario integrare le analisi correnti per poter misurare tutti i parametri previsti nel progetto GtoG.

Posto che i criteri qualitativi del gesso riciclato mostrati nelle Tabella 83 e Tabella 84 non sono definiti da norme di settore ma sono il risultato di un accordo tra produttori e riciclatori di alcuni Paesi Europei, affinché questi criteri possano essere sempre garantiti è necessario un controllo rigido e mirato dei rifiuti in

cartongesso in entrata al trattamento, in quanto la qualità della materia prima secondaria che si ottiene dipende fortemente dalle caratteristiche del rifiuto in ingresso. Partendo dai criteri di qualità richiesti a valle del trattamento di recupero, i tre partner del progetto GtoG (GRI, NWGR e Siniat), hanno eseguito test di laboratorio su campioni di gesso riciclato ottenuti dal recupero di diverse tipologie di pannelli e hanno individuato le tipologie di rifiuti in gesso che possono essere accettati negli impianti di riciclo in quanto idonei al trattamento, e mostrati in Tabella 85.

**Tabella 85.** Tipologie di rifiuti a base di gesso accettate negli impianti di riciclo che hanno partecipato al progetto GtoG.

Tipologie di rifiuti a base di gesso	Accettati da GRI, NWGR, SINIAT	Dopo approvazione	
		dello specifico riciclatore	Non accettate
Blocchi di gesso	X		
Soffitti, pavimenti, muri in gesso, stucco	X		
Rifiuti in gesso con chiodi e viti, carta da parati, tessuti di vetro e altri rivestimenti murali	X		
Intonaco in sacchetti	X		
Stampo in gesso (profilo a C)	X		
Prodotti in gesso in vetro rinforzato (GRG)	X		
Pannello con alluminio e polistirene		x	
Pannello in gessofibra		x	
Stampi		x	
Pannelli con rete di fibre in vetro		x	
Piastrelle per soffitti in gesso		x	
Pannello con isolanti (EPS-PS)		x	
Materiale pericoloso, come amianto			x
Calcestruzzo aerato autoclavato (AAC)			x
Pannello con rinforzo in cemento			x

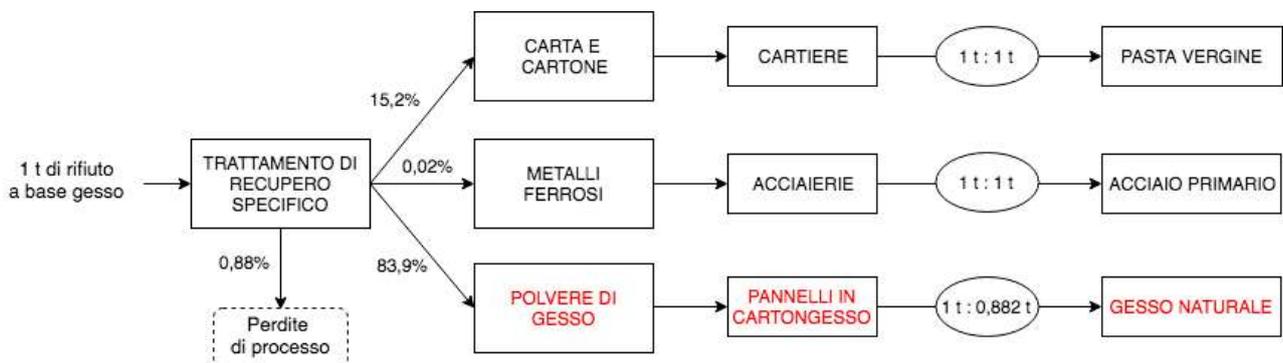
In conclusione, fermo restando l'esistenza di alcuni parametri critici, che devono essere attentamente monitorati per garantire l'inserimento di percentuali elevate di gesso riciclato nel processo produttivo dei pannelli (i.e. COT e titolo di solfato di calcio), l'inserimento del gesso riciclato nel processo di produzione dei pannelli appare un'opzione tecnicamente fattibile.

### ***Quantificazione della risorsa naturale evitata***

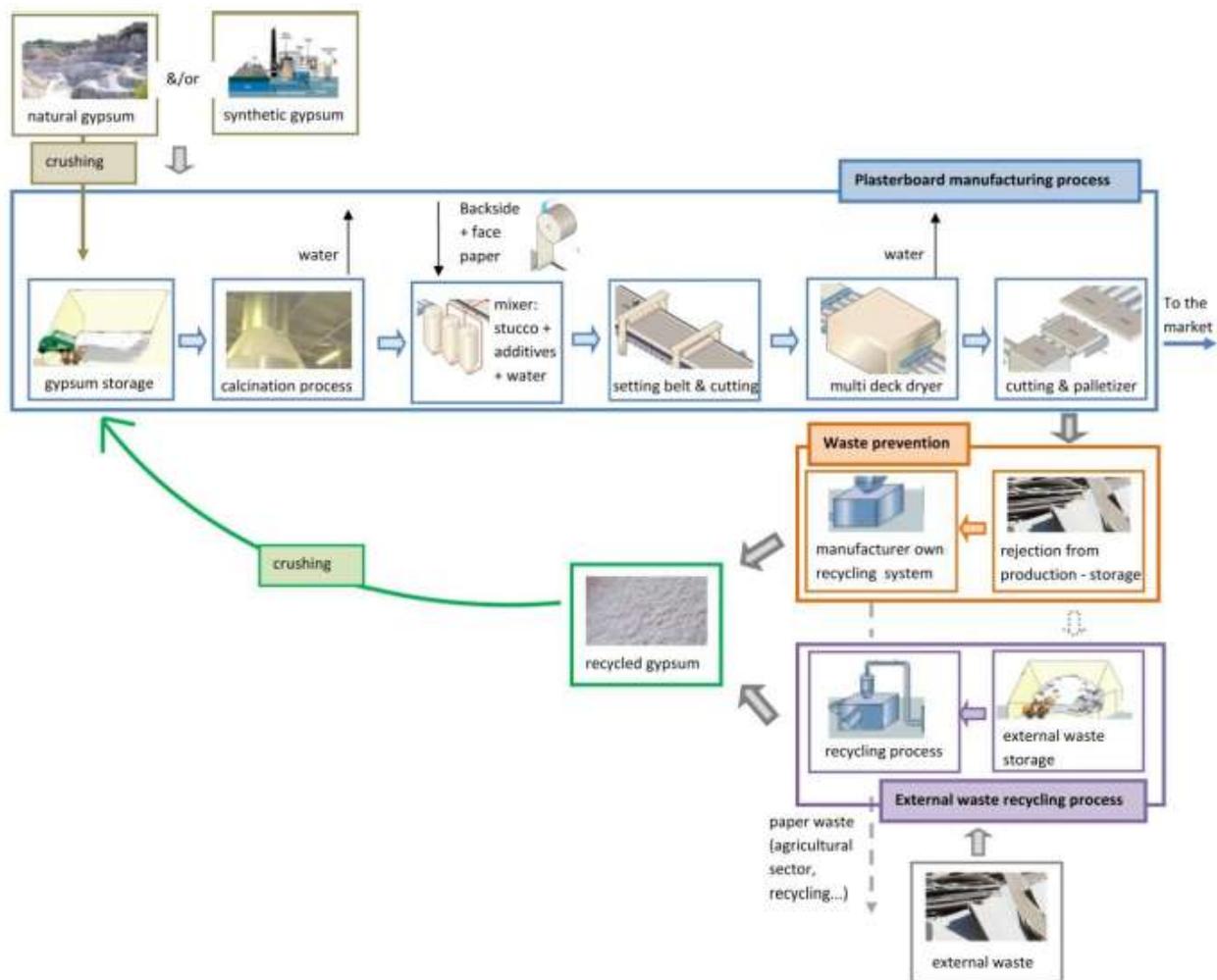
In Figura 25 è mostrato il ciclo produttivo del pannello in cartongesso, nel caso in cui sia incluso, oltre al riciclo dei rifiuti pre-consumo (ovvero quelli derivanti dal processo produttivo) anche il riciclo dei rifiuti in gesso post-consumo derivanti dalle operazioni di demolizione dei pannelli a fine vita. Nell'impianto di

produzione il gesso, naturale o riciclato, per poter essere inserito nel forno di calcinazione deve avere una granulometria compresa nell'intervallo 0-15 mm; poiché il gesso riciclato in uscita dall'impianto di recupero possiede già la pezzatura idonea (range 0,063 – 8 mm), si può ipotizzare che venga inserito direttamente nel forno di cottura; questo rappresenta dunque il punto di sostituzione tra risorsa secondaria e primaria. Pertanto, le fasi di lavorazione del gesso naturale che vengono evitate grazie al recupero dei rifiuti e all'impiego del gesso riciclato sono le macinazioni primaria e secondaria, da cui si ottiene gesso naturale crudo con pezzatura inferiore a 15 mm, i cui consumi sono riportati in Tabella 75 (i.e. 0,5 kWh/t e 1,9 kWh/t rispettivamente per il frantoio a ginocchiera e per il mulino a martelli secondario).

Per quantificare le materia prima evitata, è stato ipotizzato che il principale parametro che influenza le caratteristiche tecniche-prestazionali del pannello finale sia la purezza del gesso, intesa come tenore di solfato di calcio bi-idrato; per tale ragione, il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e naturale è stato calcolato come rapporto tra il titolo di  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  misurato nel gesso riciclato e quello del gesso naturale. Il titolo di solfato di calcio bi-idrato nel gesso naturale è stato stimato sulla base delle analisi di laboratorio svolte durante le campagne sperimentali del progetto GtoG (report “dc2” di Eurogypsum), da cui emerge un tenore medio calcolato su 4 diversi campioni di gesso naturale del 90,2%, con una deviazione standard dello 0,9%. Per il gesso riciclato è stato invece assunto il valore medio delle misure sui 7 lotti dell'impianto di riciclo in regione, riportato in Tabella 83 e pari al 79,5% ( $\pm 5,9\%$ ). Il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e naturale è risultato pari a 0,882: ciò implica che 1 tonnellata di gesso riciclato inserita nel processo produttivo dei pannelli consente di evitare l'estrazione e lavorazione di 882 kg di gesso da cava (Figura 24). Data la variabilità misurata per il tenore di solfato di calcio nel gesso riciclato, si è deciso di condurre un'analisi di sensitività per il rapporto di sostituzione, facendo variare la purezza del gesso riciclato tra il valore minimo del 70,7% e quello massimo di 85,5% registrati nel corso delle analisi sul gesso riciclato. Il range ottenuto per il rapporto di sostituzione varia quindi tra un valore minimo pari a 0,78 (scenario **SA1<sub>min</sub>**) e uno massimo pari a 0,95 (scenario **SA1<sub>max</sub>**).



**Figura 24.** Bilancio di massa per 1 tonnellata di rifiuti in gesso sottoposti a trattamento dedicato nello scenario alternativo SA1.



**Figura 25.** Ciclo produttivo del pannello in cartongesso che include il riciclo dei rifiuti in gesso *post-consumo* (Fonte: Eurogypsum, report DA1 2013).

### *Stima della domanda di gesso riciclato in regione per la produzione dei pannelli in cartongesso*

Infine, per valutare se questo ambito di applicazione è in grado di soddisfare la potenziale offerta di gesso riciclato in regione, è stata dapprima considerata la quantità di pannelli in cartongesso prodotti in Italia nel 2014, pari a 715.845 tonnellate (fonte: dati Eurostat 2014). Facendo poi riferimento alla composizione media del pannello, desunta dal lavoro di Rivero et al. (2016), sono stati stimati i quantitativi dei diversi componenti necessari per tale produzione, riportati in Tabella 86. La polvere di gesso richiesta dagli stabilimenti italiani è risultata pari a 707.846 t. Attraverso un colloquio telefonico con l'associazione dei produttori italiani di gesso "Assogesso", è emerso che in Italia sono attualmente attivi 6 stabilimenti di produzione dei pannelli in cartongesso (Tabella 87) di dimensioni pressoché analoghe; è stata quindi considerata una produttività media di 119.307 t di pannelli in cartongesso per ciascun impianto; ciò implica che ciascun sito di produzione dei pannelli richiede circa 117.974 t di polvere di gesso l'anno.

**Tabella 86.** Percentuali dei materiali costituenti il pannello in cartongesso tratti dallo studio di Rivero et al., (2016) e quantitativi stimati di tali materiali per la produzione di pannelli in Italia nel 2014.

<b>Componenti del pannello</b>	<b>Costituenti pannello (%)</b>	<b>Quantità richiesta per l'Italia (t)</b>
Polvere di gesso	99	707.846
Carta	4	29.993
Additivi	1	9.998
Rifiuti pre-consumo (scarti)*	4	31.993
Pannello prodotto	100	715.845

\*i rifiuti pre-consumo sono da sottrarre alla quantità di pannelli prodotti.

**Tabella 87.** Società produttrici attive in Italia e ubicazione degli stabilimenti di produzione dei pannelli in cartongesso.

<b>Società produttrici</b>	<b>Sede stabilimenti</b>
Knauf	Castellina Marittima (PI)
Fibran	Roccastrada (GR)
Fassa Bortolo	Calliano (AT)
Saint-Gobain	Termoli (CB)
	Casola Valsenio (RA)
Siniat	Corfinio (AQ)

Per cui, anche nel caso in cui venga rifornito un unico stabilimento produttivo, ipoteticamente quello più vicino in Piemonte (AT), la domanda di gesso per tale settore sarebbe molto superiore rispetto alla massima offerta potenziale di gesso riciclato in regione (i.e. 83,9% di 31.405 t = 26.340 t). Nel caso in cui tutto il gesso riciclato prodotto in Lombardia fosse inviato allo stabilimento produttivo in Piemonte, ciò implicherebbe un re-impiego del gesso riciclato del 22,4% rispetto al gesso totale utilizzato all'interno del processo produttivo. Come evidenziato nei test pilota del progetto GtoG (report dA1 di Eurogypsum), percentuali di utilizzo di gesso riciclato fino al 30% si ritengono accettabili, in quanto non comportano alcuna significativa variazione delle caratteristiche tecniche e qualitative dei pannelli prodotti rispetto al processo tradizionale in cui si usa solo gesso naturale. Questo dimostra che l'ipotesi di inviare il 100% del gesso riciclato ottenibile da tutti i rifiuti prodotti in regione in impianti per la produzione di cartongesso è tecnicamente fattibile.

#### ***Stima dei trasporti di vendita del gesso riciclato e naturale***

Sia per il gesso naturale che per quello riciclato si è assunto che il trasporto per la commercializzazione avvenga con camion di grandi dimensioni (>32 tonnellate), di cui un terzo Euro 3, un terzo Euro 4, un terzo Euro 5.

### Trasporto del gesso riciclato

La distanza di trasporto per la commercializzazione del gesso riciclato è stata calcolata valutando, per ognuno dei 3 impianti di riciclo, la percorrenza stradale rispetto a ciascuno stabilimento di cartongesso, come mostrato in Tabella 88; la distanza relativa ad ogni impianto di produzione di pannelli è una media aritmetica delle distanze rispetto ai tre impianti di riciclo considerati, avendo assunto la stessa potenzialità per i tre impianti. Per il calcolo del trasporto medio complessivo in regione sono stati considerati 3 casi:

- nello scenario **SA1\_base** il gesso riciclato prodotto dai tre impianti di riciclo è inviato ai tre stabilimenti più vicini alla regione, ovvero quelli in provincia di Asti, Ravenna e Pisa. In questo caso, la distanza media finale è pari a 253 km;
- nello scenario peggiorativo **SA1\_worst** le destinazioni sono tutti gli stabilimenti presenti in Italia e in questo caso la distanza finale aumenterebbe a 416 km;
- nello scenario ottimale **SA1\_best** si considera solo l'impianto di Asti, per cui la distanza di trasporto risulta di 158 km.

I tre scenari di trasporto verranno confrontati tramite LCA per valutare l'incidenza del trasporto del gesso riciclato sugli impatti finali.

**Tabella 88.** Distanze stradali tra i singoli impianti di riciclo dei rifiuti in gesso e gli stabilimenti produttivi dei pannelli e relativa distanza media.

Siti di produzione dei pannelli in cartongesso	Distanze tra impianto di riciclo e stabilimento di cartongesso			
	Impianto 1 (km)	Impianto 2 (km)	Impianto 3 (km)	Media (km)
Castellina Marittima (PI)	250	353	370	<b>324</b>
Roccastrada (GR)	380	433	447	<b>420</b>
Calliano (AT)	175	127	172	<b>158</b>
Termoli (CB)	645	697	710	<b>684</b>
Casola Valsenio (RA)	240	289	305	<b>278</b>
Corfinio (AQ)	584	645	660	<b>630</b>

### Trasporto del gesso naturale

Per calcolare la distanza di trasporto per la commercializzazione del gesso naturale si è assunto come punto di partenza la cava in provincia di BG da cui viene estratto il gesso naturale, inviato poi nel sito di lavorazione di Brescia (distante 8 km circa dalla cava) e da lì agli stabilimenti di cartongesso considerati.

Anche in questo caso, la distanza finale di trasporto è una distanza media e variabile in base agli impianti di produzione di pannelli considerati, in analogia a quanto già mostrato per il gesso riciclato. La distanza media finale di trasporto del gesso naturale è stata assunta pari a 283 km nello scenario **SA1\_base** e 250 km in quello ottimale **SA1\_best**.

### ***Riciclo della carta e dei metalli ferrosi***

La modellizzazione dei processi di riciclo della carta e dei metalli ferrosi recuperati è stata effettuata come nello scenario di gestione attuale (paragrafo 2.5.3.2). L'unico dato che varia è la distanza di conferimento dei rifiuti in carta alla cartiera, che in questo caso risulta essere di 9 km.

#### ***2.5.4.2 Scenario SA2: utilizzo del gesso riciclato nei cementifici***

Nello scenario alternativo SA2 è stato ipotizzato che il 100% dei rifiuti in gesso gestiti in regione venga trattato nei 3 impianti di riciclo e che il gesso riciclato sia interamente utilizzato come additivo per la produzione di cemento, in sostituzione del gesso naturale, e inviato ai cementifici presenti in regione (v. Figura 26).

Nell'industria del cemento il gesso (naturale, riciclato o chimico) viene miscelato al clinker in misura dipendente dalla tipologia di cemento che si intende produrre; la sua funzione è quella di regolare i tempi di presa del cemento quando questo viene mescolato con l'acqua, in quanto il gesso contrasta la reazione di idratazione dell'alluminato tricalcico presente nel clinker rallentando la presa del cemento e migliorandone la lavorabilità.

Anche in questo caso, per valutare la fattibilità tecnica di questa opzione, è stato necessario capire se il gesso riciclato possiede i requisiti minimi per essere impiegato nel processo produttivo dei cementi. Attualmente, non esistono criteri qualitativi stabiliti a livello nazionale o europeo per tale settore d'impiego, per cui si è fatto riferimento alle indicazioni fornite da uno dei 5 cementifici operativi in regione, contattato durante l'indagine (azienda Colacem). Dal colloquio telefonico è emerso che il gesso riciclato, avendo struttura e proprietà chimico-fisiche del tutto comparabili a quelle del gesso naturale, può essere impiegato nella produzione del cemento senza particolari limiti tecnici al livello di processo; gli unici parametri potenzialmente critici che occorre tenere sotto controllo sono la pezzatura del gesso, che deve rientrare nell'intervallo 0-30 mm, e il tenore di impurità. Per quest'ultimo, le principali limitazioni sono legate al contenuto residuo di carta nel gesso riciclato, che comporta valori di COT più elevati nel materiale riciclato rispetto al gesso naturale o chimico, nei quali invece il COT è praticamente assente; tale parametro può inficiare negativamente sulla presa e quindi sulle caratteristiche finali di lavorabilità del cemento prodotto. È quindi indispensabile garantire che il contenuto di carta rimasta adesa alla polvere di gesso dopo il trattamento di riciclo, misurabile in termini di % COT, non sia superiore a un valore soglia; il gestore del cementificio contattato fornisce un range accettabile di COT dell'ordine di pochi punti percentuali.

Un secondo aspetto che può limitare l'impiego del gesso riciclato, sebbene di minor entità, è legato al contenuto di particelle fini nel gesso riciclato; questo, infatti, avendo subito un trattamento di recupero che prevede uno o più step di macinazione, è caratterizzato da una granulometria piuttosto polverulenta che può indurre complicazioni maggiori nelle fasi di gestione e dosaggio del gesso all'interno del processo produttivo del cemento.

Quindi, a seconda della qualità del gesso riciclato e in particolare del contenuto di COT presente, è indispensabile miscelarlo con il gesso naturale per contenere i possibili problemi legati alla presenza di impurità. Attualmente, i cementifici della Lombardia ricevono una miscela composta per il 95% da gesso naturale e per il 5% di gesso riciclato, proveniente dal sito in provincia di Asti dove è presente, annesso alla cava, un impianto di recupero dei rifiuti in cartongesso del gruppo Gyproc- Saint Gobain (cfr. paragrafo 2.5 in Allegato 2). È stato considerato questo dosaggio di miscelazione per la stima della domanda di gesso riciclato in regione Lombardia, come verrà descritto nei paragrafi successivi.

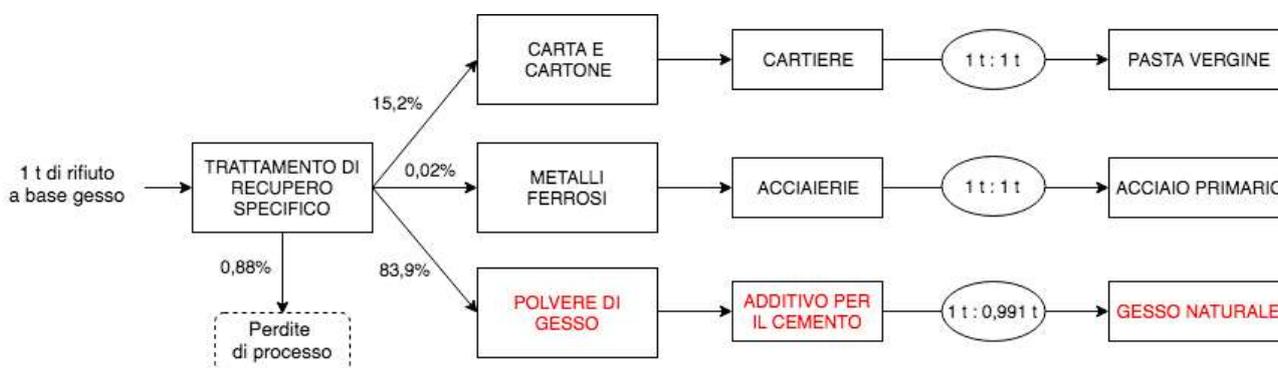
### ***Quantificazione della risorsa naturale evitata***

Come accennato in precedenza, nel caso di utilizzo del gesso riciclato nei cementifici, il principale problema tecnico è rappresentato dal contenuto residuo di carta rimasta adesa alla polvere di gesso dopo il trattamento di recupero, che può ridurre i tempi di presa del cemento e dunque peggiorare le caratteristiche qualitative dei prodotti finali, come confermato dall'azienda Colacem. Per stimare la quantità di risorsa primaria evitata, quindi, si è considerato il contenuto di COT nel gesso riciclato; poiché questo parametro non compare tra quelli misurati dall'impianto di riciclo in regione (vedi Tabella 69) è stato preso a riferimento il valore medio derivante dalle campagne di analisi condotte nel progetto GtoG pari allo 0,85% (relativo a 13 diversi campioni di gesso riciclato analizzati), dal quale si è determinata la "purezza" del gesso riciclato come valore complementare al tenore di COT (%), risultata pari al 99,15%. Il rapporto di sostituzione è stato stimato come rapporto tra la purezza media del gesso riciclato così ricavata (valori mostrati in Tabella 89) e quella del gesso naturale, assunta pari al 100%, in quanto nel gesso di cava non vi è presenza di carta o altra materia organica (per cui si può assumere  $COT = 0$  e purezza = 1). Come mostrato in Tabella 89, il rapporto di sostituzione medio risulta piuttosto elevato, pari a 0,991 e variabile all'interno dell'intervallo 0,969 – 0,998; per tener conto della variabilità del dato di input, è stata quindi condotta un'analisi di sensitività utilizzando il valore minimo (scenario **SA2<sub>min</sub>**) ed il valore massimo (scenario **SA2<sub>max</sub>**) del rapporto di sostituzione.

Nello scenario base SA2, quindi, da una tonnellata di gesso riciclato si evitano gli impatti di estrazione e lavorazione di 991 kg di gesso naturale. Poiché anche in questo settore di applicazione viene utilizzato gesso crudo, non sono stati considerati gli impatti connessi alla fase di cottura ma esclusivamente quelli derivanti dalle attività di estrazione e dai processi di macinazione primaria e secondaria, dai quali si ottiene gesso naturale con granulometria conforme al valore limite di 30 mm indicato dalla ditta Colacem.

**Tabella 89.** Contenuto di COT (%) e purezza (1 –COT%) del gesso riciclato: valore medio, minimo e massimo registrati nelle campagne di analisi del progetto GtoG. Calcolo del rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e gesso naturale, assumendo il 100% di purezza per il gesso naturale.

	Contenuto COT	Purezza (1 – COT)	Rapporto di sostituzione: GR/GN
Valore medio	0,85%	99,15%	0,991
Valore minimo	3,13%	96,87%	0,969
Valore massimo	0,19%	99,81%	0,998

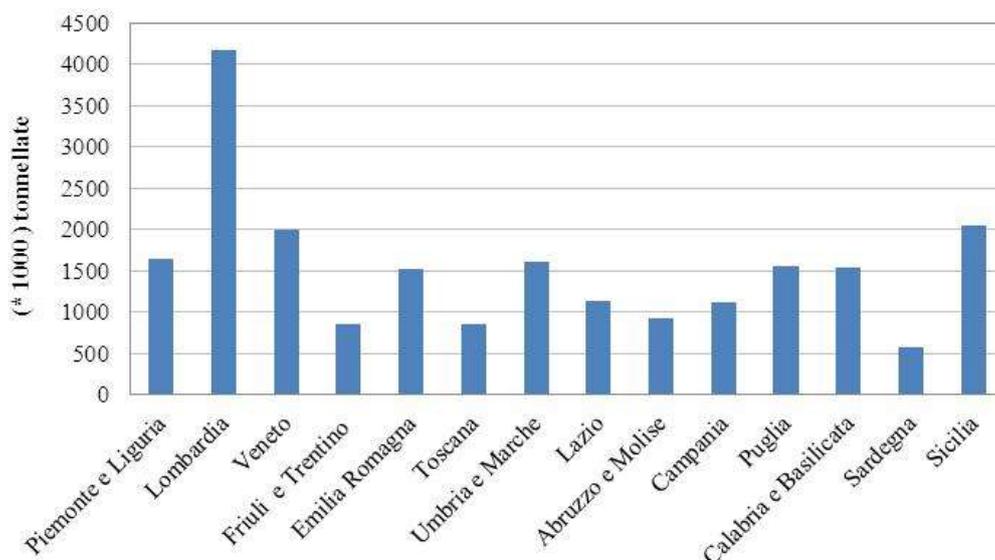


**Figura 26.** Bilancio di massa per 1 tonnellata di rifiuti in gesso sottoposti a trattamento dedicato nello scenario alternativo SA2 (utilizzo del gesso riciclato nei cementifici).

### *Stima della domanda di gesso riciclato in regione per la produzione di cemento*

Sulla base dei dati pubblicati nel rapporto AITEC (Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento) del 2014, relativi alla produzione di cemento, in Italia e in Lombardia, è stata stimata la domanda di gesso naturale richiesto da tale settore e quantificato il potenziale re-impiego di gesso riciclato in regione.

La produzione totale di cemento in Italia ammonta a 21.541.826 tonnellate nel 2014, in netto calo rispetto agli anni precedenti (33.119.839 t nel 2011 e 47.874.949 t nel 2006). Dalla Figura 27 si nota che la Lombardia è la regione con la produzione più elevata (4.173.190 t) rispetto alle altre regioni italiane, seguita da Piemonte e Liguria (1.647.562 t) e dal Veneto (1.997.458 t).



**Figura 27.** Produzione di cemento nel 2014 per alcune regioni italiane (Fonte AITEC,2014).

Nella Tabella 90 viene mostrata la ripartizione percentuale dei vari tipi di cemento prodotti in Italia; i cementi sono classificati in base alla norma UNI EN 197-1:2011 in 5 diversi tipi, individuati dai numeri romani CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V e caratterizzati da percentuali decrescenti del costituente principale: il clinker. I dati di AITEC 2014 presentati in Tabella 90 evidenziano che il cemento Portland è quello più diffuso, in quanto largamente impiegato come base legante del calcestruzzo.

**Tabella 90.**Ripartizione percentuale della produzione di cemento in Italia nel 2014 per le diverse tipologie CEM (Fonte: AITEC, 2014).

Tipo	Denominazione	Sottotipo	Denominazione	Ripartizione % (Italia)
CEM I	Cemento Portland	I		13,4
CEM II	Cemento Portland di miscela	II/A-S	Loppa granulata d'altoforno	0,5
		II/B-S		0,2
		II/B-P	Pozzolana	0,4
		II/A-L; II/A-LL	Calcare	44,8
		II/B-L; II/B-LL		21
		II/A-M	Composito	0,1
		II/B-M		0,4
CEM III	Cemento d'altoforno	III/A	Loppa d'altoforno	4,2
CEM IV	Cemento Pozzolánico	IV/A	Cemento pozzolanico	8,3
		IV/B		4,4
CEM V	Cemento composito	V/A; V/B	Cemento composito	2,2

In particolare, la Tabella 90 mostra che il cemento Portland (CEM I), il Portland di miscela (CEM II/A e II/B) ed il cemento pozzolanico (CEM IV/A e IV/B) rappresentano le tipologie di cemento con la maggiore incidenza sulla produzione complessiva italiana, rispettivamente pari al 13,4%, al 67,5% e al 12,7%. Si è quindi deciso di considerare nell'analisi solo questi tipi di cemento, riproporzionandone le percentuali di produzione in modo da portarle al 100% in totale (Tabella 91). Per maggiori dettagli relativi alla classificazione e alla composizione delle miscele dei diversi tipi di cemento, come da norma UNI EN 197-1:2011, si rimanda alla Tabella 92.

Per ciascun tipo di cemento è stato valutato il dosaggio medio di gesso da aggiungere alla miscela, calcolato applicando il dosaggio specifico di 0,053 kg gesso/kg clinker, tratto da letteratura (Holcim, 2017), alla percentuale di clinker presente nel cemento, dipendente dalla specifica tipologia e derivata sia da dati di letteratura che dal database di ecoinvent 3.3; i valori assunti per le percentuali di cemento prodotte in regione e le relative composizioni in termini di contenuto di clinker e dosaggio di gesso, sono presentati in Tabella 91.

**Tabella 91.** Percentuale di clinker presente nei tipi di cemento considerati, da cui è stato calcolato il dosaggio di gesso richiesto nell'industria cementiera (Fonte: Holcim, ecoinvent 3.3).

<b>Tipo di cemento</b>	<b>% produzione</b>	<b>Clinker</b>	<b>Dosaggio gesso</b>
I	14,3	95% (da letteratura)	5%
II/A	48,6	83 (da ecoinvent 3.3)	4%
II/B	23,6	68% (da ecoinvent 3.3)	4%
IV A	8,9	69% (da ecoinvent 3.3)	4%
IV B	4,7	54% (da letteratura)	3%

**Tabella 92.** Classificazione secondo la norma UNI EN197-1:2011 dei tipi di cemento e relative composizioni percentuali.

Tipo di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker K	Loppa d'altoforno granulata S	Microsilice D	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato T	Calcare L	Costituenti secondari	
						naturale P	industriale Q	silicea V	calcica W				
<b>I</b>	Cemento Portland	I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
<b>II</b>	Cemento Portland alla loppa	II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
		II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	0-5	
	Cemento Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
		II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
	Cemento Portland	II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
		II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Cemento Portland al calcare	II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
II/B-L		65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5	
Cemento Portland composito	II/A-M	80-94	6-20										0-5
	II/B-M	65-79	21-35										0-5
<b>III</b>	Cemento d'altoforno	III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
<b>IV</b>	Cemento pozzolanico	IV/A	65-89	–	11-35				–	–	–	0-5	
		IV/B	45-64	–	36-55				–	–	–	0-5	
<b>V</b>	Cemento composito	V/A	40-64	18-30	–	18-30		–	–	–	–	0-5	
		V/B	20-38	31-49	–	31-49		–	–	–	–	0-5	

Il dosaggio medio specifico che si ottiene dai dati mostrati in Tabella 91 e relativo alla produzione media italiana di cemento è di 0,04 tonnellate di gesso per tonnellata di cemento prodotta; considerata la produzione di cemento in Lombardia di 4,17 milioni di tonnellate (AITEC, 2014), si ottiene una richiesta totale di gesso in regione pari a 170.935 t.

Si sottolinea che parte di questa domanda è soddisfatta dall'uso di gesso chimico da desolforazione (FGD); infatti, secondo il report di AITEC (2014), il gesso chimico usato a livello nazionale nei cementifici è stato di 192.776 t (Tabella 93), a fronte di un quantitativo totale di cemento prodotto pari a circa 21,5 milioni di tonnellate (ovvero l'FGD è lo 0,9% del cemento prodotto). Applicando la medesima percentuale alla produzione di cemento in Lombardia è stato stimato l'uso del gesso chimico nei cementifici in regione, risultato pari a 37.346 t. L'effettiva richiesta di gesso naturale/riciclato dei cementifici della regione è quindi data dalla differenza tra il dosaggio di gesso totale calcolato in precedenza (170.935 t) e quello chimico (37.346 t), ed è risultata pari a 133.590 tonnellate. Se si ipotizza di usare il 5% del gesso riciclato in miscelazione a quello naturale, cosa che già avviene attualmente in regione, si avrebbe una richiesta di gesso riciclato di 6.679 t (Tabella 93). Questo quantitativo risulta inferiore rispetto alla potenziale offerta di gesso riciclato in regione, stimata pari a 14.928 t se si considerano i quantitativi di rifiuti in gesso attualmente inviati a recupero (i.e. 17.793 t); se si prendesse a riferimento l'intera produzione dei rifiuti in regione (i.e. 31.405 t) il gesso riciclato disponibile aumenterebbe a 26.349 t. Volendo ipotizzare che in uno scenario futuro tutto il gesso riciclato prodotto in Lombardia trovi impiego nel settore del cemento, è necessario raggiungere una percentuale minima di utilizzo pari all'8,7% (se si considera il tasso di riciclo attuale dei rifiuti da cui si ottengono 14.928 t di gesso riciclato) oppure al 15,4% (se si considera l'intera produzione di rifiuti da cui si ottengono 26.349 t di gesso riciclato) rispetto alla richiesta totale di gesso per tale settore (170.935 t). Per capire se queste percentuali di impiego siano compatibili con il processo produttivo senza inficiare la qualità dei prodotti finali, sarebbe necessario condurre dei test specifici presso i cementifici.

**Tabella 93.** Dati relativi alla richiesta di gesso per la produzione di cemento in Lombardia. Fonte: AITEC (2014)

Produzione nazionale italiana di cemento (t)	21.541.826	t
Produzione di cemento in Lombardia (t)	<b>4.173.190</b>	<b>t</b>
Richiesta totale di gesso in Lombardia* (t)	170.935	
Gesso chimico usato in Italia (t)	192.776	t
Gesso chimico usato in Lombardia* (t)	<b>37.346</b>	t
Gesso (naturale e riciclato) richiesto dalla Lombardia* (t)	133.590	t
<b>Gesso riciclato richiesto dalla Lombardia* (t)</b>	<b>6.679</b>	<b>t</b>
Gesso naturale richiesto dalla Lombardia* (t)	126.910	t

\*da stime

### *Stima dei trasporti di vendita del gesso riciclato e naturale*

Sia per il gesso naturale che per quello riciclato si è assunto che il trasporto per la commercializzazione avvenga con camion di grandi dimensioni (>32 tonnellate), di cui un terzo Euro 3, un terzo Euro 4, un terzo Euro 5.

#### *Trasporto del gesso riciclato*

La distanza di trasporto per la commercializzazione del gesso riciclato è stata calcolata considerando le sedi dei cementifici che effettuano il ciclo completo in regione (i.e. Caravate, Ternate, Calusco d'Adda, Rezzato e Tavernola Bergamaca), rispetto alle quali sono state valutate le percorrenze stradali relative a ciascun impianto di riciclo, mostrate in Tabella 94. La distanza finale di trasporto del gesso riciclato è la media aritmetica delle distanze rispetto a ciascun cementificio presente in regione, ed è risultata pari a 82 km.

**Tabella 94.** Calcolo della distanza media di trasporto del gesso riciclato ai cementifici in regione nello scenario SA2.

<b>Cementifici in regione</b>	<b>Impianto 1 (km)</b>	<b>Impianto 2 (km)</b>	<b>Impianto 3 (km)</b>	<b>Distanza media (km)</b>
Caravate	147	62	110	106
Ternate	133	47	97	92
Calusco D'Adda	78	51	17	49
Rezzato	72	115	70	86
Tavernola Bergamasca	81	98	46	75
<b>Distanza media finale (km)</b>			<b>82</b>	

#### *Trasporto del gesso naturale*

Sulla base delle informazioni raccolte durante la visita tecnica presso la cava in provincia di AT (vedi Allegato 2 – paragrafo 2.5.2), che ha venduto circa 88.000 t di gesso ai cementifici della Lombardia nel 2014, è stato stimato che circa il 65,9% del gesso naturale impiegato in tale settore provenga dalla cava di Asti, cui è associata una distanza media rispetto ai 5 cementifici di circa 183 km (Tabella 95). La restante parte di gesso (34,1%) proviene invece dalla cava di Bergamo, distante in media 93 km dai cementifici, come mostrato in Tabella 95. Pesando le distanze relative a ciascuna cava per il quantitativo di gesso fornito ai cementifici, si ottiene la distanza media finale per il trasporto del gesso naturale pari a 152 km, impiegata nello scenario SA2.

**Tabella 95.** Calcolo della distanza media di trasporto del gesso naturale ai cementifici in regione nello scenario SA2.

Cementifici in regione	Cava BG (km)	Cava AT (km)
Caravate	163	147
Ternate	150	132
Calusco D'Adda	68	178
Rezzato	64	241
Tavernola Bergamasca	22	217
Distanza media	93	183
<b>Distanza pesata finale (km)</b>	<b>152</b>	

Data la variabilità delle distanze di trasporto del gesso riciclato e naturale, è stata effettuata un'analisi di sensitività per tale parametro. Nello scenario **SAT2<sub>min</sub>** si è ipotizzato di inviare il gesso riciclato al cementificio più vicino, con sede a Calusco d'Adda: la distanza di trasporto del gesso riciclato è pari a 49 km (Tabella 94) mentre quella del gesso naturale è di 140 km (Tabella 95). Al contrario, nello scenario **SAT2<sub>max</sub>** si è considerato il cementificio più lontano, con sede a Caravate, per il quale la distanza del gesso riciclato è pari a 106 km (Tabella 94) e quella del gesso naturale è di 152 km (Tabella 95).

#### ***Riciclo della carta e dei metalli ferrosi***

La modellizzazione dei processi di riciclo della carta e dei metalli ferrosi recuperati è stata effettuata come nello scenario di gestione attuale (paragrafo 2.5.3.2). L'unico dato che varia è la distanza di conferimento dei rifiuti in carta alla cartiera, che in questo caso risulta essere di 9 km.

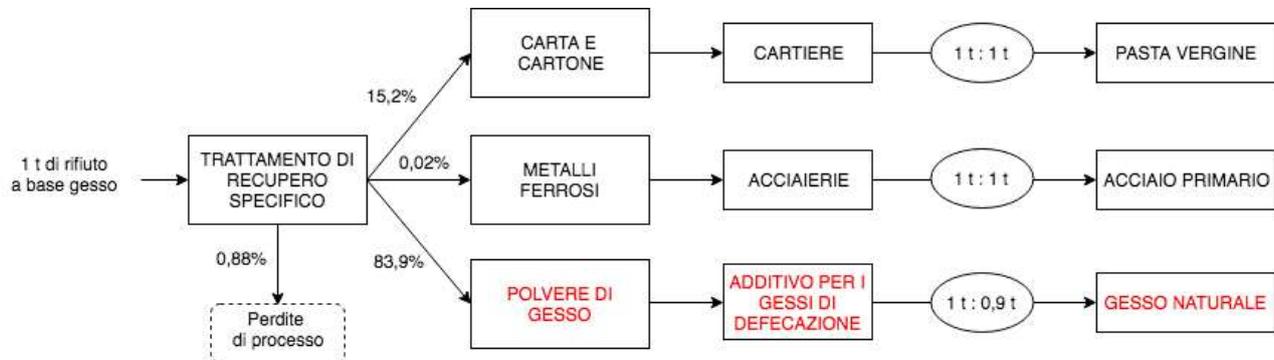
#### ***2.5.4.3 Scenario SA3: utilizzo del gesso riciclato nei gessi di defecazione***

Nello scenario SA3 è stato ipotizzato che il 100% dei rifiuti in gesso gestiti in regione sia inviato ai 3 impianti di riciclo ipotizzati, ognuno con caratteristiche ed efficienze analoghe a quelle dell'impianto attuale (paragrafo 2.5.2.1), e che la polvere di gesso riciclato sia interamente utilizzata come additivo per la produzione di gessi di defecazione negli impianti in regione che effettuano tale trattamento, come mostrato in Figura 28.

#### ***Quantificazione della risorsa naturale evitata***

Per la modellizzazione della risorsa naturale risparmiata e dei consumi evitati attraverso l'impiego del gesso riciclato si rimanda al paragrafo 2.5.3.2, poiché l'applicazione è identica a quella dello scenario attuale. È stata condotta un'analisi di sensitività per il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e naturale, prendendo

in considerazione i valori minimi e massimi dei dosaggi di tali materiali nelle miscele da cui si producono gessi di defecazione, forniti dall'impianto di PV. Nello specifico, nello scenario **SA3<sub>max</sub>** è stato assunto il rapporto di sostituzione massimo pari a 0,93 mentre nello scenario **SA3<sub>min</sub>** il rapporto di sostituzione è pari a 0,87 mentre il valore assegnato nello scenario **SA3** è di 0,9.



**Figura 28.** Bilancio di massa per 1 tonnellata di rifiuti in gesso sottoposti a trattamento dedicato nello scenario alternativo SA3 (utilizzo del gesso riciclato nella produzione di gessi di defecazione).

### *Stima della domanda di gesso riciclato in regione per la produzione dei gessi di defecazione*

Per valutare la fattibilità tecnica di questa opzione di utilizzo, è stato analizzato il settore relativo al trattamento dei fanghi da depurazione per la produzione di gessi di defecazione in regione Lombardia. Per questa analisi sono stati utilizzati i dati pubblicati sul sito di regione Lombardia e relativi all'anno 2010; delle 13 aziende che ritirano i fanghi per lo spandimento in agricoltura, contattate nel corso dell'indagine, solo 4 producono gessi di defecazione (6 non hanno risposto o i riferimenti non risultano più attivi, mentre 3 effettuano solo stabilizzazione dei fanghi per poi spanderli sui terreni agricoli - R10). In Tabella 96 sono mostrati i quantitativi di fanghi ritirati da ciascun impianto nel 2010; complessivamente le 4 aziende hanno trattato 318.247 tonnellate di fanghi da depurazione (tal quali), corrispondenti al 49% del totale ritirato in Lombardia nel 2010. L'azienda Evergreen, che gestisce un impianto in provincia di PV, è stata l'unica che ha fornito i dosaggi dei diversi additivi aggiunti alla miscela per produrre i gessi di defecazione, già mostrati in Tabella 71. Ipotizzando che, in futuro, tutti gli impianti di trattamento fanghi utilizzino le stesse componenti della miscela e che il bilancio di massa sia analogo a quello caratterizzante l'impianto #4 di PV, è stata stimata una produzione complessiva dei gessi di defecazione pari a 390.487 t per la quale sono richieste circa 58.573 t di gesso riciclato, come mostrato in Tabella 96. Pertanto, per questo campo di applicazione, la potenziale richiesta di mercato appare molto maggiore rispetto all'offerta di gesso riciclato in regione, sia se si considera l'attuale riciclo dei rifiuti in gesso (i.e. 17.793 t da cui si ottengono 14.928 t di

gesso riciclato) sia se si considera l'intera produzione (i.e. 31.405 t di rifiuti da cui si ottengono 26.349 t di gesso riciclato).

**Tabella 96.** Impianti di produzione dei gessi di defecazione in regione e quantità di fanghi trattati nel 2010 (tonnellate).

Azienda	Impianti	Fanghi trattati - 2010 (t)	Gessi di defecazione prodotti (t) *	Gesso riciclato richiesto (t) *
ALAN	Impianto 1 (PV)	47.392	58.150	8.723
ALAN	Impianto 2 (PV)	1.752	2.150	322
AZIENDA ALLEVI	Impianto 3 (PV)	104.263	127.930	19.189
EVERGREEN	Impianto 4 (PV)	116.919	143.458	21.519
VALLI	Impianto 5 (BS)	47.921	58.799	8.820
<b>Totale</b>		<b>318.247</b>	<b>390.487</b>	<b>58.573</b>

\*valori stimati applicando i dosaggi e i bilanci di massa dell'impianto #4 di PV.

### *Stima dei trasporti di vendita del gesso riciclato e naturale*

Sia per il gesso naturale che per quello riciclato si è assunto che il trasporto per la commercializzazione avvenga con camion di grandi dimensioni (>32 tonnellate), di cui un terzo Euro 3, un terzo Euro 4, un terzo Euro 5.

### *Trasporto del gesso riciclato*

La distanza di trasporto per la commercializzazione del gesso riciclato è stata calcolata considerando le percorrenze stradali tra gli impianti di riciclo dei rifiuti e i singoli stabilimenti di produzione dei gessi di defecazione. La distanza finale di trasporto del gesso riciclato in regione è la media pesata, rispetto al quantitativo di gesso riciclato impiegato in ciascun impianto (Tabella 96), delle distanze relative ad ogni stabilimento di produzione dei gessi di defecazione presente in regione. Come mostrato in Tabella 97, il trasporto del gesso riciclato nello scenario SA3 è risultato pari a 87 km (valore medio) e variabile tra un valore minimo di 54 km ad un massimo di 96 km, valori considerati per l'analisi di sensitività dei trasporti rispettivamente nello scenario **SA3T<sub>min</sub>** e **SA3T<sub>max</sub>**.

**Tabella 97.** Stima della distanza media di trasporto del gesso riciclato agli impianti di produzione dei gessi di defecazione in regione, nello scenario SA3.

Impianti gessi di defecazione	Impianto 1 (km)	Impianto 2 (km)	Impianto 3 (km)	Distanza media (km)
Impianto 1 (PV)	51	44	66	54
Impianto 2 (PV)	83	59	102	81
Impianto 3 (PV)	112	67	107	95
Impianto 4 (PV)	97	62	105	88
Impianto 5 (BS)	76	128	85	96
<b>Distanza media pesata (km)</b>			<b>87</b>	

### *Trasporto del gesso naturale*

Per calcolare la distanza di trasporto per la commercializzazione del gesso naturale, si è assunto come punto di partenza la cava di BG da cui viene estratto il gesso naturale, che viene inviato allo stabilimento di lavorazione per poi essere consegnato agli impianti di produzione di gessi di defecazione considerati. Anche in questo caso, la distanza finale di trasporto è una distanza mediata in base al quantitativo di gesso richiesto da ogni impianto di gessi di defecazione (vedi Tabella 96). Come mostrato in Tabella 98, la distanza media pesata relativa al trasporto del gesso naturale agli impianti di produzione dei gessi di defecazione in regione risulta pari a 142 km nello scenario SA3, con una variabilità nel range 76-160 km.

**Tabella 98.** Stima della distanza media di trasporto del gesso naturale agli impianti di produzione dei gessi di defecazione in regione, nello scenario SA3.

	Cava di Bergamo
Impianti gessi di defecazione	(km)
Impianto 1 (PV)	130
Impianto 2 (PV)	154
Impianto 3 (PV)	160
Impianto 4 (PV)	157
Impianto 5 (BS)	76
<b>Distanza media pesata (km)</b>	<b>142</b>

Anche per questo scenario è stata effettuata un'analisi di sensitività delle distanze di trasporto del gesso riciclato e naturale. Nello scenario **SA3T<sub>min</sub>** si è ipotizzato di inviare il gesso riciclato all'impianto di gessi di defecazione più vicino (impianto 1), con sede a Bascapé (PV): la distanza di trasporto del gesso riciclato è pari a 54 km (Tabella 97) mentre quella del gesso naturale è di 130 km (Tabella 95). Al contrario, nello scenario **SA3T<sub>max</sub>** si è considerato l'impianto più lontano (impianto 4), con sede a Lonato (BS), per il quale la distanza del gesso riciclato è pari a 96 km (Tabella 97) e quella del gesso naturale è di 76 km (Tabella 95).

### ***Riciclo della carta e dei metalli ferrosi***

La modellizzazione dei processi di riciclo della carta e dei metalli ferrosi recuperati è stata effettuata come nello scenario di gestione attuale (paragrafo 2.5.3.2). L'unico dato che varia è la distanza di conferimento dei rifiuti in carta alla cartiera, che in questo caso risulta essere di 9 km.

#### 2.5.4.4 Scenario SA4: utilizzo del gesso riciclato come correttivo dei suoli

Nello scenario SA4 è stato ipotizzato che il 100% dei rifiuti in gesso gestiti in regione sia inviato ai 3 impianti di riciclo e che la polvere di gesso riciclata sia interamente utilizzata come correttivo dei terreni in regione (v. Figura 29 e Figura 30).

In questo scenario si è assunto che il gesso riciclato abbia principalmente la funzione di innalzare il pH dei terreni acidi (caratterizzati da pH inferiore a 6). La correzione di un suolo acido mediante la pratica della “calcitazione”, cioè tramite l’aggiunta di calce CaO (oppure di CaCO<sub>3</sub>), è una delle operazioni agronomiche più antiche e conosciute. Gli agricoltori fanno uso da secoli della calce, in quanto è un prodotto semplice e facilmente reperibile. Una calcitazione periodica dei terreni comporta vantaggi agronomici e di conseguenza anche economici: migliora la struttura del terreno, rendendolo più lavorabile e più adatto ad ospitare le colture, aumenta l’efficacia dei fertilizzanti, favorisce la vita microbica e l’attività biologica, consentendo una più rapida trasformazione della sostanza organica, migliora la qualità del terreno e dunque aumenta la produttività delle coltivazioni.

Di solito, sono spesso utilizzati per la calcitazione composti come:

- idrossido di calcio: Ca(OH)<sub>2</sub>;
- carbonato di calcio: CaCO<sub>3</sub>;
- dolomite: CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

Poiché esistono diversi prodotti disponibili in commercio e data la mancanza di informazioni relative al mercato dei correttivi in regione, si è deciso di modellizzare due diversi scenari, in cui è stato variato il tipo e la quantità di prodotto evitato:

- nello scenario **SA4a** si assume che il gesso riciclato sostituisca la calce, uno dei prodotti agricoli più disponibili in commercio e largamente utilizzato per correggere il pH dei suoli acidi (grazie al basso costo). In mancanza di dati primari sulla produzione di calce in regione, si è utilizzato il processo di ecoinvent 3.3 *lime production, milled, loose(GLO)*;
- nello scenario **SA4b** si è assunto come prodotto sostituito un insieme di correttivi commerciali a base di carbonato di calcio CaCO<sub>3</sub> e si è utilizzato il processo di ecoinvent 3.3 “*soil ph raising agent, as CaCO3 (GLO), lime to generic market for soil ph raising agent.*”

Affinché il gesso riciclato possa essere utilizzato come correttivo dei suoli, deve rispettare i requisiti stabiliti dalla normativa nazionale in materia di fertilizzanti (D. Lgs. 75/2010) che prevede, per il gesso agricolo, un tenore minimo di CaO del 25% su sostanza secca e del 35% di zolfo come SO<sub>3</sub> (Tabella 99). La norma definisce inoltre diverse classi dimensionali per il gesso, che devono essere specificate dal produttore: nel

caso di gesso polverulento, il 100% delle particelle deve avere dimensioni inferiori a 20 mm. La norma stabilisce inoltre i valori limite di concentrazione dei metalli pesanti per i correttivi, in cui rientra il gesso agricolo; i requisiti sono riportati in Tabella 99 a confronto con i valori riscontrati nel gesso riciclato prodotto nell'impianto di riciclo, espressi come media dei 7 campioni misurati durante le campagne sperimentali. Dalla tabella, si nota che i parametri relativi alla granulometria, al tenore di CaO e ai metalli pesanti sono del tutto conformi ai valori previsti dalla normativa di riferimento; l'unico parametro che appare potenzialmente critico è il contenuto di zolfo come SO<sub>3</sub>, il cui valore medio è molto vicino al limite stabilito dal D.Lgs. 75/2010 (in quanto due dei 7 lotti analizzati hanno esibito valori di SO<sub>3</sub> leggermente inferiori al 35%).

Sulla base del confronto mostrato in Tabella 99, si può concludere che il gesso riciclato ottenuto a valle del trattamento di recupero risulta idoneo all'utilizzo in agricoltura come correttivo, sebbene sia necessario monitorare con una certa attenzione il contenuto di SO<sub>3</sub> nella polvere di gesso, in quanto questo potrebbe rappresentare un fattore limitante per tale applicazione.

**Tabella 99.** Granulometria, principali parametri e contenuto di metalli pesanti nel gesso riciclato in uscita dall'impianto di riciclo in regione; valori medi delle analisi chimico-fisiche condotte sui sette lotti e relative deviazioni standard (tra parentesi). Confronto con i requisiti stabiliti dal D.Lgs. 75/2010 per il gesso agricolo, rientrante nella categoria dei correttivi.

<i>Parametri</i>	<i>Valori medi impianto (dev.st.)</i>	<i>D. Lgs. 75/2010 Correttivi</i>
Granulometria	< 20 mm	Gesso polverulento: <20 mm
Contenuto di CaO (% su SS <sup>1</sup> )	37% (± 4,9%)	≥ 25% (gesso agricolo)
Contenuto di SO <sub>3</sub> (% su SS <sup>1</sup> )	37% (± 2,7%)	≥ 35% (gesso agricolo)
<i>Metalli pesanti (mg/kg SS <sup>1</sup>)</i>		
Piombo	3,8 (± 3,9)	140
Cadmio	<0,2	1,5
Nichel	4,8 (± 2,0)	100
Zinco	29,3 (± 16,6)	500
Rame	7,1 (± 4,1)	230
Mercurio	0,52 (± 0,06)	1,5
Cromo esavalente	<0,2	0,5

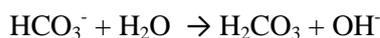
<sup>1</sup> Sostanza secca

### **Quantificazione dei prodotti evitati**

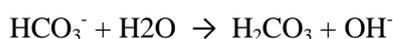
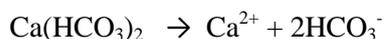
Per il calcolo del rapporto di sostituzione, poiché in questo ambito di utilizzo il gesso riciclato ha la funzione di correggere il pH di un terreno acido, si è considerato come parametro di riferimento il potere basico del

gesso riciclato a confronto con quello dei correttivi ad oggi più in uso. Il potere basico esprime la capacità di rilascio degli ioni OH<sup>-</sup> per unità di peso di sostanza. 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, che sono di seguito riportate e riferite alle sostanze pure:

**Calce:**



**Carbonato di calcio:**



Attraverso i rapporti stechiometrici e i pesi molecolari dei prodotti e dei reagenti si è ricavato il potere basico per la calce, pari a 0,61 gOH/gCaO e quello del carbonato di calcio, pari a 0,34 gOH/gCaCO<sub>3</sub> (riferiti alle sostanze pure)

Il potere basico del gesso riciclato dipende dal tenore di CaO in esso presente; il contenuto medio di CaO è stato ricavato dalle analisi sul gesso riciclato condotte durante le campagne sperimentali dell'impianto di riciclo ed è pari al 37% (vedi Tabella 99). Il potere basico del gesso riciclato, ottenuto moltiplicando il potere basico della calce per il tenore di CaO nel gesso riciclato, risulta quindi pari a 0,22 gOH/gCaSO<sub>4</sub> (Tabella 100).

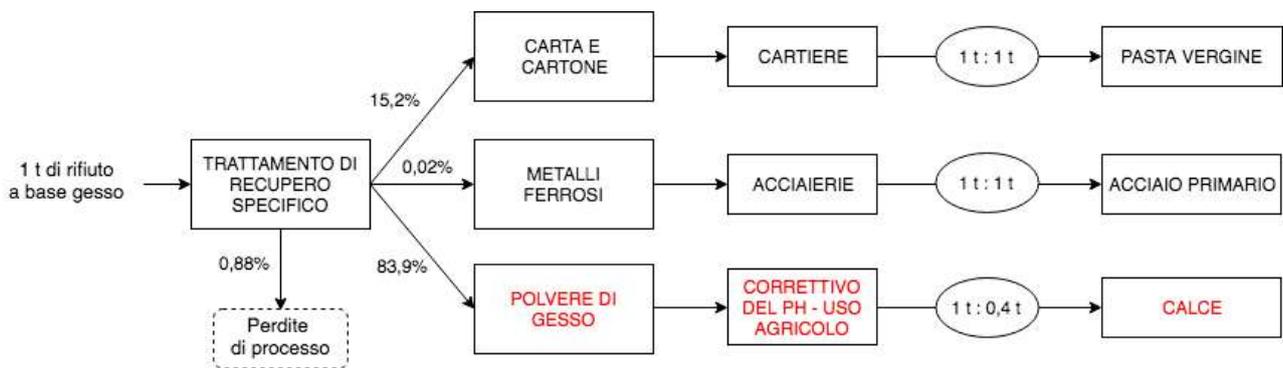
**Tabella 100.** Potere basico della calce, del carbonato di calcio e del gesso riciclato.

Sostanza	Potere basico (gOH/gSostanza)
Calce (CaO)	0,61
Carbonato di calcio (CaCO <sub>3</sub> )	0,34
Gesso (CaSO <sub>4</sub> )	0,22

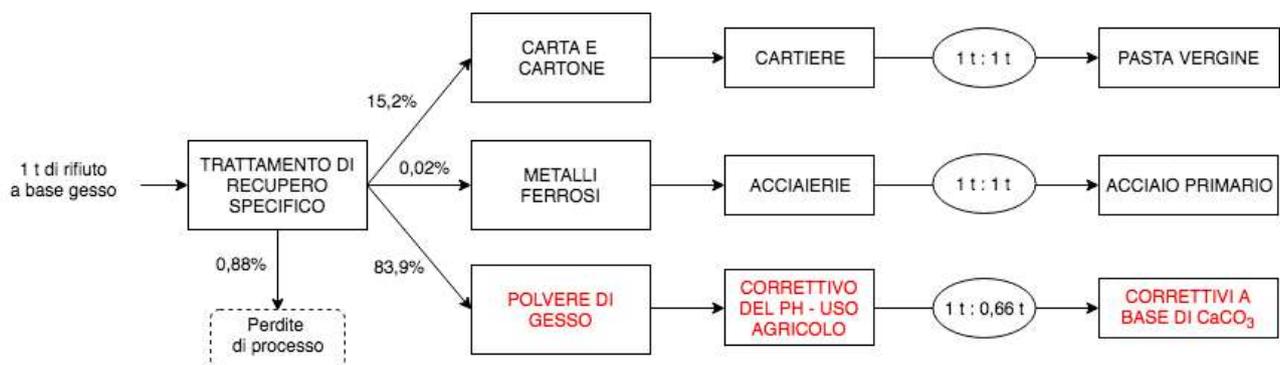
Nello scenario alternativo SA4a il prodotto sostituito dall'uso del gesso riciclato è la calce viva. I prodotti presenti sul mercato (Unicalce) hanno titoli di CaO differenti in base all'uso e al costo; per via cautelativa è stato preso a riferimento il prodotto in commercio con titolo massimo, pari al 92% di CaO (*"Agricol plus* di

Unicalce”). Dividendo il potere básico del gesso riciclato per quello della calce (con titolo al 92%), si ottiene un rapporto di sostituzione pari a 0,4 gCaO/gCaSO<sub>4</sub>, ovvero 1 tonnellata di gesso riciclato permette di evitare la produzione di 400 kg di calce viva con purezza del 92%. (al diminuire della purezza della calce, aumenta il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e calce).

Nello scenario SA4b, invece, il gesso riciclato sostituisce i correttivi a base di CaCO<sub>3</sub> (che possono raggiungere una purezza anche superiore al 99%) e dunque il rapporto di sostituzione risulta in questo caso pari a 0,66 gCaCO<sub>3</sub>/gCaSO<sub>4</sub>.



**Figura 29.** Bilancio di massa per 1 tonnellata di rifiuti in gesso sottoposti a trattamento dedicato nello scenario alternativo SA4a (utilizzo del gesso riciclato in agricoltura in sostituzione della calce).

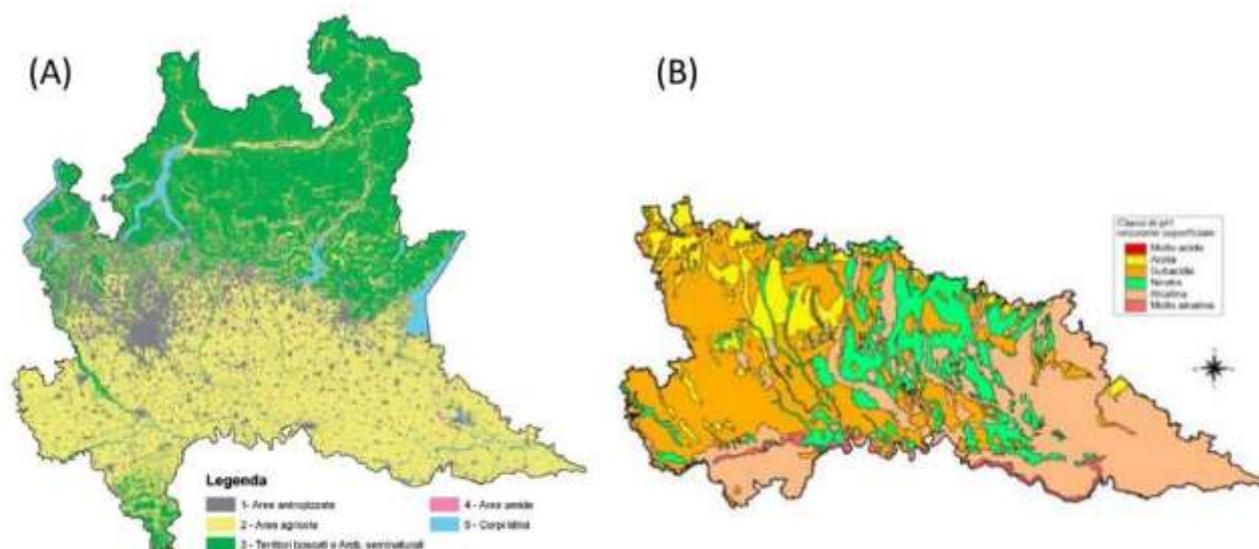


**Figura 30.** Bilancio di massa per 1 tonnellata di rifiuti in gesso sottoposti a trattamento dedicato nello scenario alternativo SA4b (utilizzo del gesso riciclato in agricoltura in sostituzione dei correttivi a base di CaCO<sub>3</sub>).

### *Stima della domanda di gesso riciclato come correttivo dei suoli in regione*

Per stimare la potenziale domanda di gesso riciclato per la correzione del pH dei terreni in regione è stato necessario, da un lato, valutare la superficie agricola a pH acido che potrebbe essere interessata da un intervento di tal tipo, e dall'altra, valutare il dosaggio annuale di calce, correttivi in  $\text{CaCO}_3$  o gesso necessari per ripristinare le caratteristiche dei suoli.

Riguardo il primo aspetto, dalla banca dati geografica DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e forestali), realizzata dall'Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste (ERSAF) con la collaborazione di ARPA, si è ricavata la suddivisione del territorio regionale nelle aree antropizzate, aree agricole, territori boscati e ambienti semi-naturali, aree umide e corpi idrici, rappresentata in Figura 31 (A); in Tabella 101 sono riportate le estensioni delle aree agricole (in ettari) per ogni provincia lombarda e la relativa percentuale rispetto alla superficie agricola totale della Lombardia. Nel report DUSAF 2010 è inoltre presente un'indicazione qualitativa circa la distribuzione delle zone agricole caratterizzate da pH sub-acidi (Figura 31 (B) in arancione, pH: 6-6,8), pH acidi (Figura 31 (B) in giallo pH: 5,5-6) e pH fortemente acidi (Figura 31 (B) in rosso pH:< 5).



**Figura 31.** Carta schematica dell'uso di suolo in regione Lombardia (DUSAF –2010).

Combinando le informazioni contenute nel rapporto DUSAF – 2010 con quanto emerso dall'indagine telefonica, sono state individuate le superfici dei terreni a pH acido in regione (evidenziate in azzurro in Tabella 101), per le quali potrebbero essere effettuati interventi correttivi con calce o, in sostituzione, con gesso riciclato.

**Tabella 101.** Estensione delle aree agricole suddivise per province e percentuale rispetto alla superficie agricola totale in Lombardia.

Aree agricole	Estensione (ha)	% aree agricole sul totale regionale
Varese	18.243	1,75
Como	19.406	1,86
Sondrio	24.639	2,36
Milano	82.386	7,90
Monza-Brianza	14.262	1,37
Bergamo	77.976	7,47
Brescia	167.315	16,04
Pavia	219.779	21,07
Cremona	151.370	14,51
Mantova	192.175	18,42
Lecco	12.931	1,24
Lodi	62.788	6,02
<b>Totale Lombardia</b>	<b>1.043.270</b>	<b>100</b>

L'estensione complessiva, relativa alle province di Varese, Como, Milano e Pavia, risulta pari a circa 340.000 ettari.

Riguardo la valutazione dei dosaggi da applicare ai terreni, sono state considerate le schede tecniche dei prodotti in calce disponibili sul mercato in cui sono indicati i quantitativi richiesti per interventi di calcitazione o di mantenimento, espressi per una unità di pH da innalzare e in funzione della tessitura dei terreni (sabbiosa, limosa, argillosa). In Tabella 102 sono riportati i valori indicati per i prodotti a base di calce; sulla base dei dosaggi della calce, sono stati stimati quelli necessari per i correttivi a base di  $\text{CaCO}_3$  e per il gesso riciclato, tenendo conto del potere basico che hanno questi prodotti rispetto a quello della calce. I valori, riferiti sia a interventi di calcitazione che di mantenimento, sono mostrati in Tabella 102 contrassegnati con asterisco perché derivanti da stime.

Si sottolinea che gli interventi di mantenimento sono meno intensi e richiedono dosaggi minori rispetto a quelli previsti per le operazioni di calcitazione; tuttavia, sono interventi piuttosto diffusi, possono interessare superfici maggiori (anche quelle debolmente acide o neutre) e in genere più frequenti. Infatti, vengono spesso attuati prima o dopo le coltivazioni, soprattutto per quelle colture che inducono un rapido impoverimento delle sostanze del terreno.

La richiesta di calce è stata stimata a partire dai dosaggi medi di calce (Tabella 102) ipotizzando che gli interventi di calcitazione e mantenimento interessino lo 0,5% delle superfici agricole delle province di VA e CO e l'1% delle aree di MI e PV (soggette a sfruttamento maggiore del suolo) e che vengano effettuati una volta l'anno. Da queste ipotesi si determina una domanda indicativa di calce pari a 12.040 tonnellate, quantitativo che potrebbe essere evitato utilizzando 30.270 t di gesso riciclato. Tuttavia si sottolinea che è

una stima di massima in quanto esistono grandi incertezze sia relative ai dosaggi di gesso e calce sia in merito al futuro mercato in regione per il gesso riciclato destinato a tale applicazione.

**Tabella 102.** Dosaggi di calce per le operazioni di calcitazione e mantenimento del pH di suoli, espressi per unità di pH e superficie, indicati per le diverse tipologie di terreno (da scheda tecnica).

Terreno	Correttivi a base di calce		Correttivi a base di CaCO <sub>3</sub> <sup>(*)</sup>		Gesso riciclato (37% CaO) <sup>(**)</sup>	
	Calcitazione (t/ha)	Mantenimento (t/ha)	Calcitazione (t/ha)	Mantenimento (t/ha)	Calcitazione (t/ha)	Mantenimento (t/ha)
Sabbioso	1,5	0,75	2,5	1,23	3,8	1,88
Limoso	2,5	1,25	4,1	2,05	6,3	3,13
Argilloso	3,5	1,75	5,8	2,87	8,8	4,39
<i>Media</i>	<i>2,5</i>	<i>1,25</i>	<i>4,1</i>	<i>2,05</i>	<i>6,3</i>	<i>3,13</i>

(\*) valori stimati dividendo il dosaggio di calcitazione e mantenimento della calce per il rapporto tra il potere basico dei correttivi a base di CaCO<sub>3</sub> e quello della calce (0,34/0,61)

(\*\*) valori stimati dividendo il dosaggio di calcitazione e mantenimento della calce per il rapporto tra il potere basico del gesso riciclato e quello della calce (0,22/0,61)

### ***Stima dei trasporti di vendita del gesso riciclato e naturale***

La distanza di commercializzazione del gesso riciclato in regione è stata stimata come media delle distanze tra gli impianti di riciclo e i capoluoghi di provincia delle aree potenzialmente interessate da interventi di correzione del pH (CO, VA, MI e PV), pesata per la potenziale domanda di gesso riciclato di ogni provincia. La distanza di vendita del gesso riciclato in regione è risultata pari a 48 km. Per il trasporto della calce, il valore della distanza è stato maggiorato del 30%, assumendo quindi una distanza pari a 63 km per il prodotto evitato. Ciò trova ragione nel fatto che, affinché il gesso riciclato possa competere sul mercato e quindi essere economicamente conveniente rispetto al prodotto evitato (calce), è necessario che il trasporto del gesso riciclato sia inferiore rispetto a quella della calce, poiché questo ha una significativa incidenza sul prezzo finale di vendita del prodotto.

### ***Riciclo della carta e dei metalli ferrosi***

La modellizzazione dei processi di riciclo della carta e dei metalli ferrosi recuperati è stata effettuata come nello scenario di gestione attuale (paragrafo 2.5.3.2). L'unico dato che varia è la distanza di conferimento dei rifiuti in carta alla cartiera, che in questo caso risulta essere di 9 km.

### 2.5.4.5 *Tabelle riassuntive degli scenari alternativi*

In Tabella 103 vengono mostrati a confronto i principali parametri assunti per gli scenari alternativi, relativi alla tipologia e quantità di risorsa primaria sostituita, con indicazione del metodo di calcolo del rapporto di sostituzione, ed alla potenziale richiesta di mercato in regione per ciascun settore di utilizzo.

**Tabella 103.** Prodotto primario evitato, metodo di calcolo e valore del rapporto di sostituzione (RS) negli scenari alternativi; richiesta di mercato del prodotto evitato per ogni scenario di utilizzo del gesso riciclato in regione (stime).

Scenari alternativi	Prodotto evitato	Calcolo RS <sup>1</sup>	Valore medio RS	Richiesta di mercato
SA1	Gesso naturale	$\frac{\text{Purezza GR } 2}{\text{Purezza GN}}$	0,882	707.846 t
SA2	Gesso naturale	$\frac{\text{Purezza GR } 3}{\text{Purezza GN}}$	0,991	133.590 t
SA3	Gesso naturale	$\frac{\text{Dosaggio GN}}{\text{Dosaggio GR}}$	0,9	58.573 t
SA4a	Calce	$\frac{\text{Potere basico GR}}{\text{Potere basico calce}}$	0,4	12.040 t (CaO)
SA4b	Correttivi a base di CaCO <sub>3</sub>	$\frac{\text{Potere basico GR}}{\text{Potere basico correttivi}}$	0,66	19.740 t (CaCO <sub>3</sub> )

<sup>1</sup> GN = gesso naturale; GR = gesso riciclato

<sup>2</sup> Purezza in termini di tenore di solfato di calcio (CaSO<sub>4</sub> \*2H<sub>2</sub>O)

<sup>3</sup> Purezza in termini di composizione cioè assenza di impurità quali carta (pari a 1 per il GN)

## SCENARIO SA1 – PANNELLO IN CARTONGESSO

**Tabella 104.** Processi del database di ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per la modellizzazione LCA del sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario alternativo SA1 in cui il gesso riciclato è destinato agli impianti di produzione dei pannelli in cartongesso (GN: gesso naturale, GR: gesso riciclato).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SA1
Conferimento agli impianti	Trasporto rifiuti			1 t * 37 km
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	7%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	8%
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	85%
Riciclo gesso		<i>ad hoc</i>		
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	15,1 MJ/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	6,1 kWh/t
	Gesso riciclato			83,9%
	Metalli ferrosi	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero metalli ferrosi (Tabella 107)</i>	0,02%
	Carta/cartone	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero carta (Tabella 106)</i>	15,2%
	Perdite di processo			0,88%
	Prodotto evitato	<i>ad hoc</i>	<i>Gesso naturale – scenario base<sup>3</sup> (Tabella 105) (destino: impianti di produzione di pannelli in cartongesso)</i>	0,74 <sup>1</sup>
	Trasporto GR			213 t*km <sup>2</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839) e il rapporto di sostituzione medio tra GR e GN per l'uso negli impianti di cartongesso (RS pari a 0,882).

<sup>2</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo trasportata (0,839 t) e la distanza media di trasporto dagli impianti di riciclo agli impianti di cartongesso per il riutilizzo del GR nello scenario base in cui si considerano gli impianti di Asti, Ravenna e Pisa (253 km).

<sup>3</sup> si assume nello scenario base un rapporto di sostituzione medio tra GR e GN (ossia ricavato partendo dalla purezza media del GR) pari a 0,991, che viene moltiplicato per l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839) per ottenere il valore finale del prodotto evitato.

**Tabella 105.** Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione di una tonnellata di gesso naturale prodotto e commercializzato in regione nello scenario alternativo SA1.

<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Tipo processo</b>	<b>Nome processo</b>	<b>Valore scenario SA1</b>
Produzione gesso naturale		<i>ad hoc</i>		1 t
	Estrazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo gasolio (escavatore)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	5,12 MJ/t
	Consumo gasolio (pala meccanica)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	6,48 MJ/t
	Trasporto GN			1 t*8 km <sup>(1)</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%
	Lavorazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo EE (frantoio a ginocchiera)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	0,5 kWh/t
	Consumo EE (mulino a martelli)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	1,9 kWh/t
	Trasporto GN			1 t*283 km <sup>2</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra il GN in uscita dalla cava di BG trasportato e la distanza di trasporto dalla cava di BG all'impianto di lavorazione del GN in provincia di Brescia (8 km).

<sup>2</sup> calcolato come prodotto tra il GN in uscita dall'impianto di BS trasportato e la distanza media di trasporto dall'impianto di BS agli impianti di cartongesso per il riutilizzo del GR nello scenario base, in cui si considerano gli impianti di Asti, Ravenna e Pisa (283 km).

**Tabella 106.** Processo per la modellizzazione del riciclo di una tonnellata di rifiuti in carta separati negli impianti di recupero dei rifiuti a base di gesso.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenari alternativi
Riciclo carta				1 t
	Pasta vergine evitate	ecoinvent 3.3	<i>Thermo-mechanical pulp (GLO) market for</i>	0,822 t <sup>1</sup>
	Trasporto alla cartiera			1t*9 km <sup>(2)</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra purezza effettiva carta post-trattamento (98,65%) e coefficiente di sostituzione ricavato dal precedente lavoro del DICA (83,3%)

<sup>2</sup> la distanza media di trasporto alle cartiere più vicine è di 9 km.

**Tabella 107.** Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione del riciclo di una tonnellata di metalli ferrosi separati negli impianti di recupero dei rifiuti a base di gesso e inviati al recupero in acciaieria.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenari alternativi
Riciclo metalli ferrosi		<i>ad hoc</i>		1 t
	Trasporto ferrosi	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 50% EURO3 e 50% EURO4 (RER)</i>	1 t*50km
	Riciclo			1 t
	Produzione acciaio secondario	ecoinvent 3.3	<i>Steel, electric, un and low allowed, at plant /RER</i>	88,1% <sup>1</sup>
	Acciaio primario sostituito	ecoinvent 3.3	<i>Steel, converter, unalloyed, at plant/RER</i>	881 kg

<sup>1</sup> si assume che i metalli separati dal trattamento di riciclo abbiano 100% di purezza (quindi nessuno scarto di lavorazione), da cui si ottiene 88,1% di acciaio secondario mentre il rapporto di sostituzione tra acciaio secondario e primario è assunto 1:1 perché si considera che l'acciaio secondario abbia caratteristiche identiche a quello primario.

## SCENARIO SA2 - CEMENTIFICI

**Tabella 108.** Processi del database di ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per la modellizzazione LCA del sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario alternativo SA2 in cui il gesso riciclato è destinato ai cementifici della regione (GN: gesso naturale, GR: gesso riciclato).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SA2
Conferimento agli impianti	Trasporto rifiuti			1 t * 37 km
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	7%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	8%
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	85%
Riciclo gesso		<i>ad hoc</i>		
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	15,1 MJ/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	6,1 kWh/t
	Gesso riciclato			83,9%
	Metalli ferrosi	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero metalli ferrosi (Tabella 107)</i>	0,02%
	Carta/cartone	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero carta (Tabella 106)</i>	15,2%
	Perdite di processo			0,88%
	Prodotto evitato	<i>ad hoc</i>	<i>Gesso naturale – scenario base <sup>(3)</sup> (Tabella 109) (destino: cementifici in regione)</i>	0,832 <sup>(1)</sup>
	Trasporto GR			68 t*km <sup>(2)</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839) e il rapporto di sostituzione medio tra GR e GN per l'uso nei cementifici pari a 0,991.

<sup>2</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839 t) e la distanza media di trasporto dagli impianti di riciclo ai cementifici per il riutilizzo del GR (82 km).

<sup>3</sup> si assume nello scenario base un rapporto di sostituzione medio (ossia ricavato partendo dal contenuto medio di TOC nel GR) pari a 0,991.

**Tabella 109.** Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione di una tonnellata di gesso naturale prodotto e commercializzato in regione nello scenario alternativo SA2.

<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Tipo processo</b>	<b>Nome processo</b>	<b>Valore scenario SA2</b>
Produzione gesso naturale		<i>ad hoc</i>		1 t
	Estrazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo gasolio (escavatore)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	5,12 MJ/t
	Consumo gasolio (pala meccanica)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	6,48 MJ/t
	Lavorazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		0,34 t <sup>1</sup>
	Consumo EE (frantoio a ginocchiera)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	0,5 kWh/t
	Consumo EE (mulino a martelli)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	1,9 kWh/t
	Trasporto GN			1 t * 152 km <sup>2</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> Si è ipotizzato che solo la percentuale di gesso proveniente dalla cava di BG (34,1%) necessita di essere macinata perché di dimensioni grossolane, mentre quella proveniente dalla cava di AT (65,9%) è già di pezzatura idonea all'uso nei cementifici senza dover subire nessuna ulteriore lavorazione dopo la fase di estrazione.

<sup>2</sup> calcolato come prodotto tra il GN in uscita dalla cava di BG e di AT e la relativa distanza di trasporto ai cementifici pesata in base ai flussi di provenienza del gesso dalle due cave (152 km).

## SCENARIO SA3 – GESSI DI DEFECAZIONE

**Tabella 110.** Processi del database di ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per la modellizzazione LCA del sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario futuro alternativo SA3 in cui il destino del gesso riciclato è rappresentato dagli impianti di produzione di gessi di defecazione (GN: gesso naturale, GR: gesso riciclato).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SA3
Conferimento agli impianti	Trasporto rifiuti			1 t * 37 km
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	7%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	8%
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	85%
Riciclo gesso		<i>ad hoc</i>		
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	15,1 MJ/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	6,1 kWh/t
	Gesso riciclato			83,9%
	Metalli ferrosi	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero metalli ferrosi (Tabella 107)</i>	0,02%
	Carta/cartone	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero carta (Tabella 106)</i>	15,2%
	Perdite di processo			0,88%
	Prodotto evitato	<i>ad hoc</i>	<i>Gesso naturale (Tabella 111) (destino: gessi di defecazione)</i>	0,755 <sup>1</sup>
	Trasporto GR			73 t*km <sup>(2)</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839) e il rapporto di sostituzione medio tra GR e GN per l'uso nei gessi di defecazione pari a 0,9

<sup>2</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839 t) e la distanza media di trasporto del GR dagli impianti di riciclo agli impianti di gessi di defecazione (87 km)

**Tabella 111.** Processo costruito *ad hoc* per la modellizzazione di una tonnellata di gesso naturale prodotto e commercializzato in regione nello scenario alternativo SA3.

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SA3
Produzione gesso naturale (GN)		<i>ad hoc</i>		1 t
	Estrazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo gasolio (escavatore)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	5,12 MJ/t
	Consumo gasolio (pala meccanica)	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	6,48 MJ/t
	Lavorazione gesso naturale	<i>ad hoc</i>		1 t
	Consumo EE (frantoio a ginocchiera)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	0,5 kWh/t
	Consumo EE (mulino a martelli)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	1,9 kWh/t
	Consumo EE (mulino terziario)	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	3 kWh/t
	Trasporto GN			1 t * 142 km <sup>1</sup>
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	100%

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra il GN in uscita dalla cava di BG e la distanza di trasporto (media pesata) dalla cava agli impianti di gessi di defecazione (142 km).

## SCENARIO SA4a – USO IN AGRICOLTURA (CALCE)

**Tabella 112.** Processi del database di ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per la modellizzazione LCA del sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario alternativo SA4a, in cui il gesso riciclato è utilizzato come correttivo dei terreni acidi in sostituzione della calce (GN: gesso naturale, GR: gesso riciclato).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SA4a
Conferimento rifiuti agli impianti	Trasporto rifiuti			1 t * 37 km
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	7%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	8%
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	85%
Riciclo gesso		<i>ad hoc</i>		
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	15,1 MJ/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	6,1 kWh/t
	Gesso riciclato			83,9%
	Metalli ferrosi	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero metalli ferrosi (Tabella 107)</i>	0,02%
	Carta/cartone	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero carta (Tabella 106)</i>	15,2%
	Perdite di processo			0,88%
Prodotto evitato	ecoinvent 3.3	<i>lime production, milled, loose_(GLO)</i>	0,335 <sup>1</sup>	

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839) e il rapporto di sostituzione tra GN e calce per l'uso come correttivo in agricoltura, pari a 0,4

## SCENARIO SA4b – USO IN AGRICOLTURA (CORRETTIVI A BASE DI CaCO<sub>3</sub>)

**Tabella 113.** Processi del database di ecoinvent 3.3 e processi costruiti *ad hoc* per la modellizzazione LCA del sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario alternativo in cui il gesso riciclato è utilizzato come correttivo dei terreni acidi, in sostituzione della calce (SA4a) o dei correttivi a base di CaCO<sub>3</sub> (SA4b) (GN: gesso naturale, GR: gesso riciclato).

Modulo	Descrizione	Tipo processo	Nome processo	Valore scenario SA4b
Conferimento agli impianti	Trasporto rifiuti			1 t * 37 km
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	7%
	Medi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	8%
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	<i>Transport, freight, lorry &gt;32 metric ton, 1/3EURO3, 1/3 EURO4, 1/3 EURO5(RER)</i>	85%
Riciclo gesso		<i>ad hoc</i>		
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	<i>Diesel, burned in building machine (GLO) market for</i>	15,1 MJ/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	<i>Electricity, medium voltage (IT) market for</i>	6,1 kWh/t
	Gesso riciclato			83,9%
	Metalli ferrosi	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero metalli ferrosi (Tabella 107)</i>	0,02%
	Carta/cartone	<i>ad hoc</i>	<i>Recupero carta (Tabella 106)</i>	15,2%
	Perdite di processo			0,88%
	Prodotto evitato	ecoinvent 3.3	<i>Soil ph raising agent, as CaCO<sub>3</sub> (GLO), lime to generic market for soil ph raising agent</i>	0,55 <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup> calcolato come prodotto tra l'MPS in uscita dagli impianti di riciclo (0,839) e il rapporto di sostituzione medio tra GN e CaCO<sub>3</sub> per l'uso come correttivo in agricoltura, pari a 0,65.

## 3 RISULTATI LCA

### 3.1 Risultati dell'analisi LCA1 (rifiuti misti)

#### 3.1.1 Scenario attuale LCA1

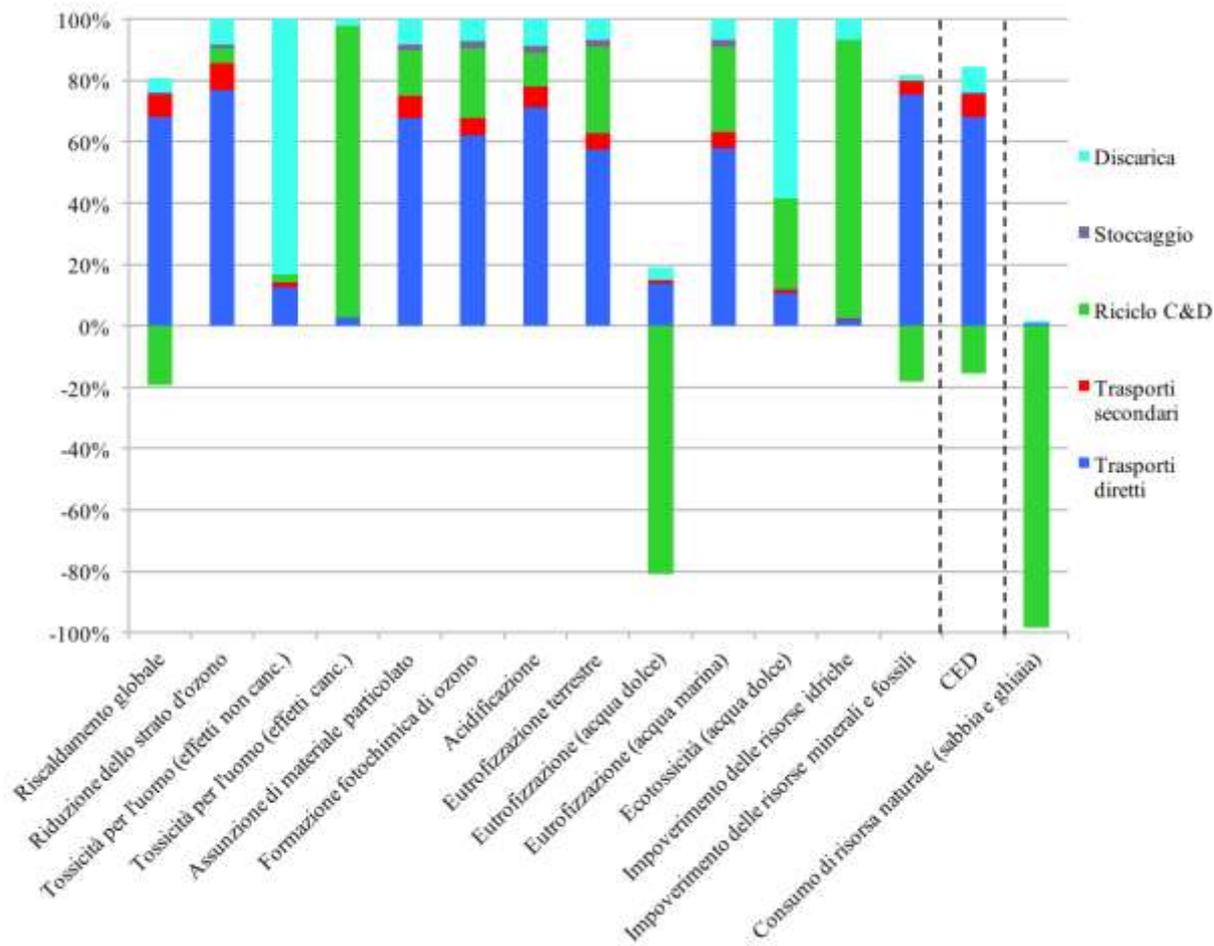
Si descrivono in questo paragrafo i risultati dell'analisi LCA1 del sistema di gestione dei rifiuti C&D inerti non pericolosi implementato in regione Lombardia nel 2014, secondo i metodi di caratterizzazione illustrati nel paragrafo 2.2.1 del Capitolo 2, che considerano gli indicatori di impatto dei metodi ILCD e CED e gli indicatori costruiti *ad hoc* per questo studio che permettono di stimare il consumo di risorsa minerale naturale (non rinnovabile) espresso in kg di sabbia e ghiaia consumati o risparmiati e il volume di discarica risparmiato per tonnellata di rifiuti C&D gestito in regione.

#### Risultati specifici

In Tabella 114 sono riportati i valori che gli indicatori di impatto e l'indicatore di consumo di risorsa minerale naturale assumono nell'analisi dello scenario attuale riferiti a 1 tonnellata di rifiuti prodotti e gestiti, evidenziando i contributi derivanti dalle diverse fasi della gestione ovvero il trasporto per il conferimento dei rifiuti agli impianti, distinto in diretto e secondario, lo stoccaggio, le operazioni di riciclo e lo smaltimento in discarica, nonché il valore complessivo ottenuto come somma dei singoli contributi. Come si nota dalla Tabella 114, gli indicatori hanno quasi tutti segno positivo, ad eccezione dell'eutrofizzazione in acqua dolce (-1,38E-03 kgP<sub>eq</sub>) e del consumo di risorsa minerale naturale (-611,4 kg sabbia e ghiaia): nello scenario attuale, quindi, il beneficio associato alla sostituzione di prodotti primari (mistone naturale e acciaio primario) non riesce a compensare gli impatti sull'ambiente associati alle fasi di gestione e trattamento, e derivanti, in particolare, dal trasporto dei rifiuti agli impianti. Tali risultati non includono il beneficio associato all'eventuale discarica evitata (si veda il paragrafo 3.1.2.1 per un approfondimento su questo aspetto).

In Figura 32 sono riportati in forma grafica, per ciascuna categoria di impatto e per l'indicatore di consumo di risorsa naturale, i contributi percentuali delle diverse fasi della gestione: dai risultati si evince che i trasporti legati al conferimento dei rifiuti hanno un peso determinante per la maggior parte delle categorie di impatto (riscaldamento globale, riduzione dello strato d'ozono, assunzione di materiale particolato, formazione fotochimica di ozono, acidificazione, eutrofizzazione dell'acqua marina e impoverimento delle risorse minerali e fossili). Lo smaltimento in discarica, invece, contribuisce maggiormente nelle categorie di impatto inerenti la tossicità umana (effetti non cancerogeni) e l'ecotossicità in acqua dolce. I benefici legati al riciclo dei rifiuti C&D nella situazione attuale si osservano solo per il riscaldamento globale, l'eutrofizzazione in acqua dolce, l'impatto energetico, il consumo di risorsa minerale naturale e, in misura limitata, l'impoverimento delle risorse minerali e fossili (a causa della mancata caratterizzazione dei flussi elementari di sabbia e ghiaia); questi benefici, però, sono limitati in confronto al carico ambientale complessivo del sistema, a cui contribuiscono

in maniera rilevante i trasporti, nonostante le distanze di conferimento dei rifiuti non siano molto elevate (27,5 km) e gli impianti siano presenti in maniera piuttosto omogenea su tutto il territorio regionale.



**Figura 32.** Contributi percentuali delle diverse fasi della gestione sugli impatti complessivi del sistema e sul consumo di risorsa naturale.

**Tabella 114.** Indicatori associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto C&D in regione.

	Unità di misura	Totale	Trasporto diretto	Trasporto secondario	Riciclo	Stoccaggio	Discarica
Categorie di impatto ambientale (metodo ILCD):							
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	3,40	3,77	0,39	-1,06	0,05	0,25
Riduzione dello strado d'ozono	kgCFC-11 <sub>,eq</sub>	9,3E-07	7,1E-07	7,8E-08	4,8E-08	8,9E-09	7,8E-08
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	7,32E-06	9,4E-07	9,5E-08	1,9E-07	2,5E-09	6,1E-06
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	5,00E-06	1,3E-07	1,0E-08	4,7E-06	1,3E-09	1,1E-07
Assunzione di materiale particolato	kgPM <sub>2,5,eq</sub>	2,93E-03	2,0E-03	2,2E-04	4,3E-04	6,4E-05	2,4E-04
Formazione fotochimica d'ozono	kgNMVOC <sub>,eq</sub>	0,03	1,8E-02	1,7E-03	-1,74E-07	6,6E-04	2,0E-03
Acidificazione	moli H <sup>+</sup> <sub>,eq</sub>	0,02	1,8E-02	1,6E-03	6,6E-03	5,2E-04	2,2E-03
Eutrofizzazione terrestre	moli N <sub>,eq</sub>	0,10	5,9E-02	5,4E-03	2,8E-03	2,4E-03	6,8E-03
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kgP <sub>,eq</sub>	-1,38E-03	3,1E-04	2,4E-05	2,9E-02	2,2E-06	9,1E-05
Eutrofizzazione (acqua marina)	kgN <sub>,eq</sub>	0,01	5,4E-03	4,9E-04	-1,8E-03	2,2E-04	6,3E-04
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	226,07	24,7	2,50	66,62	0,06	132,23
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> <sub>,water,eq</sub>	0,02	4,3E-04	7,7E-05	1,9E-02	1,4E-06	1,4E-03
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kgSb <sub>,eq</sub>	2,81E-04	3,3E-04	1,9E-05	-8,1E-05	1,6E-07	8,1E-06
Impatto energetico (CED)	MJ	65	63,9	6,9	-14,5	0,8	7,9
Consumo di risorse naturali (sabbia e ghiaia)	kg	-611,4	4,4	0,7	-622,1	0	5,6

Tramite l'inventario delle emissioni è stato possibile approfondire l'origine degli impatti e dei benefici del sistema e capire quali sono i processi che maggiormente influenzano il risultato finale all'interno di ogni categoria di impatto ambientale.

- L'impatto legato al cambiamento climatico e quello inerente l'impoverimento delle risorse minerali e fossili hanno entrambi un beneficio associato alle azioni di recupero dei rifiuti. Nel caso del cambiamento climatico il maggiore contributo al *saving* è da ricondurre all'evitata emissione di CO<sub>2</sub> fossile, dovuta sia al mancato trasporto del mistone naturale che al riciclo dei metalli ferrosi separati negli impianti C&D che permettono di evitare la produzione di acciaio primario. Per quanto riguarda l'impatto legato all'impoverimento delle risorse minerali e fossili il maggior beneficio del riciclo è dato dall'evitata estrazione di Nichel e Indio (derivato principalmente dalla lavorazione dello zinco), metalli utilizzati nella produzione dell'acciaio primario.
- Le fasi della gestione (trasporto, riciclo, stoccaggio e discarica) contribuiscono in misura simile all'interno delle categorie di impatto inerenti l'eutrofizzazione terrestre e marina e la formazione fotochimica d'ozono. In particolare, gli impatti del riciclo in queste tre categorie di impatto risultano in segno positivo e sono dovuti per la maggior parte alle emissioni di ossidi d'azoto: tali emissioni derivano da un lato dal consumo di diesel per le operazioni di trattamento dei C&D e dall'altro sono emissioni dirette associate alla produzione di acciaio secondario. Il fatto che questo contributo abbia segno positivo, e che quindi rappresenti un impatto sul sistema, è legato al fatto che il consumo di diesel negli impianti di riciclo dei rifiuti C&D risulta maggiore del consumo associato alla produzione di mistone e che l'emissione diretta di ossidi d'azoto derivante dalla produzione di acciaio secondario (riciclo metalli ferrosi) è maggiore rispetto alle emissioni che caratterizzano la produzione di acciaio primario.
- Nelle categorie di impatto inerenti la tossicità umana (effetti cancerogeni) e l'impoverimento delle risorse idriche il riciclo presenta impatti molto elevati. Nella categoria legata alla tossicità umana l'impatto in segno positivo è dovuto allo smaltimento in discarica degli scarti della produzione di acciaio secondario, legato principalmente alla lisciviazione del CromoVI nel percolato. Nella categoria di impatto legata all'impoverimento delle risorse idriche, invece, il contributo maggiore all'impatto del riciclo è dovuto alla produzione di energia elettrica (consumata negli impianti fissi)<sup>3</sup>: infatti, il processo utilizzato per la modellizzazione dell'energia elettrica prodotta "*Electricity, medium voltage (IT), market for*" fa riferimento al mix energetico italiano, in cui l'idroelettrico rappresenta la modalità di produzione di circa il 14% del totale dell'energia elettrica.
- Gli impatti legati all'assunzione di particolato e all'acidificazione presentano contributi simili sia per quanto riguarda il riciclo che per quanto riguarda lo smaltimento in discarica, che si presentano comunque inferiori rispetto a quelli indotti dal trasporto. Per la categoria d'impatto che descrive

---

<sup>3</sup> Il motivo per cui l'impatto dovuto alla produzione di energia idroelettrica è positivo in segno è da ricondurre al metodo di caratterizzazione impiegato nell'analisi.

l'assunzione di particolato, sia nel riciclo che nello smaltimento, il maggior contributo è dato dall'emissione di particolato <2,5µm, dovuto alla combustione del diesel. Per la categoria relativa all'acidificazione, invece, l'impatto è legato all'emissione degli ossidi d'azoto, che deriva principalmente dalla combustione del diesel e dalla produzione di acciaio secondario (come per le categorie di impatto dell'eutrofizzazione terrestre e marina e della formazione fotochimica d'ozono).

- Sia la categoria d'impatto inerente la tossicità umana (effetti non cancerogeni) che quella inerente l'ecotossicità dell'acqua dolce presentano impatti rilevanti legati allo smaltimento in discarica. Il maggior contributo agli impatti associati ad entrambe le categorie di impatto è dovuto alla presenza di Arsenico e Zinco nel percolato che si forma nella discarica dove vengono smaltiti gli scarti della fonderia (sono quindi correlati al recupero dei rifiuti metallici negli impianti di trattamento dei rifiuti C&D).
- L'impatto sull'eutrofizzazione dell'acqua dolce è nel suo complesso di segno negativo, in quanto il beneficio del riciclo riesce a compensare gli impatti legati al trasporto e allo smaltimento in discarica: per questa categoria di impatto, il maggior contributo al *saving* totale è rappresentato dall'evitato smaltimento in discarica dei residui derivati dalla produzione di acciaio primario.
- Nella categoria d'impatto che descrive la riduzione dello strato d'ozono, il maggior contributo agli impatti totali è dovuto al consumo di combustibile nei trasporti. Nel riciclo l'impatto è dato dall'emissione diretta di metano durante la produzione di acciaio secondario e dal consumo di gasolio; il beneficio deriva invece dall'evitata estrazione di materie prime.

### **Risultati complessivi**

In regione Lombardia, nel 2014, sono state gestite 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D misti non pericolosi dal cui trattamento di recupero sono stati prodotti aggregati riciclati misti; utilizzando questa informazione è possibile calcolare gli impatti totali associati all'intera gestione per le categorie di impatto ambientale, energetico e di consumo di sabbia e ghiaia considerate nell'analisi. In Tabella 115 sono riportati i risultati totali del sistema, da cui si evince che in regione Lombardia la gestione dei rifiuti C&D misti non pericolosi ha determinato un'emissione di 23.800 tonnellate di CO<sub>2,eq</sub>, ma anche un risparmio di risorse naturali di 4.390.000 tonnellate; bisogna sottolineare che tali risultati includono il beneficio dell'evitata estrazione di risorse naturali da cava, ma non quello associato all'evitato smaltimento in discarica (nel successivo paragrafo 3.1.2, in particolare nell'analisi dello scenario SG2, verrà approfondito il tema dell'evitata discarica).

È stato calcolato il volume di discarica risparmiato per il sistema LCA1, calcolato come il rapporto tra le 6.768.986 tonnellate di C&D avviati a recupero e il loro peso specifico ( $1.400^4$  kg/m<sup>3</sup>); le stime mostrano che, grazie al recupero di questo flusso di rifiuti, è possibile risparmiare 4.834.990 m<sup>3</sup> di discarica.

**Tabella 115.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di sabbia e ghiaia associati al sistema di gestione regionale dei rifiuti C&D non pericolosi nel 2014.

	Unità di misura	Totale
Categoria di impatto ambientale (ILCD):		
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	2,38E+07
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	6,5
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	51,3
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	35
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2.5eq</sub>	20.517,6
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	202.078
Acidificazione	moli H+eq	173.187
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	723.533
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-9.645
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	65.910
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,58E+09
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water, eq	144.420
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1.967
Impatto energetico (CED)	MJ	4,55E+08
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	4,34E+09

### 3.1.2 Scenari alternativi LCA1

#### 3.1.2.1 Analisi di diverse modalità di gestione

**SG1** In questo scenario è stato valutato come cambia l'impatto ambientale ed energetico del sistema nel momento in cui viene rimossa l'operazione di stoccaggio temporaneo dei rifiuti prima del loro invio a recupero o a smaltimento. La conseguenza dell'eliminazione di questo passaggio intermedio nella gestione dei rifiuti C&D è l'evitato consumo di gasolio associato alla movimentazione del materiale nelle piazzole di stoccaggio e la diminuzione dei trasporti secondari, che rappresentano il 16,5% dei trasporti diretti nello scenario base e si riducono al 3,9% nello scenario SG1. In Tabella 116 è riportato il confronto tra gli impatti derivanti dal sistema SG1 e quelli dello scenario attuale per la gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuto misto C&D in regione. I risultati mostrano che l'eliminazione dello stoccaggio comporta una diminuzione

<sup>4</sup> Il valore assunto come peso specifico per le macerie in ingresso agli impianti di recupero ricade nel range di letteratura indicato per questi rifiuti (Bressi – ANPAR, Mukesh et al. 2004, Piano per la gestione delle macerie e rocce da scavo derivanti dagli interventi di prima emergenza e ricostruzione (Repubblica italiana), Programma provinciale attività estrattive; Norme per il recupero e riutilizzo di inerti da demolizione (Prov. Pesaro Urbino)).

degli impatti ed un risparmio della risorsa energetica, sebbene la riduzione risulti contenuta rispetto allo scenario attuale (range di riduzione 0,1-10,2%): ad esempio, per il riscaldamento globale si registra un impatto ridotto del 10,2%, per l'acidificazione del 7,2%, per la formazione fotochimica dell'ozono del 6,8%, etc. Il risparmio di risorse naturali di sabbia e ghiaia relativo al recupero rimane pressoché invariato in quanto in questo scenario non è stata modificata la fase di recupero e la produzione di aggregati riciclati; il piccolo beneficio che si registra nello scenario SG1 rispetto allo scenario attuale (0,1%) è dovuto alla riduzione dei trasporti secondari che influenza il consumo di risorsa naturale per la costruzione delle infrastrutture stradali. La rimozione della fase di stoccaggio non consente quindi di ridurre in modo sostanziale gli impatti totali e bilanciare il carico ambientale dovuto al trasporto per il conferimento dei rifiuti agli impianti.

**SG2** Lo scenario SG2 evidenzia quali sarebbero gli impatti ambientali nel caso in cui il rifiuto C&D venisse interamente smaltito in discarica. Dai risultati mostrati in Tabella 117 emerge un netto peggioramento delle prestazioni del sistema per tutte le categorie di impatto ambientale e per l'impatto energetico, che presenta valori decisamente maggiori rispetto allo scenario attuale: ad esempio, per la categoria riscaldamento globale l'impatto aumenta da  $2,38E+07$  kgCO<sub>2,eq</sub> dello scenario base a  $8,01E+07$  kgCO<sub>2,eq</sub> dello scenario SG2; per la categoria riduzione dello strato d'ozono l'impatto passa da 6,5 kgCFC-11<sub>eq</sub> a 21,6 kgCFC-11<sub>eq</sub> nello scenario in cui tutto il rifiuto è smaltito in discarica. L'indicatore riferito al consumo di sabbia e ghiaia nello scenario SG2 diventa un impatto in segno positivo, dovuto alla costruzione della discarica e della rete infrastrutturale per i trasporti, in quanto viene a mancare il beneficio derivante dalla produzione e vendita degli aggregati riciclati ( $4,34E+09$  kg nello scenario base).

SG2 può essere visto anche come uno scenario che quantifica l'ordine di grandezza degli impatti che si evitano quando, al posto di essere inviati a smaltimento, i rifiuti vengono sottoposti ad azioni di recupero. Se la discarica venisse conteggiata come impatto evitato all'interno dello scenario attuale, i benefici del riciclo aumenterebbero molto, riuscendo a bilanciare gli impatti del sistema dovuti ai trasporti. Nell'ultima colonna della Tabella 117 sono riportati gli impatti sul sistema che si avrebbero considerando la discarica evitata, calcolati come differenza tra gli impatti dello scenario base e quelli dello scenario SG2, da cui si evince che per tutte le categorie di impatto, tranne che per la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), i benefici derivanti dal riciclo compenserebbero gli impatti in segno positivi.

**Tabella 116.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SG1 e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario SG1	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	2,14E+07	2,38E+07	-10,2%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	6,01E+00	6,49E+00	-7,4%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	50,7	51,3	-1,0%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	34,9	35,0	-0,2%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	1,89E+04	2,05E+04	-7,8%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	1,88E+05	2,02E+05	-6,8%
Acidificazione	moli H+eq	1,61E+05	1,73E+05	-7,2%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	6,78E+05	7,24E+05	-6,3%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-9,79E+03	-9,64E+03	-1,5%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	6,17E+04	6,59E+04	-6,3%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,57E+09	1,58E+09	-0,9%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,44E+05	1,44E+05	-0,3%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,86E+03	1,97E+03	-5,3%
Impatto energetico (CED)	MJ	4,13E+08	4,55E+08	-9,3%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-4,28E+09	-4,28E+09	-0,1%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

**Tabella 117.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SG2 e nello scenario attuale; nell'ultima colonna sono indicati i valori degli impatti nel caso in cui venga considerato nello scenario attuale l'evitato smaltimento in discarica.

	Unità di misura	Scenario SG2	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>	Scenario attuale (con discarica evitata)
Categoria di impatto ambientale (ILCD):					
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	8,01E+07	2,38E+07	236%	-5,63E+07
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	21,6	6,49E+00	233%	-1,52E+01
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	1301	51,3	2.437%	-1,25E+03
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	24,0	35,0	-31%	1,09E+01
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	6,45E+04	2,05E+04	214%	-4,40E+04
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	5,53E+05	2,02E+05	174%	-3,51E+05
Acidificazione	moli H+eq	5,81E+05	1,73E+052	235%	-4,08E+05
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	1,87E+06	7,24E+05	158%	-1,14E+06
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	2,14E+04	-9,64E+03	322%	-3,11E+04
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	1,72E+05	6,59E+04	160%	-1,06E+05
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	2,82E+10	1,58E+09	1.683%	-2,66E+10
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water, eq	3,06E+05	1,44E+05	112%	-1,62E+05
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	4,07E+03	1,97E+03	107%	-2,10E+03
Impatto energetico (CED)	MJ	2,13E+09	4,55E+08	368%	-1,68E+09
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	1,23E+09	-4,28E+09	129%	-5,51E+09

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### **3.1.2.2 *Analisi di diverse tecnologie di recupero***

Negli scenari alternativi SR1 e SR2 si è ipotizzato che i rifiuti inviati a recupero (pari al 96,7% di una tonnellata di rifiuti C&D gestiti in regione) vengano trattati interamente in impianti alimentati ad energia elettrica, nel caso dello scenario SR1, oppure che vengano recuperati interamente in impianti alimentati a gasolio, nello scenario SR2.

Prima di soffermarsi sugli scenari SR1 e SR2, poiché i rifiuti avviati a recupero sono trattati per la maggior parte in impianti alimentati a gasolio (86,1%) e in misura minore in impianti alimentati ad energia elettrica (13,9%), si è deciso di mettere a confronto le due tipologie di impianto per capire quale tecnologia permette di ottenere le migliori prestazioni ambientali. In Tabella 118 sono mostrati gli impatti associati ad una tonnellata di rifiuto C&D trattata in impianti alimentati ad energia elettrica rispetto al trattamento della medesima quantità in impianti a gasolio. Nell'ultima colonna è riportata la differenza che intercorre tra le due tipologie di impianti, calcolata in termini percentuali rispetto al valore dell'indicatore ottenuto per gli impianti alimentati ad energia elettrica. Dal confronto emerge chiaramente che gli impianti ad energia elettrica risultano più vantaggiosi sia dal punto di vista ambientale che energetico, ad eccezione delle categorie di impatto relative all'eutrofizzazione in acqua dolce e all'impoverimento delle risorse idriche: nel primo caso, questo è dovuto al fatto che negli impianti a gasolio c'è un beneficio maggiore legato all'evitata produzione di acciaio primario grazie ad un quantitativo maggiore di metalli ferrosi separati dal trattamento. Nel caso dell'impoverimento delle risorse idriche, invece, l'impatto maggiore degli impianti ad energia elettrica è da ricondurre alla produzione di elettricità da fonte idroelettrica (assente negli impianti a gasolio). Inoltre, per gli impianti alimentati ad energia elettrica, in quasi tutti gli indicatori gli impatti connessi alle operazioni di recupero sono compensati dagli impatti evitati ed è pertanto possibile ottenere maggiori benefici, rispetto agli impianti mobili a gasolio. Le uniche categorie per le quali non si riscontra un beneficio ambientale sono la tossicità umana cancerogena, a causa degli impatti associati all'utilizzo della lega di acciaio-manganese per la sostituzione delle mascelle nei mulini di macinazione e alla produzione di acciaio secondario, l'ecotossicità in acqua dolce (sempre legata alla produzione di acciaio secondario) e l'impoverimento delle risorse idriche. Inoltre, gli impianti ad energia elettrica consentono anche di ottenere un maggiore risparmio di risorse minerali naturali, essendo l'efficienza di trattamento e quindi la produzione di aggregati riciclati leggermente superiore rispetto a quella degli impianti alimentati a gasolio; come riportato in Tabella 118, la quantità e tipologia di aggregati riciclati prodotti da 1 tonnellata di C&D trattati in impianti alimentati ad energia elettrica consente di evitare l'estrazione di 648,7 kg di risorse naturali (sabbia e ghiaia) contro 642,4 kg per gli impianti alimentati a gasolio. L'indicatore energetico CED risulta minore negli impianti alimentati ad energia elettrica in quanto questi impianti sono più efficienti dal punto di vista energetico: infatti, sommando i contributi di consumo di energia elettrica e gasolio negli impianti alimentati ad energia elettrica si ottiene un CED pari a 14 MJ, mentre negli impianti a gasolio il consumo di combustibile porta ad avere un impatto energetico maggiore, pari a 22 MJ. Negli impianti alimentati a gasolio, inoltre, il maggior consumo di risorsa energetica è dovuto anche al trasporto in discarica degli scarti

del trattamento e al loro smaltimento, processi non presenti nel caso degli impianti alimentati ad energia elettrica dove non si producono scarti.

**Tabella 118.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di consumo di risorsa minerale naturale (sabbia e ghiaia) associati al trattamento di una tonnellata di rifiuto C&D in impianti di trattamento alimentati ad energia elettrica (EE) e a gasolio; differenza percentuale degli indicatori calcolata rispetto alle prestazioni degli impianti a EE.

	Unità di misura	Impianto ad EE	Impianto a gasolio	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	-1,60	-1,02	36%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	-1,02E-07	7,36E-08	172%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	-1,37E-07	2,46E-07	280%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	4,62E-06	4,96E-06	7%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	-7,70E-04	6,40E-04	183%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	-6,73E-03	9,00E-03	234%
Acidificazione	moli H+eq	-5,76E-03	4,30E-03	175%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	-2,01E-02	3,84E-02	292%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,66E-03	-1,90E-03	-14%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	-1,86E-03	3,46E-03	286%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	59,22	70,45	19%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	2,17E-02	1,90E-02	-13%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	-8,42E-05	-8,36E-05	0,7%
Impatto energetico (CED)	MJ	-22,6	-13,8	39%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-648,7	-642,4	1%

<sup>(1)</sup> Calcolata rispetto al trattamento in impianti a EE.

Ampliando la trattazione all'intero contesto regionale di gestione dei C&D, in Tabella 119 e in Tabella 120, vengono mostrati i risultati degli scenari SR1 e SR2 a confronto con lo scenario attuale. Dai risultati dello scenario SR1 si osserva un generale miglioramento delle prestazioni del sistema con una riduzione degli impatti ambientali e dell'impatto energetico nel caso di utilizzo di soli impianti alimentati ad energia elettrica per il recupero dei C&D. I maggiori benefici si registrano per l'eutrofizzazione terrestre (-47%) e marina (-47%), per la formazione fotochimica di ozono (-45%) e l'assunzione di particolato (-40%). Tuttavia, si sottolinea che i miglioramenti ottenuti in termini di impatti assoluti risultano ancora modesti, a causa del limitato contributo derivante dal riciclo rispetto agli impatti indotti dal trasporto dei rifiuti. Si nota anche un leggero aumento dell'impatto legato all'impoverimento delle risorse idriche (+11%), maggiore nello scenario SR1 rispetto allo scenario attuale, a causa del consumo di energia elettrica più elevato. Invece, dal confronto tra i risultati dello scenario SR2 e lo scenario attuale, calcolati considerando il quantitativo totale di rifiuti C&D gestiti in regione (6.999.986 tonnellate) emerge che, se tutti i rifiuti venissero trattati in impianti

alimentati a gasolio, gli impatti sull'ambiente e l'impatto energetico aumenterebbero, sebbene in misura piuttosto contenuta, in quanto già nello scenario attuale la maggior parte dei rifiuti viene trattata in impianti di questa tipologia (l'86,1% del totale gestito); per lo stesso motivo anche il risparmio di sabbia e ghiaia è di poco inferiore rispetto allo scenario base (variazione dello 0,1%).

Da questa analisi si evince che la tecnologia ambientalmente più sostenibile è quella che vede l'utilizzo di impianti a energia elettrica per effettuare il trattamento di riciclo dei C&D. Questi impianti, a fronte di un investimento iniziale più consistente rispetto a quello che occorre per un impianto alimentato a gasolio, hanno però un layout più articolato e permettono di effettuare una lavorazione più spinta del materiale in ingresso, particolarmente vantaggiosa nei casi in cui non vengano applicate procedure di demolizione selettiva in cantiere e il rifiuto in ingresso contenga molte impurità. Quindi, con l'obiettivo di produrre aggregati riciclati di qualità migliore e di ridurre gli impatti ambientali indotti dal trattamento di riciclo, una possibile azione che si può intraprendere è quella di favorire o incentivare l'autorizzazione e realizzazione di impianti fissi ad energia elettrica.

**Tabella 119.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di consumo di sabbia e ghiaia legato al trattamento di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SR1 e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario SR1	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	2,05E+07	2,38E+07	-14%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	5,5	6,5	-16%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	49,0	51,3	-4%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	33	35	-6%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	1,23E+04	2,05E+04	-40%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	1,10E+05	2,02E+05	-45%
Acidificazione	moli H+eq	1,15E+05	1,73E+05	-34%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	3,83E+05	7,24E+05	-47%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-8,28E+03	-9,64E+03	14%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	3,49E+04	6,59E+04	-47%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,52E+09	1,58E+09	-4%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,60E+05	1,44E+05	11%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,96E+03	1,97E+03	-0,2%
Impatto energetico (CED)	MJ	4,03E+08	4,55E+08	-11%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-4,32E+09	-4,28E+09	-0,9%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

**Tabella 120.** Confronto degli impatti ambientali, dell’impatto energetico e dell’indicatore di consumo di sabbia e ghiaia legato al trattamento di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SR2 e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario SR2	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	2,44E+07	2,38E+07	2,3%
Riduzione dello strato d’ozono	kgCFC-11eq	6,7	6,5	2,5%
Tossicità per l’uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	51,6	51,3	0,7%
Tossicità per l’uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	35,3	35,0	0,9%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	2,18E+04	2,05E+04	6,5%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	2,17E+05	2,02E+05	7,3%
Acidificazione	moli H+eq	1,83E+05	1,73E+05	5,5%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	7,79E+05	7,24E+05	7,6%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-9,86E+03	-9,64E+03	-2,3%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	7,09E+04	6,59E+04	7,6%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,59E+09	1,58E+09	0,7%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water, eq	1,42E+05	1,44E+05	-1,8%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,97E+03	1,97E+03	0,03%
Impatto energetico (CED)	MJ	4,63E+08	4,55E+08	1,8%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-4,27E+09	-4,28E+09	0,1%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

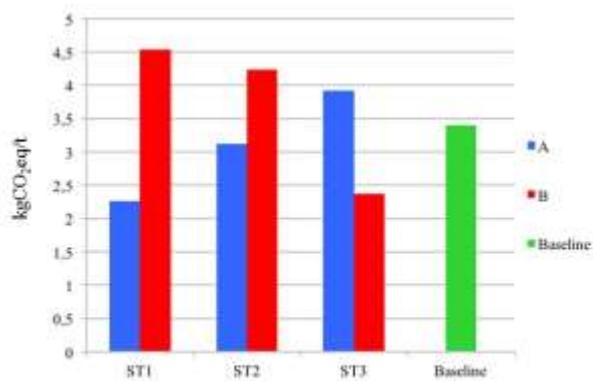
### 3.1.2.3 Analisi dei trasporti

In questo paragrafo sono riportati i risultati dell’analisi di sensitività effettuata variando la distanza di trasporto per il conferimento dei rifiuti agli impianti della regione e la distanza di commercializzazione degli aggregati riciclati e della vendita degli aggregati naturali. Nello scenario ST1 la distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti associata ai flussi diretti e secondari varia tra 20 e 35 km (distanza assunta pari a 27,5 km nello scenario attuale). Quando viene applicato il minimo valore del range (scenario ST1<sub>A</sub>), si ha una riduzione degli impatti ambientali e dell’impatto energetico, riduzione che però non risulta essere sufficiente per avere dei benefici complessivi (impatti in segno negativo) nella maggior parte delle categorie di impatto ambientale e nell’impatto energetico, come mostrato in Figura 33 (barra blu) e in Tabella 121: ad esempio, la categoria di impatto per cui si registra il maggior vantaggio è quella del riscaldamento globale, che passa da un impatto di 3,40 kgCO<sub>2,eq</sub>/t nello scenario base a 2,27 kgCO<sub>2,eq</sub>/t nello scenario ST1<sub>A</sub>, portando un beneficio complessivo al sistema pari al 33%. Al contrario, assumendo una distanza media di conferimento pari a 35 km (ST1<sub>B</sub>) si evidenzia un netto peggioramento delle prestazioni del sistema, particolarmente evidenti per le categorie di impatto riscaldamento globale, riduzione dello strato di ozono e per l’impatto energetico (Figura 33 – barra rossa).

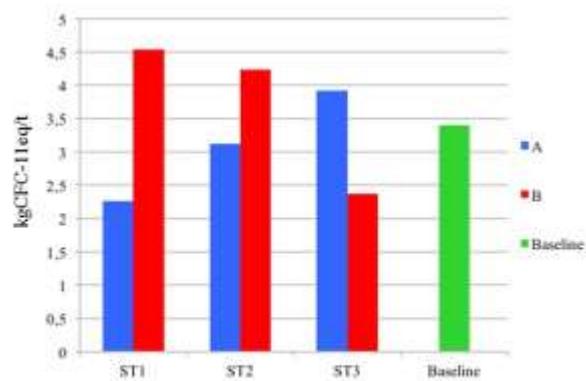
Alle stesse conclusioni si giunge anche effettuando l'analisi di sensitività nello scenario ST2 sulla distanza di vendita delle MPS, che varia tra i 10 e i 30 km (distanza pari a 15 km nello scenario attuale); in questo caso, applicando la minima distanza di vendita nello scenario ST2<sub>A</sub>, la riduzione degli impatti totali è minore rispetto alla riduzione osservata nello scenario ST1<sub>A</sub> e pertanto non risulta sufficiente per avere evidenti benefici sul sistema (Figura 33 – Tabella 121). Prendendo come esempio la categoria di impatto legata alla riduzione dello strato di ozono, nello scenario ST1<sub>A</sub> si ha una riduzione degli impatti pari al 23% rispetto allo scenario attuale, mentre nello scenario ST2<sub>A</sub> la riduzione degli impatti risulta essere del 6% rispetto allo scenario attuale.

Nello scenario ST3 la distanza di vendita del mistone naturale viene fatta variare tra un minimo di 30 km e un massimo di 60 km (distanza pari a 40 km nello scenario attuale): siccome la vendita di materiale vergine è un impatto evitato, il maggior beneficio sul sistema si ha quando si sostituisce la vendita di mistone naturale sulle distanze maggiori, cioè 60 km, nello scenario ST3<sub>B</sub>. Il beneficio complessivo sul sistema dello scenario ST3<sub>B</sub>, però, è minore rispetto a quello dello scenario ST1<sub>A</sub>; infatti, anche se la distanza di vendita del mistone naturale nello scenario ST3<sub>B</sub> (60 km) è maggiore rispetto alla distanza di conferimento dei rifiuti nello scenario ST1<sub>A</sub> (20 km), la quantità di mistone naturale di cui si evita il trasporto è il 61,7% di una tonnellata in ingresso al sistema di recupero, mentre il conferimento dei rifiuti si applica all'intera tonnellata nei trasporti diretti cui si somma il 16,5% associato ai trasporti secondari.

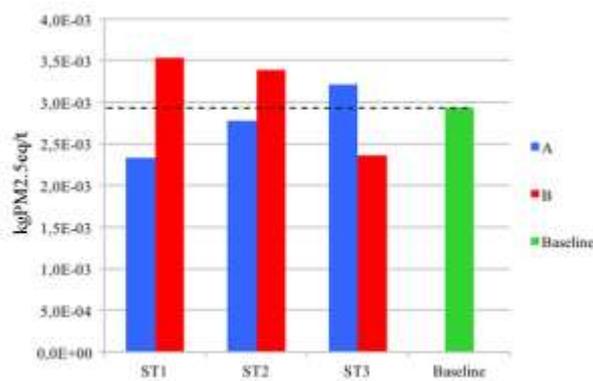
Da queste analisi di sensitività emerge che gli impatti ambientali ed energetici relativi ai trasporti sono legati prevalentemente alla distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti in regione (ST1), scenario che presenta infatti il maggior range di variazione in ciascuna categoria di impatto (Figura 33 – Tabella 121); nel sistema regionale, quindi, porterebbe ad un beneficio complessivo sia l'eliminazione dei flussi intermedi da un impianto all'altro, in quanto diminuirebbe la quantità di rifiuti trasportati, sia la riduzione delle distanze di trasporto dai cantieri agli impianti. L'ottimizzazione del sistema di trasporto appare quindi un aspetto chiave nell'ottica di un miglioramento delle prestazioni ambientali del sistema.



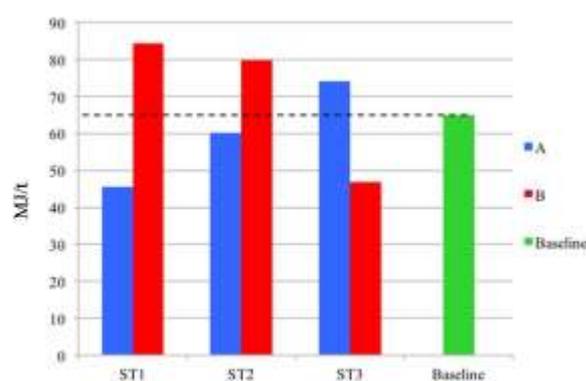
(a) Riscaldamento globale



(b) Riduzione dello strato di ozono



(c) Assunzione di material particolato



(d) Impatto energetico

**Figura 33.** Confronto di alcuni impatti associati al sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti C&D negli scenari ST1, ST2 e ST3 rispetto allo scenario attuale (“baseline” – barra verde).

**Tabella 121.** Risultati degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia degli scenari ST1, ST2 e ST3 associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D.

Categoria di impatto ambientale (ILCD):	Unità di misura	Scenario ST1		Scenario ST2		Scenario ST3	
		ST1 <sub>A</sub>	ST1 <sub>B</sub>	ST2 <sub>A</sub>	ST2 <sub>B</sub>	ST3 <sub>A</sub>	ST3 <sub>B</sub>
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	1,59E+07	3,18E+07	2,19E+07	2,97E+07	2,74E+07	1,66E+07
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	5,0	8,0	6,1	7,7	7,2	5,0
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	49,3	53,2	50,8	52,7	52,1	49,5
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	34,7	35,2	34,9	35,1	35,1	34,8
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	1,63E+04	2,47E+04	1,94E+04	2,37E+04	2,25E+04	1,65E+04
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	1,65E+05	2,40E+05	1,94E+05	2,28E+05	2,18E+05	1,70E+05
Acidificazione	moli H+eq	1,36E+05	2,10E+05	1,65E+05	1,98E+05	1,88E+05	1,43E+05
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	6,00E+05	8,47E+05	6,97E+05	8,03E+05	7,73E+05	6,25E+05
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,03E+04	-9,01E+03	-9,77E+03	9,28E+03	-9,42E+03	1,01E+04
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	5,46E+04	7,73E+04	6,35E+04	7,32E+04	7,04E+04	5,69E+04
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,53E+09	1,63E+09	1,57E+09	1,62E+09	1,61E+09	1,54E+09
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,43E+05	1,45E+05	1,44E+05	1,46E+05	1,45E+05	1,43E+05
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,29E+03	2,64E+03	1,87E+03	2,25E+03	2,14E+03	1,62E+03
Impatto energetico (CED)	MJ	3,20E+08	5,90E+08	4,21E+08	5,58E+08	5,18E+08	3,28E+08
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) <sup>(1)</sup>	kg	-4,29E+09	-4,27E+09	-4,28E+09	4,27E+09	-4,27E+09	4,29E+09

<sup>(1)</sup> L'indicatore relativo al consumo di sabbia e ghiaia rimane pressoché invariato rispetto allo scenario attuale, aumentando e diminuendo di una minima quantità come conseguenza del consumo di risorsa naturale per la costruzione delle infrastrutture stradali.

### 3.1.2.4 *Analisi dei rapporti di sostituzione*

**SR** In questo scenario è stata condotta un'analisi di sensitività facendo variare il parametro  $M$  che tiene conto del mercato degli aggregati riciclati in regione e con cui viene calcolato il fattore di sostituzione tra aggregati riciclati e materie prime vergini. Rispetto al valore di  $M$  assunto nello scenario base, pari a 0,67, i due casi estremi si ottengono assegnando  $M=0$  (scenario  $SR_A$ ), che rappresenta l'assenza di mercato e dunque il caso peggiore in cui non si hanno impatti evitati, e  $M=1$  (scenario  $SR_B$ ), che rappresenta la situazione ottimale in cui il mercato è solido e gli impianti di recupero riescono a vendere senza problemi tutta l'MPS prodotta per cui si ottiene il massimo beneficio dal riciclo. Nel primo caso ( $SR_A$ ) i fattori di sostituzione  $S_1$  e  $S_2$  risultano nulli, il che implica che non avviene nessuna sostituzione del materiale riciclato con il mistone naturale. Di conseguenza tutti gli impatti sul sistema sono maggiori rispetto a quelli dello scenario base e non si evidenziano benefici collegati al risparmio di risorsa naturale. Nel secondo caso ( $SR_B$ ), invece,  $S_1$  e  $S_2$  assumono i rispettivi valori massimi (ovvero 0,97 e 0,86), il che significa che i benefici associati alle azioni di recupero raggiungono i valori più elevati.

In Tabella 122 e Tabella 123 sono mostrati gli impatti degli scenari  $SR_A$  e  $SR_B$ , confrontati con lo scenario base associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D in regione, mentre i risultati riportati in Figura 34 si riferiscono ad una tonnellata di rifiuto gestito; in Figura 34 sono rappresentate le categorie di impatto ambientale ritenute più significative (per le quali si riscontra un'ampia variabilità passando dallo scenario attuale allo scenario  $SR_A$  e allo scenario  $SR_B$  oppure, come per l'eutrofizzazione in acqua dolce, l'impatto presenta un beneficio netto nello scenario attuale), l'impatto energetico e il consumo di risorsa minerale naturale (sabbia e ghiaia). Dai risultati emerge che, ad esempio, il riscaldamento globale passa da 3,40 kgCO<sub>2,eq</sub>/t nello scenario attuale a 5,37 kgCO<sub>2,eq</sub>/t nello scenario  $SFA$  e a 2,43 kgCO<sub>2,eq</sub>/t nello scenario  $SFB$ ; il risparmio di risorse naturali legate all'estrazione di mistone naturale, pari a 620 kg/t nello scenario attuale, passa da 0 nello scenario  $SFA$  a 926 kg/t nello scenario  $SR_B$ . Sebbene con l'aumento del coefficiente di mercato (scenario  $SFB$ ) non si ottenga un beneficio complessivo degli impatti, si osserva comunque un miglioramento significativo delle prestazioni rispetto allo scenario base per le categorie di impatto del riscaldamento globale (riduzione del 29%), della riduzione dello strato d'ozono (riduzione del 20%), dell'assunzione di materiale particolato (riduzione del 28%), diviene ancor più evidente per quanto riguarda il risparmio di sabbia e ghiaia (risparmio del 50% di risorse in  $SR_B$ ). L'aumento del fattore di mercato non riesce comunque ad equilibrare gli impatti derivanti dal conferimento dei rifiuti; infatti, l'unica categoria di impatto ambientale che riporta un beneficio per l'ambiente (valore negativo) è l'eutrofizzazione in acqua dolce, come nello scenario base.

**Tabella 122.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SR<sub>A</sub> (M=0) e nello scenario attuale.

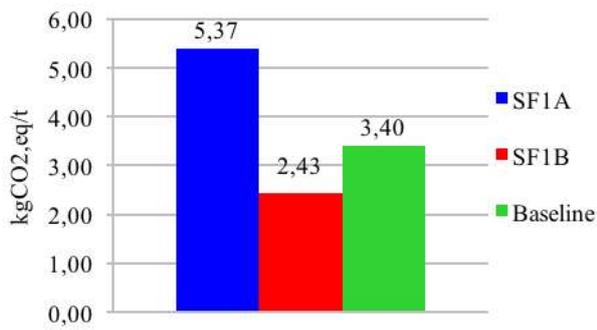
	Unità di misura	Scenario SR <sub>A</sub>	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	3,76E+07	2,38E+07	58%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	9,2	6,5	58%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	53,6	51,3	5%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	35,3	35,0	1,0%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	3,21E+04	2,05E+04	56%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	3,10E+05	2,02E+05	54%
Acidificazione	moli H+eq	2,64E+05	1,73E+05	53%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	1,10E+06	7,24E+05	52%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-8,87E+03	-9,64E+03	8%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	1,00E+05	6,59E+04	52%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,64E+09	1,58E+09	4%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,46E+05	1,44E+05	1,3%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	2,40E+03	1,97E+03	22%
Impatto energetico (CED)	MJ	6,87E+08	4,55E+08	51%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	7,64E+07	-4,28E+09	102%

<sup>(1)</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

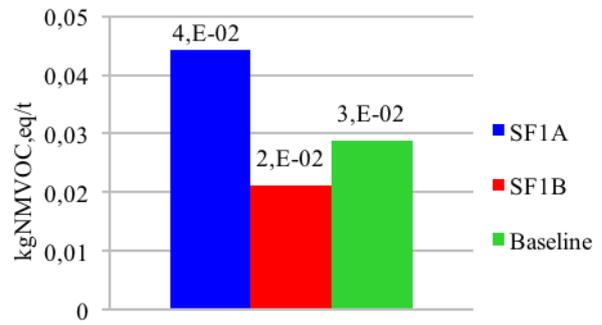
**Tabella 123.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SR<sub>B</sub> (M=1) e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario SR <sub>B</sub>	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	1,70E+07	2,38E+07	-29%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	5,2	6,5	-20%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	50,1	51,3	-2%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	34,8	35,0	-0,5%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	1,48E+04	2,05E+04	-28%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	1,49E+05	2,02E+05	-26%
Acidificazione	moli H+eq	1,28E+05	1,73E+05	-26%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	5,38E+05	7,24E+05	-26%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,00E+04	-9,64E+03	-4%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	4,89E+04	6,59E+04	-26%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,55E+09	1,58E+09	-2%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,44E+05	1,44E+05	-0,6%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,75E+03	1,97E+03	-11%
Impatto energetico (CED)	MJ	3,41E+08	4,55E+08	-25%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-6,43E+09	-4,28E+09	-50%

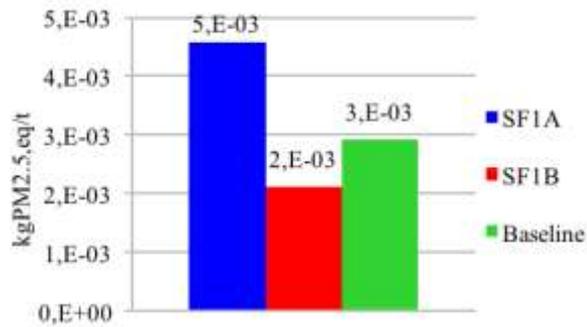
<sup>(1)</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.



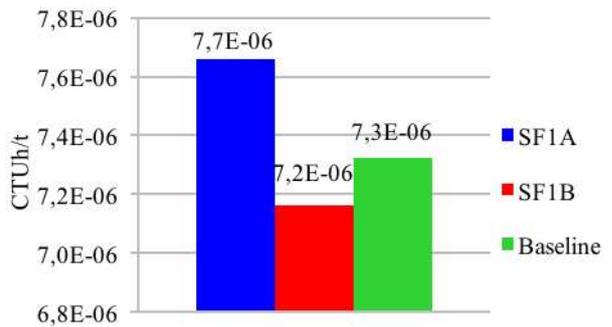
(a) Riscaldamento globale



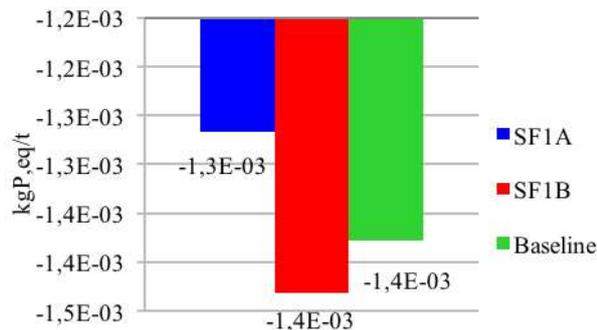
(b) Formazione fotochimica di ozono



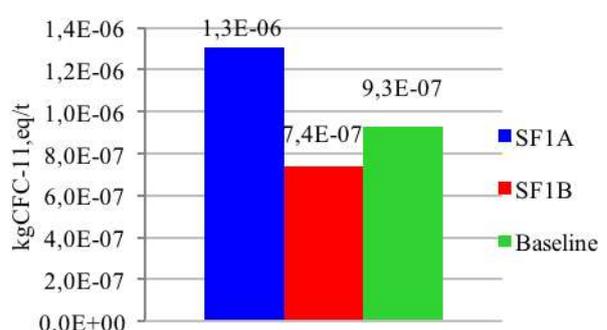
(c) Assunzione di particolato



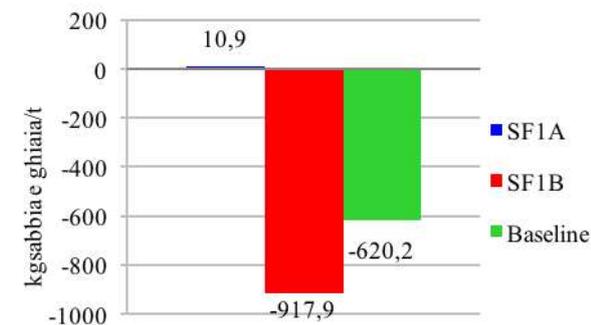
(d) Tossicità umana (effetti non cancerogeni)



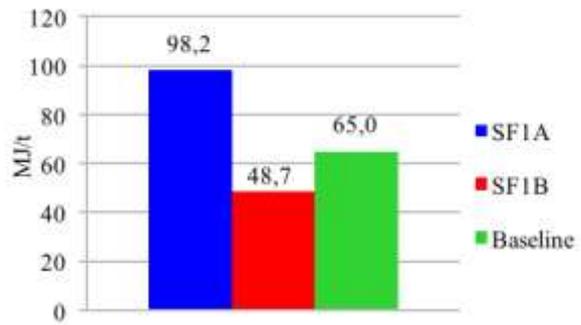
(e) Eutrofizzazione acqua dolce



(f) Riduzione dello strato di ozono



(g) Consumo di sabbia e ghiaia



(h) Impatto energetico

**Figura 34.** Confronto di alcuni degli indicatori associati al sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti C&D negli scenari SR<sub>A</sub> (barra blu), SR<sub>B</sub> (barra rossa) e attuale (“baseline”: barra verde).

**SM** In Tabella 124 si riportano i risultati della valutazione LCA del sistema di gestione regionale relativi ad una tonnellata di rifiuto C&D ottenuti variando il metodo di calcolo per il rapporto di sostituzione; in questa analisi, dunque, è stato assunto un unico valore del rapporto di sostituzione per entrambe le applicazioni degli aggregati riciclati pari a  $S=0,37$ , calcolato come rapporto tra il prezzo di mercato degli aggregati riciclati e quello del mistone naturale. Siccome la variazione del fattore di sostituzione influenza soltanto i risultati del riciclo, in Tabella 124 sono riportati gli impatti ambientali, l'impatto energetico e il consumo di sabbia e ghiaia legati al trattamento dei rifiuti negli impianti di recupero, considerando che gli impatti associati agli altri processi risultano invariati e pari a quanto già mostrato in Tabella 114. Essendo il valore assunto per  $S$  minore rispetto a quello ottenuto con il metodo implementato nello scenario attuale ( $S_1=0,65$  per applicazioni in C1/C2 e  $S_2=0,58$  per applicazioni in C4), i benefici complessivi del riciclo risultano minori e quindi tutte le categorie di impatto presentano valori degli indicatori maggiori. Bisogna sottolineare che questo metodo per il calcolo del rapporto di sostituzione ha delle forti limitazioni, in quanto i prezzi di vendita degli aggregati riciclati e naturali presentano ampie fluttuazioni passando da una zona all'altra della regione e il mercato è molto variabile anche con il periodo; pertanto, i risultati ottenuti non sono stati presi come riferimento per rappresentare l'attuale situazione in regione Lombardia, ma per avere un'indicazione qualitativa dell'influenza di tale parametro sui risultati dell'analisi LCA. In particolare, riducendo del 40% il valore del rapporto di sostituzione (da 0,62, media pesata di  $S_1$  e  $S_2$  rispetto all'MPS prodotta, a 0,37), alcune categorie di impatto, come il riscaldamento globale, la riduzione dell'ozono, l'assunzione di particolato e l'acidificazione, mostrano un peggioramento significativo con una variazione che va dal 100% ad oltre il 450%. Questo mette in evidenza il ruolo chiave di questo parametro nell'ambito della presente analisi di LCA.

**Tabella 124.** Confronto degli impatti ambientali, energetici e del consumo di risorsa minerale naturale (sabbia e ghiaia) relativi al trattamento di una tonnellata di rifiuto C&D negli impianti di riciclo (13,9% alimentati ad energia elettrica e 86,1% alimentati a gasolio) nello scenario SM e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario SM (S=0,37)	Scenario attuale (S <sub>1</sub> =0,65; S <sub>2</sub> =0,58)	Differenza <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	0,07	-1,06	107%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	2,69E-07	4,76E-08	465%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	4,02E-07	1,86E-07	116%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	4,78E-06	4,75E-06	1%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	1,28E-03	4,29E-04	199%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	1,43E-02	6,59E-03	117%
Acidificazione	moli H+eq	9,48E-03	2,80E-03	238%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	0,06	0,03	90%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,74E-03	-1,80E-03	4%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	5,04E-03	2,63E-03	92%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	72,28	66,62	9%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,89E-02	1,87E-02	1%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	3,93E-05	-8,10E-05	51%
Impatto energetico (CED)	MJ	4,8	-14,5	133%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-370	- 620	40%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

Il rapporto di sostituzione S varia tra un valore minimo di 0, che si riferisce alla situazione in cui gli aggregati riciclati vengono ceduti gratuitamente ai clienti, ad un massimo di 0,8, corrispondente al rapporto tra il prezzo massimo di vendita degli aggregati riciclati dichiarato dai gestori degli impianti visitati (4,2 €/t) e il prezzo medio del mistone naturale, risultato dall'analisi delle statistiche cave regionali (5,26 €/t). Lo scenario SM<sub>A</sub> in cui S vale 0 risulta del tutto analogo allo scenario SR<sub>A</sub>, in quanto il rapporto di sostituzione si annulla e non avviene la sostituzione tra aggregati riciclati e naturali; pertanto i risultati sono i medesimi della Tabella 122. Quello che varia rispetto allo scenario SR è la condizione ottimale che il sistema può raggiungere nel caso in cui si utilizzi il metodo basato sui prezzi di mercato per la stima del rapporto di sostituzione; infatti, utilizzando S=0,8 nello scenario SM<sub>B</sub> si ottengono impatti minori rispetto allo scenario base SM in cui si è utilizzato S=0,37, ma impatti maggiori rispetto allo scenario SR<sub>B</sub> in cui S<sub>1</sub>=0,97 e S<sub>2</sub>=0,86. Anche in questo caso però, l'aumento dei benefici associati al riciclo non riesce a bilanciare gli impatti associati al trasporto dei rifiuti. I risultati associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D sono mostrati in Tabella 125.

Dalle analisi di sensitività è emerso che il metodo impiegato per il calcolo del rapporto di sostituzione in un'analisi di LCA può influenzare in modo significativo i risultati finali, sia per lo scenario base sia per

quello ottimale a cui può tendere il sistema, in termini di massimo beneficio ottenibile dalla sostituzione tra materiali riciclati e vergini.

**Tabella 125.** Confronto degli impatti ambientali, energetici e del consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SM<sub>B</sub> e nello scenario SM (in cui il rapporto di sostituzione è calcolato come rapporto tra i prezzi di vendita degli aggregati riciclati e del mistone naturale ed è S=0,37).

	Unità di misura	Scenario SM <sub>B</sub>	Scenario SM	Differenza <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	1,82E+07	3,18E+07	-43%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	5,38	8,04	-33%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	50,19	52,78	-5%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	34,82	35,17	-1,0%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	1,62E+04	2,65E+04	-39%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	1,63E+05	2,56E+05	-36%
Acidificazione	moli H+eq	1,40E+05	2,20E+05	-36%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	5,91E+05	9,08E+05	-35%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-9,97E+03	-9,19E+03	-9%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	5,38E+04	8,28E+04	-35%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,55E+09	1,62E+09	-4%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	1,44E+05	1,46E+05	-1,4%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,76E+03	2,26E+03	-22%
Impatto energetico (CED)	MJ	3,58E+08	5,90E+08	-39%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-5,54E+09	-2,52E+09	-120%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SM.

### 3.1.2.5 Analisi di applicazioni alternative per gli aggregati riciclati

Nello scenario alternativo SA si ipotizza che gli impianti di recupero producano interamente aggregati riciclati di alta qualità, che vanno a sostituire nelle applicazioni tecnicamente possibili (calcestruzzi magri, fondazioni stradali, misti cementati) gli aggregati naturali di sabbia e ghiaia. I benefici dovuti all'utilizzo degli aggregati riciclati, in questo caso, saranno maggiori in quanto non si evita solamente l'estrazione del mistone naturale (come avviene nello scenario attuale) ma anche gli impatti associati alla sua lavorazione (dovuti ai consumi di energia elettrica, gasolio, acqua e acciaio). I dati di inventario inerenti la produzione di aggregati naturali sono già stati introdotti nel paragrafo 2.3.2.2 e sono stati implementati all'interno del software SimaPro al fine di creare un processo *ad hoc* per simulare la produzione di aggregati naturali. Nello scenario SA il fattore di sostituzione tra aggregati riciclati e aggregati naturali utilizzato è di 1:1 in massa, ipotizzando quindi che i materiali riciclati abbiano prestazioni del tutto analoghe a quelle dei materiali vergini (Q=1) e che il mercato di aggregati di maggiore qualità sia più solido rispetto a quello attuale (M=1).

Come mostrano i risultati in Tabella 126 associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti, lo scenario SA presenta le migliori prestazioni sia in termini di impatti sull'ambiente che in termini energetici rispetto agli scenari alternativi finora presentati (SG, ST, SF); infatti, tutti gli indicatori presentano una riduzione significativa rispetto allo scenario attuale, come ad esempio il riscaldamento globale (risparmio dell'82%), l'acidificazione (risparmio del 68%), la formazione fotochimica di ozono (risparmio del 53%), l'eutrofizzazione terrestre e quella marina (risparmio rispettivamente del 51% e del 52%); l'impatto energetico si riduce del 70%. Questi benefici sono il risultato dell'aumento del contributo degli impatti evitati, sia perché la produzione di aggregati naturali porta con sé impatti maggiori rispetto alla sola fase di estrazione del mistone, sia perché in queste applicazioni la sostituzione tra aggregati riciclati e naturali è 1:1 in massa. Di conseguenza, anche l'indicatore che stima il consumo di sabbia e ghiaia presenta un beneficio maggiore rispetto allo scenario attuale (ulteriore risparmio del 56% di sabbia e ghiaia), in quanto tutto il materiale riciclato prodotto sostituisce le risorse minerali. Anche se nello scenario SA tutti gli indicatori presentano una riduzione consistente degli impatti, solo la categoria dell'eutrofizzazione in acqua dolce presenta segno negativo (ovvero rappresenta un beneficio netto per l'ambiente), come nello scenario attuale; quindi anche la produzione di aggregati riciclati di alta qualità è un'azione che da sola non riesce a compensare gli impatti in segno positivo che gravano sul sistema.

**Tabella 126.** Confronto degli impatti ambientali, dell’impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D nello scenario SA e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario SA	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	4,28E+06	2,38E+07	-82%
Riduzione dello strato d’ozono	kgCFC-11eq	3,42	6,49	-47%
Tossicità per l’uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	48,35	51,27	-6%
Tossicità per l’uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	34,45	34,97	-1,5%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	7,21E+03	2,05E+04	-65%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	9,46E+04	2,02E+05	-53%
Acidificazione	moli H+eq	5,60E+04	1,73E+05	-68%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	3,53E+05	7,24E+05	-51%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,23E+04	-9,64E+03	27%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	3,18E+04	6,59E+04	-52%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,51E+09	1,58E+09	-5%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water, eq	8,47E+04	1,44E+05	-41%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	1,53E+03	1,97E+03	-22%
Impatto energetico (CED)	MJ	1,35E+08	4,55E+08	-70%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-6,68E+09	-4,28E+09	-56%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### 3.1.3 Scenario ideale LCA1

Sulla base dei risultati dall’analisi LCA mostrati nei paragrafi 3.1.1 e 3.1.2, è stato creato uno scenario ideale nell’ottica di comprendere quali sono le migliori prestazioni che il sistema in esame può raggiungere nel caso di una ottimizzazione di tutte le operazioni coinvolte nella gestione dei rifiuti C&D e degli utilizzi degli aggregati riciclati. Per la costruzione di tale scenario, quindi, sono stati assunti i valori ottimali dei principali parametri che influenzano gli impatti complessivi del sistema di gestione al fine di renderlo più sostenibile, sulla base di quanto ottenuto nelle varie analisi di sensitività effettuate. Pertanto, lo scenario ideale si basa sulle seguenti ipotesi:

- rimozione delle operazioni intermedie di stoccaggio del rifiuto;
- eliminazione dello smaltimento diretto in discarica, ovvero conferimento del 100% dei rifiuti prodotti in regione ad impianti di recupero;
- utilizzo di impianti di recupero alimentati unicamente ad energia elettrica;
- distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti di recupero pari a 20 km;
- distanza di vendita degli aggregati riciclati pari a 10 km;
- distanza di vendita degli aggregati naturali pari a 40 km (invariata rispetto allo scenario base);
- presenza di domanda e offerta per la vendita degli aggregati riciclati (M=1);

- produzione del 90% di aggregati riciclati di alta qualità destinati ad applicazioni di alto livello (possibili utilizzi in strati di fondazione, strati accessori e calcestruzzi a bassa resistenza), che sostituiscono la produzione di aggregati naturali con rapporto di sostituzione 1:1 in massa;
- produzione del 10% di aggregati riciclati di bassa qualità, costituiti dalla frazione più fine del rifiuto (ipotizzata non eliminabile) e destinati ad essere utilizzati in ripristini ambientali; essi sostituiscono l'estrazione di mistone naturale con rapporto di sostituzione  $S_2=Q*M$ , dove  $Q=0,86$  per l'applicazione in C4 e  $M=1$  per ipotesi del presente scenario.

Alcune delle ipotesi appena citate rendono questo scenario "ideale", in quanto non sono applicabili nel contesto regionale nel breve periodo, mentre altre sono potenzialmente realizzabili. Una prima considerazione può essere fatta sulla tipologia di impianti di recupero: ad oggi, in regione gli impianti alimentati a gasolio rappresentano la tecnologia più diffusa, quindi è difficile pensare che in un futuro prossimo si possano avere sul territorio il 100% degli impianti alimentati ad energia elettrica. Anche l'ipotesi per cui il quantitativo maggiore di aggregati riciclati prodotti è di alta qualità, lasciando ad applicazioni di più basso livello solo la più piccola frazione del rifiuto in ingresso (10% di aggregati riciclati fini), è solo teorica: infatti, per realizzarsi, il rifiuto in ingresso ad ogni impianto dovrebbe essere il risultato di una preliminare demolizione selettiva e corretta cernita effettuata in cantiere per fare in modo che non contenga impurezze e che il rifiuto in ingresso all'impianto di riciclo sia ben selezionato (rendere minimi i quantitativi di rifiuti misti CER 170107 e 170904); inoltre, la lavorazione dei rifiuti dovrebbe essere effettuata in modo molto efficiente e direttamente orientata alle richieste di mercato. È dunque indispensabile favorire l'incontro tra l'offerta di aggregati riciclati e la domanda di mercato, attraverso una collaborazione tra i diversi soggetti portatori di interesse (riciclatori da un lato ed imprese stradali e costruttive dall'altro), al fine di raggiungere un mercato solido ( $M=1$ ) che, a sua volta, incentiverebbe i gestori degli impianti di riciclo a migliorare e ottimizzare la produzione di aggregati riciclati. Le scelte effettuate in merito alla tipologia di impianti di recupero dei rifiuti e alla qualità della MPS prodotta sono quindi dei valori estremi, che servono per capire fino a quanto i benefici indotti dal recupero possono bilanciare gli impatti del sistema. Le ipotesi sulle distanze di trasporto, sull'eliminazione delle operazioni di stoccaggio e sull'evitato smaltimento diretto in discarica dei rifiuti, invece, potrebbero essere il risultato di una pianificazione territoriale che si ponga come obiettivo l'ottimizzazione di questi aspetti, come ad esempio il posizionamento degli impianti mobili nei pressi dei cantieri di demolizione per ridurre le distanze di conferimento, la diminuzione dei passaggi intermedi di gestione oppure l'introduzione di una maggiore tassazione (ecotassa), se non addirittura il divieto, per lo smaltimento in discarica dei rifiuti recuperabili. Per favorire e incentivare il mercato degli aggregati riciclati è auspicabile, inoltre, attuare azioni volte a incentivare l'utilizzo degli aggregati riciclati, nelle applicazioni in cui essi dimostrano di avere le stesse prestazioni dei materiali vergini, rendendo effettivamente operativi gli strumenti legislativi ad oggi disponibili, come il Green Public Procurement (GPP) o i Criteri Minimi Ambientali (CAM) per l'edilizia e le strade verdi. Al tempo stesso, un effetto positivo sul mercato degli aggregati riciclati potrebbe averlo una pianificazione del settore estrattivo più strategica, che preveda sia l'aumento della tassazione sui quantitativi cavati di sabbia e ghiaia (risorsa non rinnovabile), sia

una gestione del sistema delle autorizzazioni e concessioni più razionale, che tenga conto anche della disponibilità sul territorio degli aggregati riciclati.

In Tabella 127 si riportano i valori degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia dello scenario ideale a confronto con lo scenario attuale, associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di C&D misti. Dai risultati emerge che lo scenario ideale presenta dei benefici netti (valori negativi) per molte categorie d'impatto, a differenza dello scenario attuale: in particolare, i benefici si hanno per le categorie di impatto inerenti il riscaldamento globale, la riduzione dello strato d'ozono, l'assunzione di materiale particolato, la formazione fotochimica d'ozono, l'acidificazione, l'eutrofizzazione terrestre, marina e in acqua dolce, l'impatto energetico e il consumo di risorsa naturale. Per la categoria del riscaldamento globale si evidenzia il maggior beneficio complessivo rispetto allo scenario attuale, in quanto da un impatto di  $+2,38E+07$  kgCO<sub>2,eq</sub> nello scenario base si passa ad un beneficio netto di  $-1,25E+07$  kgCO<sub>2,eq</sub> nello scenario ideale, con una differenza del 152%. Anche l'impatto sull'acidificazione, di segno positivo nello scenario base e pari a  $1,73E+05$  molH<sub>+,eq</sub>, diventa un *saving* di  $-7,32E+04$  molH<sub>+,eq</sub> nello scenario ideale. Combinando insieme i parametri del sistema in modo da ottimizzare tutti i processi, quindi, i benefici associati al riciclo riescono a bilanciare in larga parte i carichi ambientali.

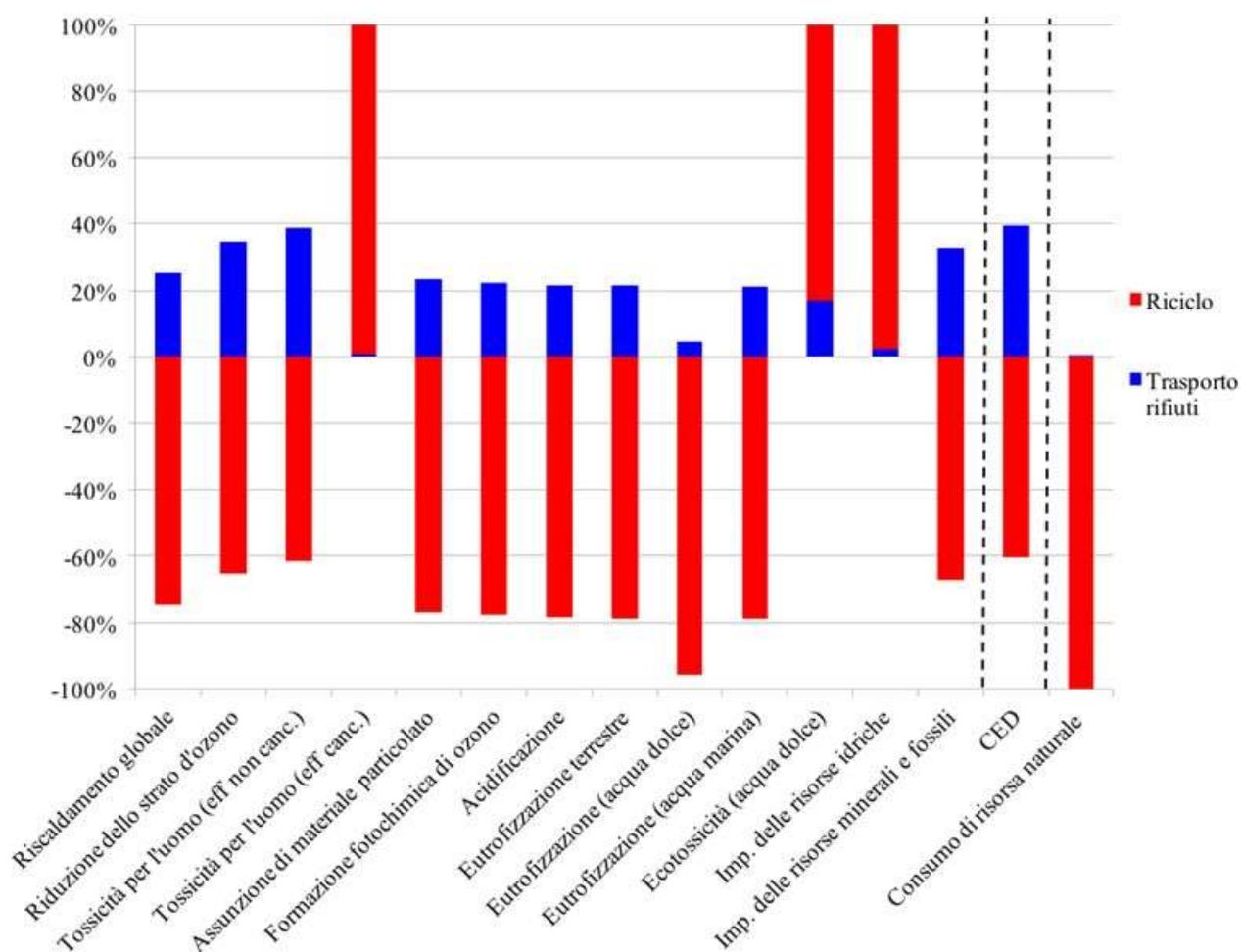
**Tabella 127.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuto C&D nello scenario ideale e nello scenario attuale

	Unità di misura	Scenario ideale	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2,eq</sub>	-1,25E+07	2,38E+07	-152%
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	-0,35	6,5	-105%
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	0,7	51,3	-99%
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	32,4	35,0	-7,2%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	-9,34E+03	2,05E+04	-146%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	-7,06E+04	2,02E+05	-135%
Acidificazione	moli H+eq	-7,32E+04	1,73E+05	-142%
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	-2,32E+05	7,24E+05	-132%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,27E+04	-9,64E+03	-32%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	-2,16E+04	6,59E+04	-133%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	4,59E+08	1,58E+09	-71%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	9,56E+04	1,44E+05	-34%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	6,34E+02	1,97E+03	-68%
Impatto energetico (CED)	MJ	-1,69E+08	4,55E+08	-137%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-7,18E+09	-4,28E+09	-67,7%

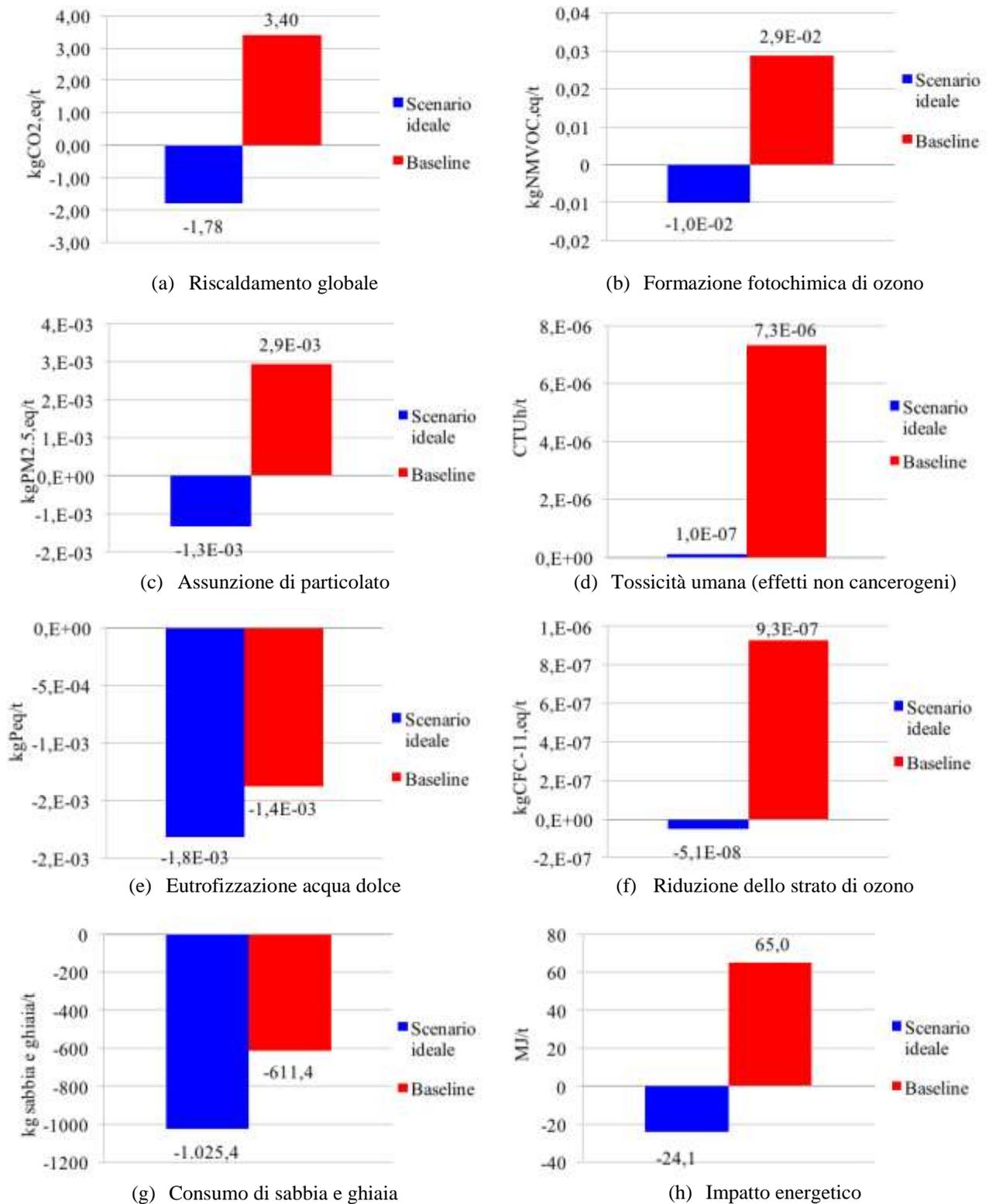
<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

In Figura 35 si possono osservare i contributi percentuali del riciclo (barra rossa) e del trasporto dei rifiuti (barra blu) sul sistema ideale: le uniche categorie di impatto in cui il riciclo impatta in modo particolarmente

consistente restano la tossicità umana (effetti cancerogeni), l'ecotossicità dell'acqua dolce e l'impoverimento delle risorse idriche, a causa dello smaltimento degli scarti delle fonderie e al consumo di energia elettrica. In Figura 36 sono riportati i confronti tra gli impatti totali associati al sistema ideale e gli impatti dello scenario attuale per tonnellata di rifiuto gestito per le categorie di impatto ambientale maggiormente rappresentative per il sistema, per l'impatto energetico e per il consumo di risorsa naturale non rinnovabile (sabbia e ghiaia). Con riferimento ai risultati in Figura 36, si nota l'ampia variabilità che intercorre tra i due scenari in termini di impatti totali: ad esempio il consumo di sabbia e ghiaia estratta passa da -611,4 kg/t a -1.025,4 kg/t (risparmio del 67,7% di risorsa naturale) e l'impatto energetico da positivo, 65,0 MJ/t, diventa un beneficio pari a -24,1 MJ/t (risparmio del 137% di risorsa energetica).



**Figura 35.** Contributi percentuali delle diverse fasi della gestione (trasporto rifiuti e riciclo) nello scenario ideale sugli impatti ambientali ed energetico e all'indicatore di consumo di risorsa naturale.



**Figura 36.** Confronto di alcuni degli indicatori associati al sistema di gestione di una tonnellata di rifiuti C&D nello scenario ideale (barra blu) rispetto allo scenario attuale (“baseline”: barra rossa).

Come già accennato precedentemente, l'ipotesi per cui tutti gli impianti di trattamento dei C&D sono alimentati ad energia elettrica è solo ideale e non raggiungibile nel breve periodo, in quanto ad oggi la maggior parte degli impianti a livello regionale sono alimentati a gasolio. Tuttavia, tenendo conto delle informazioni ricavate dai 12 questionari pervenuti, da cui emerge che la percentuale di impianti alimentati ad energia elettrica può essere in realtà superiore rispetto a quanto osservato durante i sopralluoghi tecnici, si può supporre che anche impianti di dimensioni minori possono essere portati ad implementare tecnologie di questo tipo, adottando configurazioni più articolate per migliorare le efficienze di produzione e la qualità degli aggregati riciclati.

Sulla base di queste considerazioni è stato costruire un nuovo scenario ideale, in cui la ripartizione tra impianti alimentati ad energia elettrica ed impianti alimentati a gasolio risulta più vicina ad una situazione futura potenzialmente realizzabile in cui il 50% degli impianti di trattamento sono alimentati ad energia elettrica e la restante parte a gasolio (gli altri parametri rimangono invariati rispetto allo scenario ideale precedente).

In Tabella 128 è mostrato il confronto tra i risultati del nuovo scenario ideale 50/50, lo scenario ideale e lo scenario base. Come si evince dal confronto, solo la categoria di impatto ambientale della riduzione dello strato di ozono passa da impatto in segno negativo nello scenario ideale (-0,35 kgCFC-11<sub>eq</sub>) ad impatto in segno positivo (0,26 kgCFC-11<sub>eq</sub>) nello scenario ideale 50/50; questo è dovuto principalmente alle maggiori emissioni di metano associate alla produzione di acciaio secondario (dal bilancio di massa emerge che dagli impianti alimentati a gasolio sono separate quantità maggiori di metalli ferrosi inviati a recupero) e alle emissioni di ossidi di azoto della combustione del gasolio negli impianti di trattamento. Invece, per l'impoverimento delle risorse idriche, si ottiene un beneficio nello scenario ideale 50/50 (-1,55E+04 m<sup>3</sup><sub>water eq</sub>), a differenza di quanto accade nello scenario ideale (9,56E+04 m<sup>3</sup><sub>water eq</sub>), in quanto la produzione di energia idroelettrica nel mix energetico italiano pesa in misura minore sull'impatto totale. Nel consumo di sabbia e ghiaia si ha una minima differenza tra i due scenari, in quanto le efficienze di trattamento delle due tipologie di impianto sono molto simili e la materia prima vergine che viene sostituita nei due casi è la stessa (90% di aggregati riciclati misti di alta qualità che sostituiscono aggregati naturali e 10% di aggregati riciclati misti di bassa qualità che sostituiscono mistone naturale).

Rispetto allo scenario base esiste quindi un ampio margine di miglioramento del sistema: mettendo in pratica idonee strategie e azioni di pianificazione regionale volte all'aumento della qualità degli aggregati riciclati, del numero di impianti alimentati ad energia elettrica e dell'efficienza del sistema di gestione è possibile ridurre nettamente i carichi ambientali ed energetici e il consumo di sabbia e ghiaia.

**Tabella 128.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 6.999.986 tonnellate di rifiuto C&D nello scenario ideale 50/50, nello scenario ideale e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario ideale 50/50	Scenario ideale	Scenario attuale
Categoria di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> ,eq	-1,04E+07	-1,25E+07	2,38E+07
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11eq	0,26	-0,35	6,5
Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)	CTUh	2,04	0,7	51,3
Tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni)	CTUh	33,6	32,4	35,0
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5eq	-4,39E+03	-9,34E+03	2,05E+04
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOCeq	-1,55E+04	-7,06E+04	2,02E+05
Acidificazione	moli H+eq	-3,78E+04	-7,32E+04	1,73E+05
Eutrofizzazione terrestre	moli Neq	-2,72E+04	-2,32E+05	7,24E+05
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg Peq	-1,35E+04	-1,27E+04	-9,64E+03
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg Neq	-2,96E+03	-2,16E+04	6,59E+04
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	4,98E+08	4,59E+08	1,58E+09
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water,eq	-1,55E+04	9,56E+04	1,44E+05
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sbeq	8,63E+04	6,34E+02	1,97E+03
Impatto energetico (CED)	MJ	6,36E+02	-1,69E+08	4,55E+08
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-1,38E+08	-7,18E+09	-4,28E+09

### **3.1.4 Conclusioni LCA1 e raccomandazioni per il miglioramento del sistema di gestione dei rifiuti misti**

I risultati dell'analisi di LCA del sistema attuale di gestione dei rifiuti C&D trattati impianti per la produzione di aggregati riciclati misti evidenziano come gli impatti sull'ambiente siano maggiori rispetto ai benefici indotti dal riciclo per la maggior parte degli indicatori di impatto, se non si considerano i benefici associati alla possibile discarica evitata. I vantaggi sull'ambiente si evidenziano solo per la categoria di impatto dell'eutrofizzazione in acqua dolce e per l'indicatore relativo al consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia), che risultano in segno negativo. Partendo dalle ipotesi dello scenario base e dai risultati emersi, sono state effettuate alcune simulazioni volte da un lato a valutare l'effetto delle ipotesi e delle incertezze dei dati di input sui risultati finali mediante analisi di sensitività e dall'altro ad individuare i principali parametri del sistema che ne influenzano maggiormente il bilancio ambientale mediante la definizione di scenari alternativi, con l'obiettivo di comprendere dove e come è maggiormente efficace agire per rendere il sistema più sostenibile.

A breve termine le azioni maggiormente efficaci da mettere in atto sul territorio dovrebbero essere rivolte in modo prioritario a raggiungere due obiettivi: potenziare il mercato degli aggregati riciclati prodotti attualmente sul territorio (arrivando quindi ad avere  $M=1$ ) e, contestualmente, creare le condizioni per l'introduzione di aggregati riciclati di maggiore qualità, che possano essere impiegati in applicazioni più nobili evitando, in tal modo, l'utilizzo di aggregati naturali di sabbia e ghiaia. Il beneficio in termini di impatti ambientali relativo a queste due azioni è emerso chiaramente nelle analisi di sensitività effettuate; infatti, nello scenario SR<sub>B</sub> la presenza di un mercato solido porta a una riduzione consistente degli impatti rispetto allo scenario attuale, per le categorie di impatto riscaldamento globale (riduzione del 29%), assunzione di materiale particolato (riduzione del 28%), per il consumo di risorsa energetica (riduzione del 25%) e per il consumo di risorsa naturale non rinnovabile (riduzione del 50%); la maggiore riduzione degli impatti si ottiene con la produzione di aggregati riciclati di ottima qualità nello scenario SA (riduzione dell'82% per il riscaldamento globale, del 68% per l'acidificazione e del 56% per il consumo di risorsa naturale). Il potenziamento del mercato esistente è, quindi, il primo obiettivo da raggiungere, in quanto la presenza di una domanda e di un'offerta nel settore delle costruzioni per gli aggregati riciclati che già vengono prodotti oggi (impiego nel corpo del rilevato, sottofondi e ripristini ambientali) permetterebbe ai gestori degli impianti di avere maggiori risorse economiche da investire nella lavorazione dei rifiuti. Alcune delle azioni che possono essere messe in atto, a breve termine, per rinforzare il settore legato alla produzione di aggregati riciclati ed ottimizzare il riciclo dei rifiuti C&D comprendono:

- diffondere la conoscenza alle imprese di costruzioni, ai progettisti e alle direzioni lavori (stazioni appaltanti) circa le caratteristiche prestazionali dei materiali riciclati e la loro disponibilità sul territorio;
- mettere in comunicazione le imprese utilizzatrici con gli impianti di recupero dei C&D;

- rendere il prezzo degli aggregati riciclati competitivo rispetto a quello dei materiali vergini, agendo sull'attività estrattiva;
- aggiornare i Capitolati Speciali d'Appalto delle opere pubbliche in modo che non vi sia discriminazione dei materiali in base alla loro origine e che siano adottati esclusivamente criteri tecnico-prestazionali.

Un mercato solido può sostenere a sua volta anche il raggiungimento del secondo obiettivo prioritario per avere un effettivo aumento dei benefici sul sistema associati alle azioni di recupero, quello cioè di produrre aggregati riciclati di maggiore qualità: per raggiungere questo obiettivo, oltre ad aumentare l'efficienza di lavorazione e migliorare il processo, laddove possibile, ad esempio prevedendo una pre-vagliatura per la rimozione della componente terrosa e una separazione dei prodotti in più classi granulometriche, è necessario ridurre la quantità di rifiuti misti non selezionati in ingresso agli impianti, che spesso contengono frazioni consistenti di materiali indesiderati che riducono la qualità degli aggregati riciclati (i.e. gesso, legno, fresato). Se, come già avviene per i metalli ferrosi e non ferrosi, ci fosse un ritorno economico anche per il recupero di quei materiali che, ad oggi, non vengono separati in cantiere (mattoni, mattonelle, ceramiche, gesso, fresato), le imprese di demolizione sarebbero maggiormente incentivate ad effettuare una demolizione selettiva, e il rifiuto inviato agli impianti di recupero risulterebbe, in questo modo, più pulito rendendo il trattamento più efficace.

Inoltre, evitare le pratiche di miscelazione tra i flussi di rifiuti negli impianti (attualmente i rifiuti a base gesso e i rifiuti bituminosi vengono in parte miscelati con i rifiuti misti) potrebbe avere un effetto positivo sulla qualità delle MPS prodotte. Il risultato di queste azioni è quello di ottenere in uscita dagli impianti aggregati riciclati con caratteristiche più omogenee e costanti nel tempo, conformi agli utilizzi più restrittivi (es. Allegato C3 della Circolare 5205/2005) e pertanto utilizzabili per la realizzazione di strati di fondazione o nel confezionamento di calcestruzzi a bassa resistenza.

Ai fini del miglioramento della gestione dei rifiuti C&D in regione, un'azione che può essere messa in atto a breve termine è l'aumento della tassazione per lo smaltimento dei rifiuti in discarica o, addirittura, l'introduzione di un divieto per lo smaltimento delle frazioni recuperabili; questo provvedimento porterebbe ad una riduzione degli impatti sul sistema che, tuttavia, in questo caso sarebbe meno consistente rispetto a quanto si potrebbe ottenere agendo sul mercato o sulla qualità degli aggregati (in quanto solo il 3,3% dei rifiuti C&D prodotti in regione viene smaltito in discarica).

Come emerso dalle analisi di sensitività, è necessario intervenire sul trasporto di conferimento dei rifiuti agli impianti, data l'elevata incidenza del processo sugli impatti complessivi del sistema, sulla tipologia di impianti di recupero (favorendo l'utilizzo di impianti alimentati ad energia elettrica piuttosto che a gasolio) e sui trattamenti intermedi come lo stoccaggio. Ottimizzare questi aspetti è possibile tramite una pianificazione territoriale che valuti innanzitutto la capacità di trattamento dei rifiuti C&D nelle varie province in relazione alla produzione dei rifiuti, per capire dove sia più strategico posizionare i nuovi impianti di recupero; una volta costruita una rete di impianti omogenea su tutto il territorio è importante che le aziende produttrici di

rifiuti siano a conoscenza di tutti gli impianti presenti in regione, in modo da poter scegliere la destinazione più vicina; infine, è preferibile favorire o incentivare la realizzazione di impianti alimentati ad energia elettrica piuttosto che a gasolio, in modo da ridurre gli impatti ambientali legati al trattamento.

## 3.2 Risultati dell'analisi LCA2 (miscele bituminose)

### 3.2.1 Scenario attuale LCA2

Si descrivono in questo paragrafo i risultati dell'analisi LCA2 del sistema di gestione delle miscele bituminose non pericolose in regione Lombardia, inviate a recupero dedicato. Accanto agli indicatori di impatto ambientale (metodo ILCD) ed energetico (CED) vengono mostrati i due indicatori costruiti *ad hoc* per questo studio, che esprimono il consumo di risorsa minerale naturale (non rinnovabile), espresso in kg di sabbia e ghiaia consumati/risparmiati, ed il volume di discarica risparmiata per tonnellata di rifiuti C&D gestiti in regione.

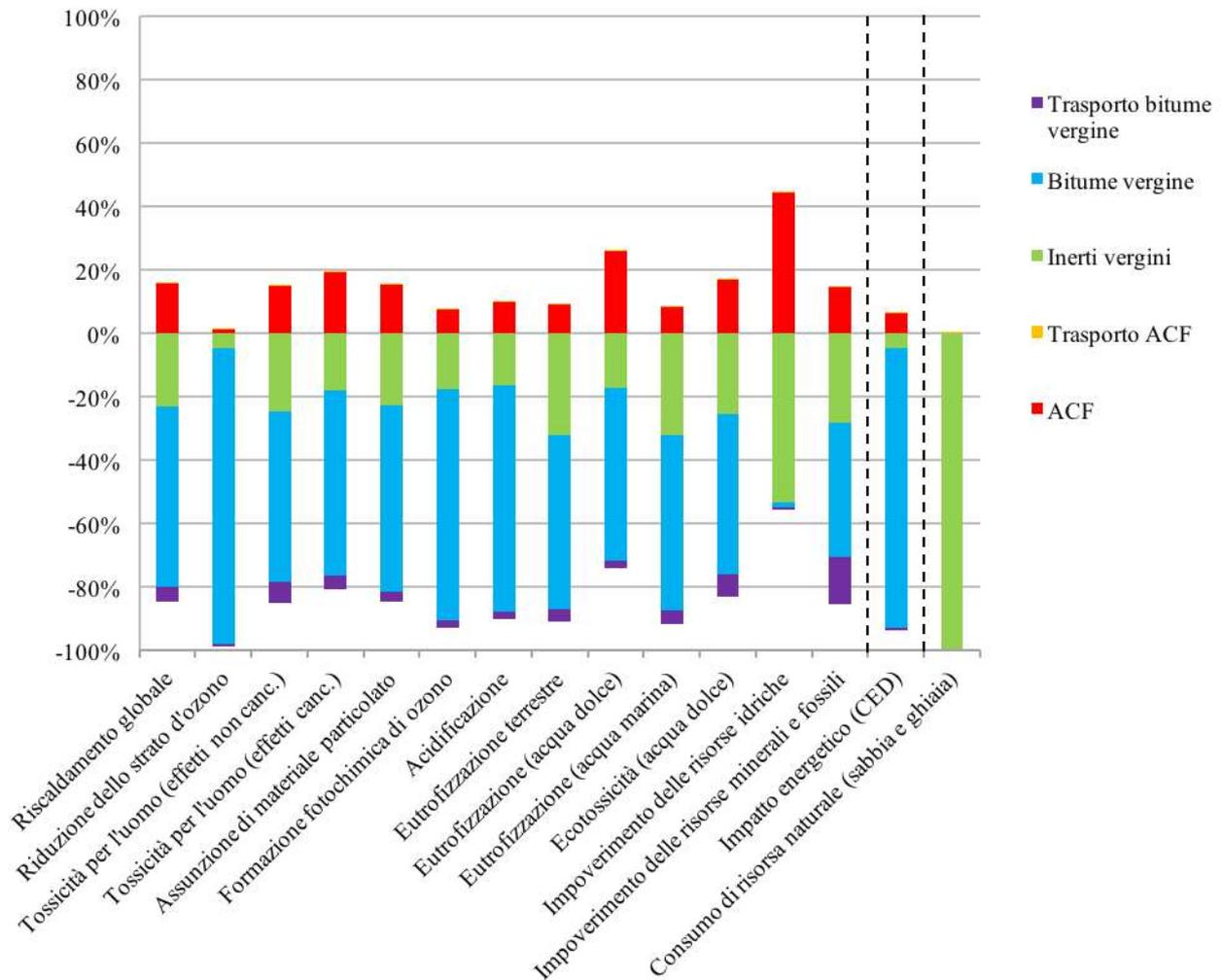
Come primo step di analisi, sono state analizzate singolarmente le due tecnologie di recupero del fresato attualmente implementate in regione: il riciclo a caldo in impianti discontinui per la produzione di nuovi conglomerati bituminosi (SR1) e il riciclo a freddo in impianti di miscelazione con produzione di eco-basi (SR2), di seguito illustrati.

#### 3.2.1.1 Il riciclo a caldo del fresato (SR1)

In Tabella 129 sono mostrati gli indicatori di impatto ambientale ed energetico ed il consumo di sabbia e ghiaia relativi al riciclo a caldo (SR1), espressi per una tonnellata di fresato impiegata nella produzione di nuovi conglomerati bituminosi destinati alla realizzazione di strati di base, binder e usura nelle pavimentazioni stradali. Dai risultati emerge che il recupero a caldo del fresato presenta benefici netti (impatti in segno negativo) per tutte le categorie di impatto ambientale, per l'impatto energetico e per il consumo di sabbia e ghiaia, in quanto gli impatti evitati grazie alla mancata estrazione di risorse minerali naturali e al risparmio di bitume vergine appaiono maggiori rispetto a quelli indotti dal trattamento stesso e dall'utilizzo degli attivanti chimici funzionali (ACF).

In Figura 37 sono riportati in forma grafica, per ciascuna categoria di impatto e per l'indicatore di consumo di risorsa naturale, i contributi percentuali delle singole fasi di recupero del fresato nel processo a caldo. Dai risultati si evince che il maggior beneficio è da ricondurre al risparmio di bitume vergine (barra azzurra in Figura 37) e, in misura minore, al risparmio di inerte naturale (barra verde in Figura 37). L'evitata produzione di bitume vergine contribuisce in modo ingente per la categoria di impatto ambientale associata alla riduzione dello strato di ozono ( $-2,2E-05$  kg CFC-11<sub>eq</sub>/t, ovvero il 93% dell'impatto totale) e per l'impatto energetico ( $-1.791$  MJ/t, ovvero l'88% dell'impatto energetico totale); anche nelle altre categorie di impatto rappresenta il contributo principale, con un peso pari al 50-60%. L'evitato impiego di inerti vergini mostra un beneficio dell'ordine del 20-30% nella maggior parte delle categorie di impatto e appare determinante per l'indicatore del consumo di risorsa naturale: il processo di riciclo a caldo permette di risparmiare 1.009 kg di inerti vergini per tonnellata di fresato impiegato nella miscela (Tabella 129).

I carichi in segno positivo indotti sull'ambiente sono dovuti solo all'utilizzo degli ACF (barra rossa in Figura 37), la cui produzione però impatta meno del 20% per quasi tutte le categorie di impatto. Gli impatti maggiori associati agli ACF si riscontrano per la categoria di impatto ambientale dell'eutrofizzazione in acqua dolce (26% dell'impatto totale) e dell'impoverimento delle risorse idriche (44% dell'impatto totale) e sono dovuti alle caratteristiche del processo produttivo.



**Figura 37.** Contributi percentuali delle diverse fasi del recupero a caldo del fresato sugli impatti complessivi del sistema SR1 e sul consumo di risorsa naturale.

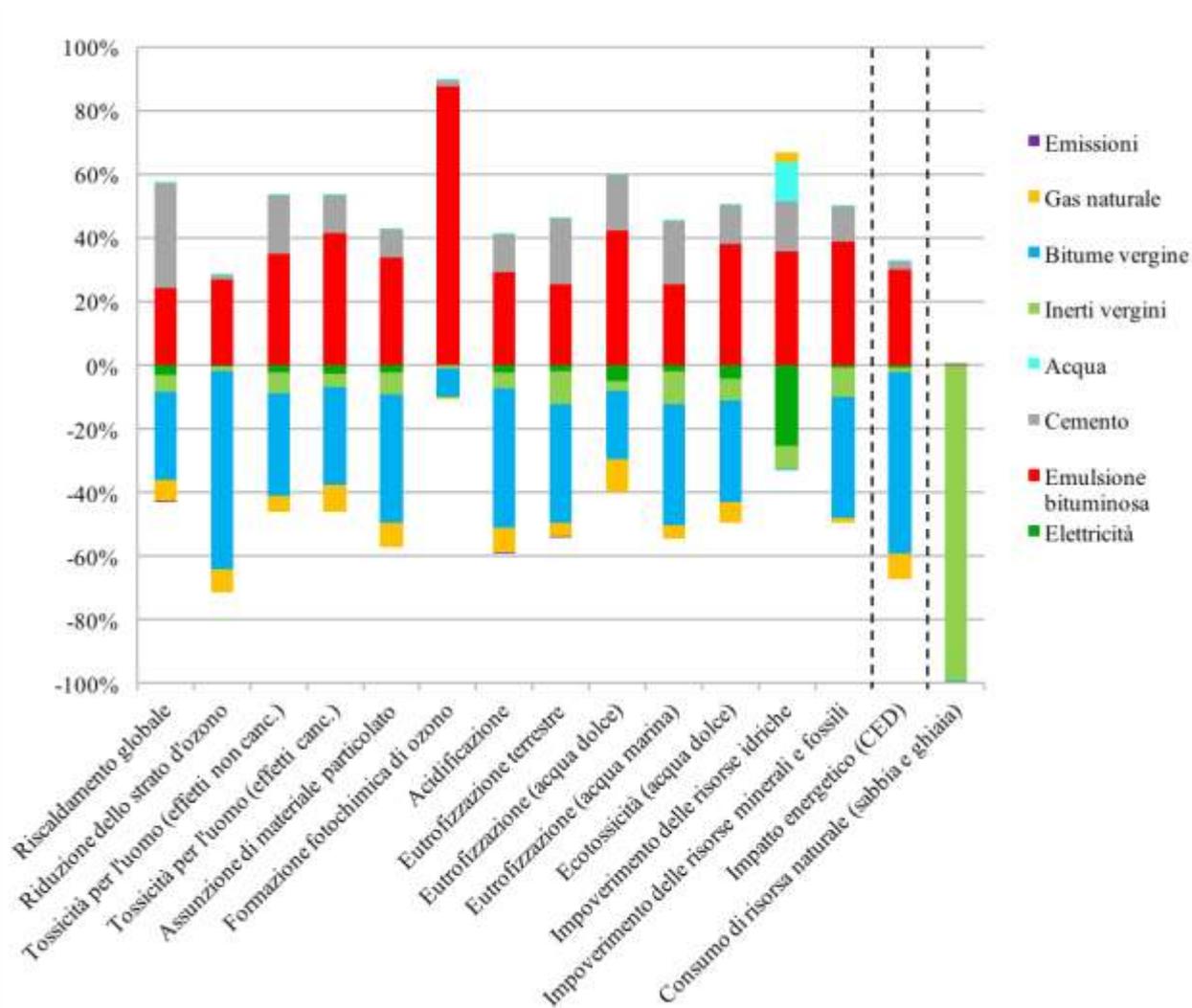
**Tabella 129.** Indicatori di impatto ambientale ed energetico e consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) associati al recupero di una tonnellata di fresato nel sistema SR1.

	Unità di misura	Totale	ACF	Trasporto ACF	Inerti vergini	Bitume vergine	Trasporto bitume vergine
Categorie di impatto ambientale (ILCD):							
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-17,5	4,0	0,01	-5,8	-14,4	-1,2
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,3E-05	2,8E-07	1,7E-09	-1,0E-06	-2,2E-05	-2,3E-07
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-2,8E-06	6,0E-07	2,0E-09	-9,9E-07	-2,1E-06	-2,7E-07
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-5,2E-07	1,6E-07	2,1E-10	-1,5E-07	-4,9E-07	-3,5E-08
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2,5</sub> eq	-1,3E-02	2,9E-03	4,6E-06	-4,2E-03	-1,1E-02	-5,7E-04
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-1,7E-01	1,5E-02	3,6E-05	-3,6E-02	-1,5E-01	-4,7E-03
Acidificazione	mol H <sup>+</sup> eq	-1,7E-01	2,1E-02	3,5E-05	-3,5E-02	-1,5E-01	-5,0E-03
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-3,1E-01	3,5E-02	1,1E-04	-1,2E-01	-2,1E-01	-1,6E-02
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-1,6E-03	8,6E-04	5,2E-07	-5,6E-04	-1,8E-03	-8,7E-05
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,9E-02	3,0E-03	1,0E-05	-1,1E-02	-1,9E-02	-1,4E-03
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-67,5	17,5	0,1	-26,0	-52,1	-6,9
Impoverimento delle risorse idriche	m3 water eq	-1,9E-03	7,8E-03	1,6E-06	-9,3E-03	-2,6E-04	-1,5E-04
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,4E-04	9,0E-05	4,0E-07	-1,7E-04	-2,6E-04	-9,2E-05
Impatto energetico (CED)	MJ	-1.779	129,3	0,1	-97,6	-1.791	-19,9
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-1.011	0,2	0,0	-1.009	-1,0	-1,0

### 3.2.1.2 Il riciclo a freddo del fresato (SR2)

In Tabella 130 sono riportati gli indicatori di impatto ambientale ed energetico e il consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) associati al trattamento a freddo di una tonnellata di fresato per la produzione di eco-basi. Dai risultati emerge che il recupero a freddo comporta benefici ambientali per la riduzione dello strato di ozono, l'assunzione di materiale particolato, l'acidificazione, l'eutrofizzazione terrestre, l'eutrofizzazione in acqua dolce, l'eutrofizzazione marina, l'impatto energetico e per il consumo di sabbia e ghiaia, mentre per le restanti categorie di impatto ambientale i benefici associati al risparmio di bitume vergine, inerti naturali, elettricità e gas naturale non riescono a bilanciare gli impatti in segno positivo indotti dall'utilizzo dell'emulsione bituminosa e del cemento nel processo di produzione a freddo dell'eco-base. In Figura 38 sono rappresentati in forma grafica, per ciascuna categoria di impatto e per l'indicatore di consumo di risorsa naturale, i contributi percentuali delle singole fasi di recupero del fresato nel processo a freddo (SR2). Confrontando gli impatti in segno positivo associati all'utilizzo dell'emulsione bituminosa con quelli in segno negativo del risparmio di bitume vergine (Tabella 130 e Figura 38) è possibile notare come, in molti casi, l'utilizzo di emulsione bituminosa presenti impatti in modulo simili o addirittura superiori rispetto a quelli associati al risparmio del bitume vergine: ad esempio, per la tossicità umana (effetti non cancerogeni) si nota un impatto di  $+3,5E-06$  CTUh/t dovuto all'uso dell'emulsione e un beneficio di  $-3,2E-06$  CTUh/t associato al risparmio di bitume, mentre per l'eutrofizzazione in acqua dolce si osserva un impatto di  $+3,0E-03$  kgP<sub>eq</sub>/t dell'emulsione e un impatto di  $-2,5E-03$  kgP<sub>eq</sub>/t dell'evitato bitume. Siccome gli impatti indotti dalla produzione dell'emulsione bituminosa possono essere determinanti per la prestazione ambientale complessiva del processo di riciclo a freddo, è stata effettuata un'analisi di sensitività sul dosaggio di emulsione nelle miscele di eco-basi, mostrata nel paragrafo 3.2.2.1. Si precisa che per la modellizzazione della produzione di emulsione bituminosa è stato utilizzato il processo di default diecoinvent 3.3 "*Bitumen adhesive compound, cold {GLO} | market for*" per mancanza di dati primari; dal momento che questo appare un processo chiave nel riciclo a freddo, per avere risultati più attendibili, sarebbe necessario raccogliere informazioni aggiuntive in relazione all'effettiva composizione di questo additivo chimico e ai reali consumi/emissioni associati alla sua produzione.

Anche l'impiego del cemento nel confezionamento delle miscele a freddo comporta carichi ambientali aggiuntivi sul sistema: la produzione di cemento, infatti, contribuisce in modo rilevante all'impatto sul riscaldamento globale, con un'emissione di  $24,8$  kgCO<sub>2,eq</sub>/t (barra grigia in Figura 38) che rappresenta il 33% dell'impatto totale risultante. La produzione di eco-basi in sostituzione della produzione di conglomerati bituminosi a caldo permette di evitare, inoltre, consumi di gas naturale (barra gialla in Figura 38) ed elettricità (barra verde scuro in Figura 38); questi impatti evitati sono però abbastanza contenuti se confrontati con quelli derivanti dal risparmio di bitume e di inerti naturali.



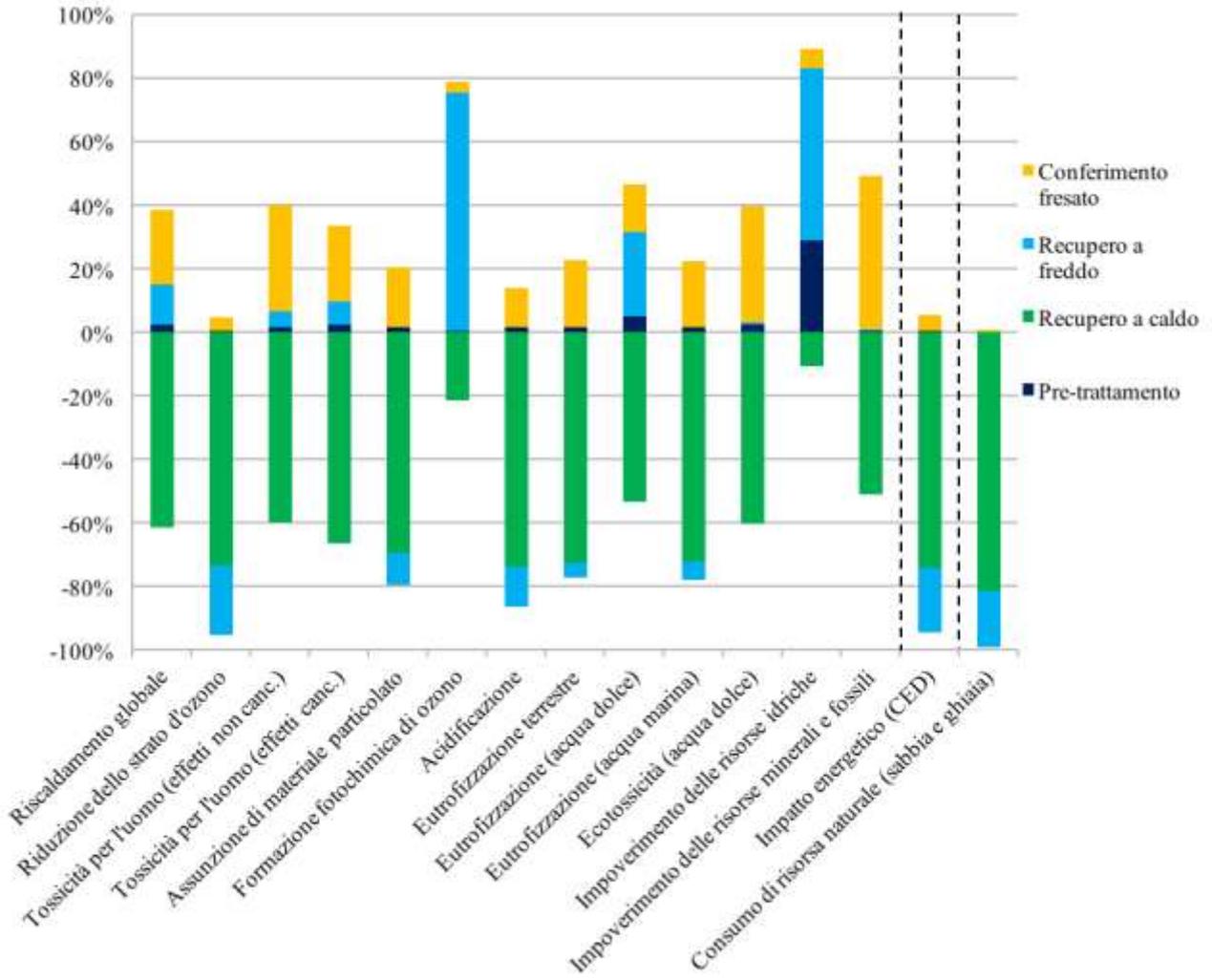
**Figura 38.** Contributi percentuali delle diverse fasi del recupero a freddo del fresato per la produzione di eco-basi sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale nel sistema SR2.

**Tabella 130.** Indicatori di impatto ambientale ed energetico e consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) associati al recupero di una tonnellata di fresato a freddo per la produzione di eco-basi (SR2); le colonne relative al consumo di emulsione bituminosa e cemento e al risparmio di bitume vergine comprendono anche i relativi trasporti.

	Unità di misura	Totale	Emulsione bituminosa	Cemento	Acqua	Inerti vergini	Bitume vergine	Elettricità	Gas naturale	Emissioni evitate
Categorie di impatto ambientale (ILCD):										
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	10,7	18,0	24,8	0,1	-3,8	-20,8	-2,4	-5,0	-8,9E-03
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,0E-05	1,2E-05	7,3E-07	2,3E-08	-6,8E-07	-2,9E-05	-2,7E-07	-3,5E-06	0
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	7,4E-07	3,5E-06	1,9E-06	2,9E-08	-6,5E-07	-3,2E-06	-2,5E-07	-5,3E-07	0
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	1,8E-07	9,5E-07	2,7E-07	1,4E-08	-1,0E-07	-7,0E-07	-6,3E-08	-1,9E-07	0
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2.5</sub> eq	-5,5E-03	1,3E-02	3,3E-03	3,9E-05	-2,8E-03	-1,5E-02	-8,6E-04	-2,8E-03	0
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	1,8E+00	2,0E+00	4,1E-02	1,6E-04	-2,4E-02	-2,0E-01	-4,9E-03	-1,6E-02	0
Acidificazione	mol H+ eq	-8,6E-02	1,4E-01	5,6E-02	3,7E-04	-2,3E-02	-2,1E-01	-1,2E-02	-3,8E-02	-4,4E-07
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-6,0E-02	2,0E-01	1,7E-01	5,5E-04	-8,1E-02	-3,0E-01	-1,6E-02	-3,2E-02	-1,0E-05
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	2,4E-03	5,0E-03	2,1E-03	4,2E-05	-3,7E-04	-2,5E-03	-5,9E-04	-1,2E-03	0
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-6,7E-03	1,9E-02	1,5E-02	5,8E-05	-7,4E-03	-2,8E-02	-1,5E-03	-3,1E-03	0
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	2,3	94,1	30,0	0,7	-17,1	-78,5	-11,0	-15,9	0
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	2,9E-02	3,0E-02	1,4E-02	1,1E-02	-6,1E-03	-5,5E-04	-2,2E-02	2,7E-03	0
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	1,0E-05	4,8E-04	1,4E-04	5,3E-06	-1,1E-04	-4,7E-04	-1,1E-05	-2,0E-05	0
Impatto energetico (CED)	MJ	-1.485	1.266	112,8	1,2	-64,1	-2.408	-41,2	-352,0	0
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-663,7	1,6	1,0	0,0	-663,1	-2,7	-0,1	-0,4	0

### 3.2.1.3 *Impatti specifici del sistema attuale*

In Tabella 131 sono mostrati i risultati degli impatti ambientali, dell'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale relativi ad una tonnellata di fresato d'asfalto in ingresso al sistema impiantistico regionale, composto per il 75% da SR1 e per il 25% da SR2. La maggior parte delle categorie di impatto ambientale, l'impatto energetico e il consumo di sabbia e ghiaia presentano un impatto in segno negativo, in quanto i benefici derivanti dalle azioni di recupero compensano gli impatti in segno positivo associati al trasporto del rifiuto agli impianti e al pre-trattamento del fresato. Le uniche categorie di impatto che presentano un segno positivo sono l'impovertimento delle risorse idriche ( $+1,0E-02 \text{ m}^3_{\text{water,eq}}/\text{t}$ ) e la formazione fotochimica di ozono ( $+3,5E-01 \text{ kgNMVOC}_{\text{eq}}/\text{t}$ ), per i quali il consumo di emulsione bituminosa nel recupero a freddo del fresato porta ad avere elevati impatti sull'ambiente; dalla Figura 39, dove sono rappresentati i contributi percentuali delle diverse fasi della gestione sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale, si può osservare infatti che il recupero a freddo (barra azzurra) contribuisce in maniera considerevole sull'impovertimento delle risorse idriche (per oltre il 55%) e sulla formazione fotochimica di ozono (per oltre il 75%). Con riferimento alla Figura 39, si nota che il recupero a caldo contribuisce maggiormente ai benefici complessivi del sistema in esame rispetto al recupero a freddo, sia perché il processo di recupero in sé è più conveniente dal punto di vista ambientale (vedi Tabella 129 e Tabella 130), sia perché questa tipologia di trattamento del rifiuto è la più praticata a livello regionale (il 75% del fresato è conferito ad impianti di recupero a caldo). Il trasporto per il conferimento dei rifiuti agli impianti (barra gialla in Figura 39) contribuisce per il 20-40% agli impatti totali, soprattutto per le categorie di impatto ambientale del riscaldamento globale (a causa della di  $\text{CO}_2$  fossile emessa), della tossicità umana non cancerogena, dell'ecotossicità in acqua dolce e dell'impovertimento delle risorse minerali e fossili.



**Figura 39.** Contributi percentuali dei diversi processi sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale del sistema impiantistico attuale in regione.

**Tabella 131.** Indicatori di impatto ambientale ed energetico e consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) associati al recupero di una tonnellata di fresato nel sistema impiantistico regionale.

	Unità di misura	Totale	Pre-trattamento	Recupero a caldo	Recupero a freddo	Conferimento fresato
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-4,9	0,5	-13,1	2,7	5,0
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,1E-05	5,7E-08	-1,7E-05	-5,0E-06	9,8E-07
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-7,0E-07	4,6E-08	-2,1E-06	1,8E-07	1,2E-06
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,9E-07	1,2E-08	-3,9E-07	4,4E-08	1,4E-07
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-8,2E-03	2,2E-04	-9,7E-03	-1,4E-03	2,6E-03
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	3,5E-01	1,5E-03	-1,3E-01	4,6E-01	2,1E-02
Acidificazione	molc H+ eq	-1,3E-01	2,7E-03	-1,3E-01	-2,1E-02	2,1E-02
Eutrofizzazione terrestre	molc N eq	-1,8E-01	5,3E-03	-2,4E-01	-1,5E-02	6,7E-02
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-1,6E-04	1,1E-04	-1,2E-03	6,0E-04	3,4E-04
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-1,7E-02	5,0E-04	-2,2E-02	-1,7E-03	6,2E-03
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-17,3	2,0	-50,6	0,6	30,8
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	1,0E-02	3,8E-03	-1,5E-03	7,2E-03	8,4E-04
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-1,3E-05	2,2E-06	-3,3E-04	2,5E-06	3,1E-04
Impatto energetico (CED)	MJ	-1.611	8,0	-1.335	-371,3	86,4
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-917,6	0,02	-758,3	-165,9	6,6

### 3.2.1.4 Impatti complessivi del sistema attuale

In regione Lombardia nel 2014 sono state inviate a trattamento di recupero dedicato 382.488 tonnellate di conglomerato bituminoso (i.e. fresato); moltiplicando gli impatti specifici mostrati in Tabella 131 per questo quantitativo è possibile calcolare gli impatti totali associati alla filiera di recupero del fresato e riportati in Tabella 132.

Da questi risultati emerge che, attualmente, la gestione del fresato negli impianti dedicati ha portato ad un risparmio di 1.885 tonnellate di CO<sub>2,eq</sub>, 6,16E+08 MJ di energia e 350.963 tonnellate di sabbia e ghiaia; per contro, le azioni di recupero hanno determinato anche un'emissione di 133 tonnellate di NMVOC<sub>eq</sub> e un impatto sul comparto idrico di circa 4 m<sup>3</sup><sub>water,eq</sub>.

È stato stimato il volume di discarica risparmiata per il sistema LCA2, calcolato come rapporto tra le 382.488 tonnellate di fresato avviate al trattamento e il suo peso specifico (0,68 t/m<sup>3</sup>, fonte EPA – Environmental Protection Agency); le stime mostrano che, attraverso il recupero del fresato, è stato possibile risparmiare 562.482 m<sup>3</sup> di discarica.

**Tabella 132.** Impatti ambientali ed energetico e consumo di sabbia e ghiaia associati al recupero di 382.488 tonnellate di fresato nel 2014.

	Unità di misura	Totale
Categorie di impatto ambientale (ILCD):		
Riscaldamento globale	t CO <sub>2</sub> eq	-1.885
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-8
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-2,7E-01
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-7,4E-02
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-3.145
Formazione fotochimica di ozono	t NMVOC eq	133
Acidificazione	mol H+ eq	-48.020
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-67.872
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-60
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-6.474
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-6.603.869
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	3.979
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-5,0
Impatto energetico (CED)	MJ	-6,16E+08
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	t	-350.963

## 3.2.2 Scenari alternativi LCA2

### 3.2.2.1 *Analisi dei dosaggi dei materiali per il confezionamento delle miscele*

**Analisi di sensitività dello scenario SR1** Come anticipato nel paragrafo 2.4.3, negli scenari  $SR1_{min}$  e  $SR1_{max}$  è stata variata la percentuale di bitume vergine risparmiata a seguito dell'impiego di fresato nel ciclo produttivo a caldo dei conglomerati bituminosi: nello scenario attuale SR1 vengono risparmiati 35 kg di bitume vergine ogni 10% di fresato aggiunto nella miscela, mentre negli scenari  $SR1_{min}$  e  $SR1_{max}$  è stato ipotizzato che la quantità di bitume vergine risparmiata sia rispettivamente pari allo 0,2% (20 kg) e allo 0,5% (50 kg) ogni 10% di fresato. In Tabella 133 sono riportati i risultati ottenuti nei due scenari alternativi a confronto con lo scenario SR1, che evidenziano come i benefici associati al recupero a caldo del fresato aumentano come conseguenza dell'aumento della quantità di bitume vergine che è possibile risparmiare grazie all'aggiunta di fresato nelle miscele: ad esempio, il riscaldamento globale vede un aumento del 38% del beneficio passando dallo scenario SR1 (-17,5 kgCO<sub>2,eq</sub>/t) allo scenario  $SR1_{max}$  (-24,1 kgCO<sub>2,eq</sub>/t) e di circa il 50% per l'eutrofizzazione in acqua dolce, che passa da -1,6E-03 kgP<sub>eq</sub>/t nello scenario SR1 a -2,4E-03 kgP<sub>eq</sub>/t nello scenario  $SR1_{max}$  (aumento di circa il 50% del beneficio rispetto allo scenario SR1). La situazione risulta esattamente opposta quando la percentuale di bitume risparmiato nel trattamento si riduce (scenario  $SR1_{min}$ ), con un generale peggioramento delle prestazioni ambientali ed energetiche del sistema rispetto allo scenario SR1. Bisogna sottolineare che, anche nella situazione peggiorativa  $SR1_{min}$ , il trattamento a caldo continua comunque a mostrare benefici netti per l'ambiente, in quanto tutti gli indicatori continuano a mantenere segno negativo.

Riguardo il consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia), l'indicatore mostra piccole variazioni con trend opposto rispetto ai dosaggi di bitume; il quantitativo di inerti vergini risparmiati, infatti, aumenta nel caso di risparmio minimo di bitume ( $SR1_{min}$ ) mentre diminuisce quando si considera il massimo risparmio di bitume ( $SR1_{max}$ ). Le differenze sono essenzialmente dovute a piccole variazioni nella composizione percentuale delle miscele finali di conglomerati bituminosi (vedi Tabella 61).

**Tabella 133.** Confronto degli impatti ambientali, dell’impatto energetico e dell’indicatore di consumo di sabbia e ghiaia relativi al trattamento a caldo di una tonnellata di fresato nello scenario SR1<sub>min</sub> (20 kg di bitume vergine risparmiato ogni 10% di fresato nella miscela), SR1<sub>max</sub> (50 kg di bitume vergine risparmiato ogni 10% di fresato nella miscela) e nello scenario attuale SR1 (35 kg di bitume vergine risparmiato ogni 10% di fresato nella miscela).

	Unità di misura	SR1 <sub>min</sub>	SR1 <sub>max</sub>	SR1
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-10,8	-24,1	-17,5
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,3E-05	-3,2E-05	-2,3E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-1,8E-06	-3,8E-06	-2,8E-06
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-2,9E-07	-7,4E-07	-5,2E-07
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-8,0E-03	-1,8E-02	-1,3E-02
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-1,1E-01	-2,4E-01	-1,7E-01
Acidificazione	mol H+ eq	-1,0E-01	-2,4E-01	-1,7E-01
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-2,2E-01	-4,1E-01	-3,1E-01
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-7,9E-04	-2,4E-03	-1,6E-03
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,0E-02	-3,8E-02	-2,9E-02
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-42,4	-92,2	-67,5
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	-1,9E-03	-2,0E-03	-1,9E-03
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-2,9E-04	-5,8E-04	-4,4E-04
Impatto energetico (CED)	MJ	-999,4	-2.544	-1.779
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-1.026	-1.002	-1.011

**Analisi di sensitività dello scenario SR2** Negli scenari SR2<sub>E<sub>min</sub></sub> e SR2<sub>E<sub>max</sub></sub> è stata variata la percentuale di emulsione bituminosa utilizzata per la produzione di eco-basi (pari al 3,5% della miscela finale nello scenario attuale SR2); il dosaggio ipotizzato è pari al 3% in SR2<sub>E<sub>min</sub></sub> e al 4% in SR2<sub>E<sub>max</sub></sub> (rispetto alla miscela finale). In Tabella 134 è riportato il confronto tra gli scenari SR2<sub>E<sub>min</sub></sub>, SR2<sub>E<sub>max</sub></sub> e SR2 in termini di impatti ambientali, impatto energetico e consumo di sabbia e ghiaia. Dai risultati emerge che, diminuendo la quantità di emulsione bituminosa (scenario SR2<sub>E<sub>min</sub></sub>) impiegata nel processo di riciclo a freddo del fresato, gli impatti registrano complessivamente una netta riduzione: l’effetto è particolarmente evidente per la categoria di impatto dell’ecotossicità in acqua dolce, che mostra una riduzione dell’impatto complessivo del 587% rispetto allo scenario SR2, passando da un impatto in segno positivo di +2,3 CTUe/t ad un impatto in segno negativo (beneficio per l’ambiente) pari a -11,1 CTUe/t. Risultato analogo si registra anche per l’impoverimento delle risorse minerali e fossili che passa da un impatto di +1,0E-05 kgSb<sub>eq</sub>/t nello scenario SR2 ad un beneficio di -5,8E-05 kgSb<sub>eq</sub>/t in SR2<sub>E<sub>min</sub></sub>. Per le altre categorie di impatto i cui indicatori in SR2 avevano segno positivo, gli indicatori continuano a presentare valore positivi, ma di entità minore.

Aumentando la percentuale di emulsione bituminosa fino al 4% della miscela nello scenario SR2\_E<sub>max</sub>, gli impatti ambientali ed energetici aumentano proporzionalmente. Come già evidenziato nel paragrafo 3.2.1.2 dove è stato analizzato il riciclo a freddo, l'utilizzo dell'emulsione bituminosa impatta molto sull'ambiente ed influenza in modo determinante i risultati finali dell'analisi LCA2; sarebbe quindi interessante approfondire questo aspetto della modellizzazione, raccogliendo dati primari riguardo la reale composizione di questo additivo chimico al fine di creare un processo *ad hoc* per l'emulsione bituminosa.

**Tabella 134.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di consumo di sabbia e ghiaia riferiti al trattamento a freddo di una tonnellata di fresato nello scenario SR2\_E<sub>min</sub> (3% di emulsione bituminosa nella miscela finale) e nello scenario SR2\_E<sub>max</sub> (4% di emulsione bituminosa nella miscela finale).

	Unità di misura	SR2_E <sub>min</sub>	SR2_E <sub>max</sub>	SR2
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	8,1	13,3	10,7
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,2E-05	-1,8E-05	-2,0E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	2,4E-07	1,2E-06	7,4E-07
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	3,9E-08	3,1E-07	1,8E-07
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-7,3E-03	-3,7E-03	-5,5E-03
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	1,5E+00	2,1E+00	1,8E+00
Acidificazione	mol H+ eq	-1,1E-01	-6,7E-02	-8,6E-02
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-8,8E-02	-3,2E-02	-6,0E-02
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,7E-03	3,1E-03	2,4E-03
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-9,3E-03	-4,1E-03	-6,7E-03
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-11,1	15,8	2,3
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	2,4E-02	3,3E-02	2,9E-02
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-5,8E-05	7,9E-05	1,0E-05
Impatto energetico (CED)	MJ	-1.656,6	-1.311,7	-1.485,1
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-658,8	-668,7	-663,7

Nello scenario SR2\_RS è stato variato il rapporto di sostituzione tra l'eco-base e il CB a caldo vergine, ipotizzato pari a 1:0,8; ciò porta ad un maggiore risparmio di CB a caldo rispetto allo scenario attuale SR2 dove il rapporto di sostituzione è di 1:0,67. Dai risultati in Tabella 135, che mostrano il confronto tra lo scenario SR2\_RS e lo scenario SR2 in termini di impatti ambientali ed energetico e di consumo di sabbia e ghiaia, è possibile osservare una diminuzione degli impatti sull'ambiente e un maggior risparmio di energia e risorse naturali. Riduzioni significative, maggiori del 100%, si registrano per la tossicità dell'uomo (effetti non cancerogeni e cancerogeni), l'eutrofizzazione terrestre, l'eutrofizzazione marina, l'ecotossicità in acqua dolce e l'impoverimento delle risorse minerali e fossili; in particolare, per alcune categorie di impatto

ambientale, gli impatti prima in segno positivo nello scenario SR2 diventano benefici complessivi nello scenario SR2\_RS, il che significa che il maggior risparmio di inerti, bitume vergine, gas naturale ed emissioni in atmosfera riesce a bilanciare gli impatti in segno positivo associati alla produzione dell'eco-base, derivanti dal consumo di emulsione bituminosa e cemento. Ad esempio, la tossicità umana (effetti non cancerogeni) passa da +7,4E-07 CTUh/t nello scenario attuale SR2 a -2,5E-07 nello scenario SR2\_RS, segnando una riduzione dell'impatto del 134%; l'indicatore di ecotossicità in acqua dolce, che indica un impatto per l'ambiente in segno positivo nello scenario SR2 pari a +2,3 CTUe/t, indica invece un beneficio (-24,6 CTUe/t) nello scenario migliorativo SR2\_RS, riducendo quindi l'impatto del 1.180% rispetto allo scenario SR2.

**Tabella 135.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di consumo di sabbia e ghiaia relativi al trattamento a freddo di una tonnellata di fresato nello scenario SR2\_RS (rapporto di sostituzione 1:0,8) e nello scenario SR (rapporto di sostituzione 0,67).

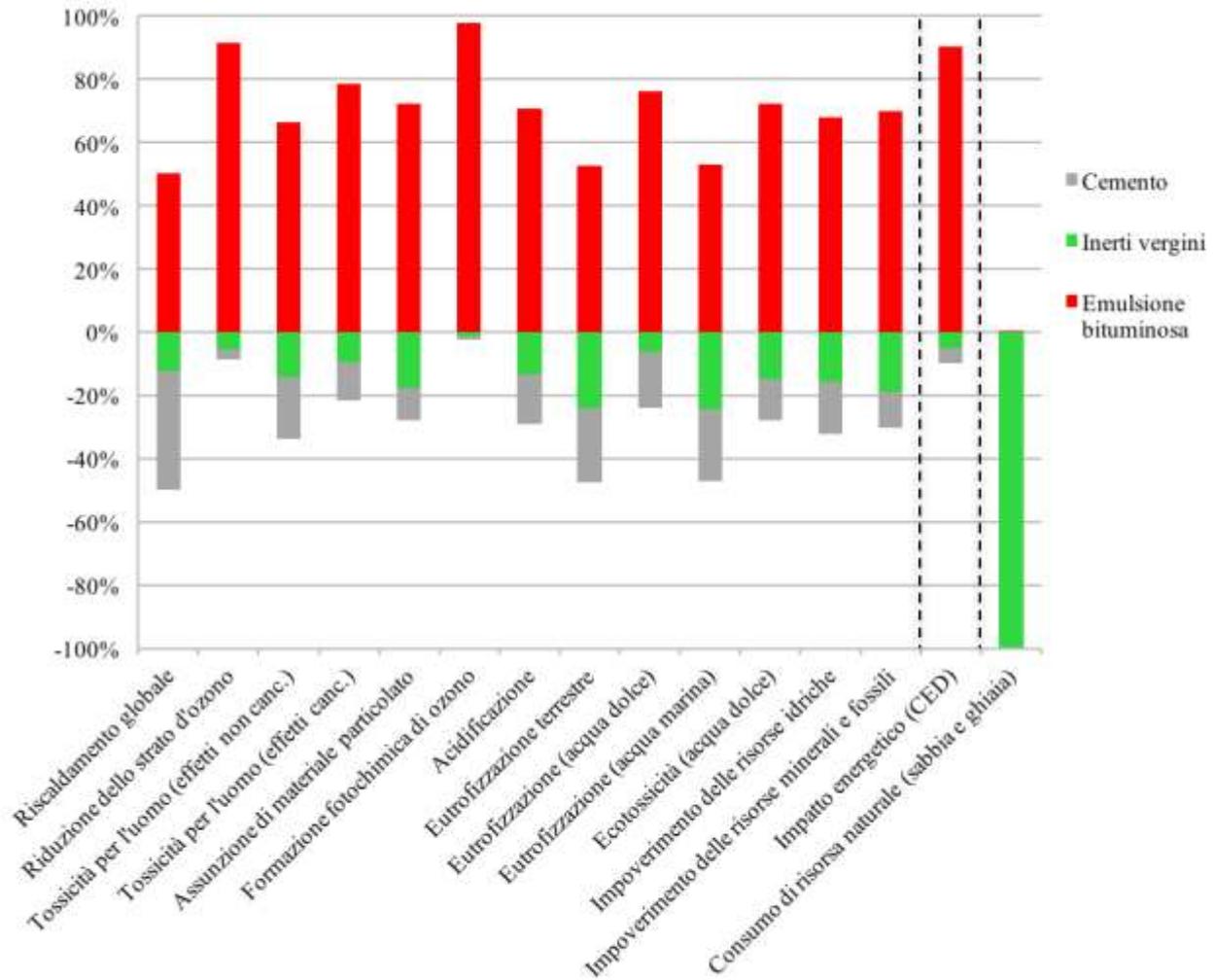
	Unità di misura	SR2	SR2_RS	Differenza <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	10,7	3,8	-65%
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,0E-05	-2,7E-05	-33%
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	7,4E-07	-2,5E-07	-134%
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	1,8E-07	-4,8E-08	-127%
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-5,5E-03	-1,0E-02	-83%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	1,8E+00	1,8E+00	-3%
Acidificazione	mol H+ eq	-8,6E-02	-1,4E-01	-68%
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-6,0E-02	-1,5E-01	-153%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	2,4E-03	1,3E-03	-43%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-6,7E-03	-1,5E-02	-128%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	2,3	-24,6	-1.180%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	2,9E-02	2,0E-02	-31%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	1,0E-05	-1,2E-04	-1.282%
Impatto energetico (CED)	MJ	-1.485,1	-2.052,6	-38%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-663,7	-843,7	-27%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SR2.

### 3.2.2.2 *Analisi delle tecnologie alternative di riciclo del fresato*

Lo scenario SR3 simula il recupero a freddo del fresato per la produzione di misti cementati ad alta duttilità (MCAD) con impegno di fresato al 45% sulla miscela finale (descrizione del processo produttivo nel paragrafo 2.4.3). Osservando i risultati riportati in Tabella 136 e Figura 40 si nota come, per la maggior parte delle categorie di impatto ambientale e per l'impatto energetico, l'utilizzo di emulsione bituminosa per il

confezionamento di misti cementati contenenti fresato comporta impatti molto elevati, che non vengono bilanciati dagli impatti evitati associati al risparmio di cemento e di inerti vergini. Per il riscaldamento globale si registra un piccolo beneficio di  $-0,02 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}/\text{t}$ , in quanto per questa categoria di impatto l'evitata produzione di cemento insieme a quella degli inerti riesce a compensare l'impiego di emulsione bituminosa; infatti, osservando i contributi percentuali in Figura 40 (barra grigia) si nota che, per il riscaldamento globale, il principale contributo deriva proprio dal risparmio di cemento (circa 40%). Il processo di recupero a freddo del fresato dello scenario SR3 presenta inoltre un beneficio associato al risparmio di risorsa minerale naturale di sabbia e ghiaia pari a  $1.044,5 \text{ kg/t}$ , leggermente maggiore rispetto ai due scenari precedenti SR1 e SR2. Tuttavia si sottolinea che, per questo scenario, ci sono forti incertezze sia per il tipo e quantitativo di prodotto evitato, sia per il dosaggio e la tipologia di emulsione bituminosa (per quest'ultima, in prima approssimazione, è stato impiegato nella modellizzazione lo stesso processo di default diecoinvent 3.3 usato per la produzione di eco-basi ("*Bitumen adhesive compound, cold {GLO} | market for*") data la mancanza di informazioni inerenti la reale composizione e i consumi associati alla sua produzione). Per quantificare più nel dettaglio i reali impatti associati alla produzione di MCAD è quindi necessario raccogliere dati specifici, contattando sia gli impianti di MCAD sia le aziende produttrici di emulsioni bituminose (come Iterchimica - BG).



**Figura 40.** Contributi percentuali delle diverse fasi del recupero a freddo del fresato per la produzione di misti cementati ad alta duttilità sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale del sistema SR3; le barre del risparmio di cemento e del consumo di emulsione bituminosa includono anche gli impatti associati ai relativi trasporti.

**Tabella 136.** Indicatori di impatto ambientale ed energetico e consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) associati al recupero di una tonnellata di fresato a freddo per la produzione di misti cementati ad alta duttilità.

	Unità di misura	Totale	Emulsione bituminosa	Trasporto emulsione bituminosa	Inerti vergini	Cemento	Trasporto cemento
Categorie di impatto ambientale (ILCD):							
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-0,02	24,4	0,3	-6,1	-18,5	-0,2
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	1,5E-05	1,7E-05	6,5E-08	-1,1E-06	-5,2E-07	-3,9E-08
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	2,3E-06	4,7E-06	7,8E-08	-1,0E-06	-1,4E-06	-4,7E-08
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	9,4E-07	1,3E-06	8,3E-09	-1,6E-07	-2,0E-07	-5,0E-09
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2,5</sub> eq	1,1E-02	1,8E-02	1,8E-04	-4,3E-03	-2,4E-03	-1,1E-04
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	2,7E+00	2,8E+00	1,4E-03	-3,7E-02	-3,1E-02	-8,6E-04
Acidificazione	mol H+ eq	1,1E-01	1,9E-01	1,4E-03	-3,6E-02	-4,2E-02	-8,3E-04
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	2,5E-02	2,7E-01	4,4E-03	-1,3E-01	-1,2E-01	-2,7E-03
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	4,7E-03	6,8E-03	2,0E-05	-5,8E-04	-1,5E-03	-1,2E-05
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	2,8E-03	2,5E-02	4,1E-04	-1,2E-02	-1,1E-02	-2,5E-04
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	79,5	127,2	2,1	-26,9	-21,6	-1,3
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	2,2E-02	4,2E-02	6,4E-05	-9,7E-03	-1,0E-02	-3,9E-05
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	3,7E-04	6,4E-04	1,6E-05	-1,8E-04	-9,9E-05	-9,6E-06
Impatto energetico (CED)	MJ	1.549,8	1.731	5,7	-101,1	-82,4	-3,5
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-1.044,5	1,7	0,5	-1.045,8	-0,5	-0,3

### 3.2.2.3 *Confronto tra le tecnologie di recupero del fresato*

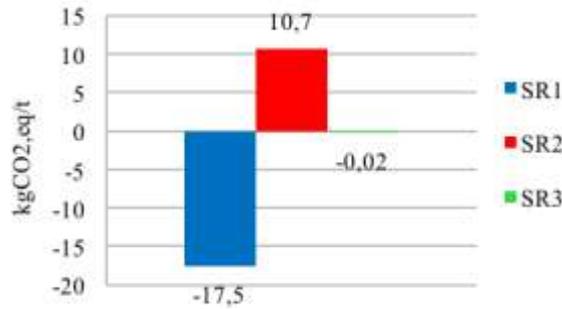
In Tabella 137 è riportato il confronto tra le tre tecnologie di recupero del fresato implementate a livello regionale, ovvero il recupero a caldo (scenario SR1) e il recupero a freddo per la produzione di eco-basi (scenario SR2); è stato preso in esame anche il recupero a freddo per la produzione di misto cementato ad alta duttilità (scenario SR3), opzione ancora in fase di sperimentazione ed inserita solo all'interno dell'analisi di sensitività, per confrontarne le prestazioni con le altre soluzioni già consolidate. Dai risultati emerge che il recupero a caldo è la tecnica che, ad oggi, permette di ottenere i maggiori benefici a livello ambientale, mentre SR3 risulta lo scenario di recupero che impatta maggiormente sull'ambiente, a causa degli ingenti impatti indotti dall'utilizzo di emulsione bituminosa. Infatti, mentre gli scenari SR1 e SR2 presentano benefici netti (valori in segno negativo) per la riduzione dello strato di ozono, l'assunzione di materiale particolato, l'acidificazione, l'eutrofizzazione terrestre, l'eutrofizzazione in acqua marina e per l'impatto energetico, nello scenario SR3 queste categorie di impatto assumono tutte segno positivo. Solo per il riscaldamento globale si ottiene un beneficio ambientale nello scenario SR3, seppur limitato e pari a  $-0,02 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}/\text{t}$ , a differenza dello scenario SR2 in cui l'impatto è in segno positivo ( $+10,7 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}/\text{t}$ ). Bisogna sottolineare che, come già discusso nel paragrafo 3.2.2.2, gli impatti in segno positivo dello scenario SR3 sono associati all'utilizzo dell'emulsione bituminosa nel processo produttivo del MCAD e che la modellizzazione di questo additivo chimico è stata fatta utilizzando un processo di default diecoinvent 3.3 che include, oltre al bitume, una serie di sostanze chimiche e di emissioni altamente impattanti. Di conseguenza, il profilo ambientale di questo sistema di riciclo potrebbe cambiare drasticamente, e risultare anche più vantaggioso, nel caso in cui i consumi e le emissioni indotte dalla produzione dell'emulsione risultassero inferiori rispetto a quelle presenti nel processo diecoinvent 3.3 o, ancor più, se venisse utilizzato un additivo con analoga funzione ma minor impatto rispetto all'emulsione bituminosa.

In Figura 41 sono riportati in forma grafica i confronti tra gli scenari SR1, SR2 e SR3 per alcuni impatti ambientali, per l'impatto energetico e per il consumo di sabbia e ghiaia; il riciclo a caldo (SR1) presenta i vantaggi maggiori per tutte le categorie di impatto mentre il riciclo a freddo con produzione di eco-basi ha un profilo intermedio tra quello dell'SR1 e dell'SR3, che risulta il peggiore ad eccezione del riscaldamento globale e del consumo di risorsa naturale. Al momento, quindi, la soluzione tecnologica più conveniente sotto il profilo ambientale ed energetico è il riciclo a caldo per la produzione di nuovi conglomerati bituminosi, sebbene in questo processo le percentuali di impiego del fresato siano ancora limitate al 20-40%; al contrario, le tecnologie a freddo, SR2 e SR3, sebbene meno performanti dal punto di vista ambientale, sono in grado di "assorbire" quantitativi maggiori di fresato che possono raggiungere anche il 100% di impiego nel caso delle eco-basi; inoltre, esiste per queste tecnologie un buon margine di miglioramento nel caso in cui si rendano disponibili sul mercato prodotti attivanti alternativi all'emulsione bituminosa, che abbiano un minor impatto ambientale. Infine, è doveroso sottolineare che le miscele a freddo sviluppano minori emissioni durante la stesa e posa in opera dei materiali rispetto ai conglomerati a caldo e dunque i

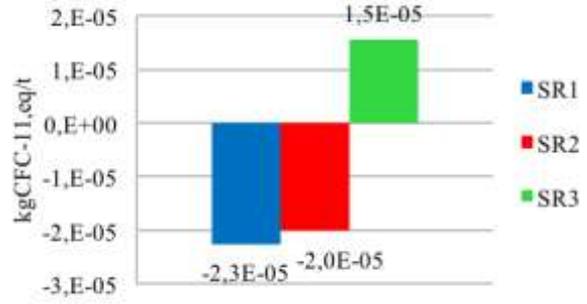
vantaggi ambientali potrebbero risultare maggiori di quelli mostrati in questi confronti; questa fase non rientra nei confini della presente analisi di LCA ma, ai fini decisionali, si dovrebbe tener conto anche dei vantaggi ambientali associati alle operazioni in cantiere per capire effettivamente quale sia la tecnologia di riciclo più sostenibile.

**Tabella 137.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di sabbia e ghiaia tra gli scenari SR1, SR2 e SR3 che descrivono rispettivamente il trattamento di una tonnellata di fresato a caldo, a freddo con produzione di eco-basi e a freddo con produzione di misto cementato ad alta duttilità.

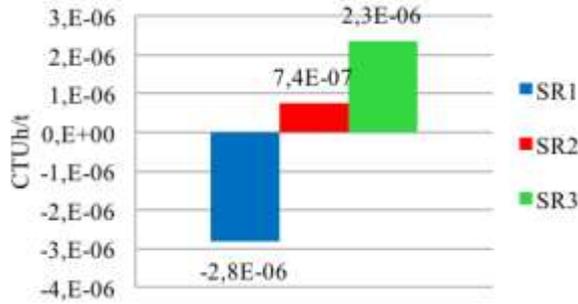
	Unità di misura	SR1	SR2	SR3
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-17,5	10,7	-0,02
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,3E-05	-2,0E-05	1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-2,8E-06	7,4E-07	2,3E-06
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-5,2E-07	1,8E-07	9,4E-07
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2,5</sub> eq	-1,3E-02	-5,5E-03	1,1E-02
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-1,7E-01	1,8E+00	2,7E+00
Acidificazione	mol H+ eq	-1,7E-01	-8,6E-02	1,1E-01
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-3,1E-01	-6,0E-02	2,5E-02
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-1,6E-03	2,4E-03	4,7E-03
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,9E-02	-6,7E-03	2,8E-03
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-67,5	2,3	79,5
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	-1,9E-03	2,9E-02	2,2E-02
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,4E-04	1,0E-05	3,7E-04
Impatto energetico (CED)	MJ	-1.779	-1.485	1.550
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-1.011	-664	-1.045



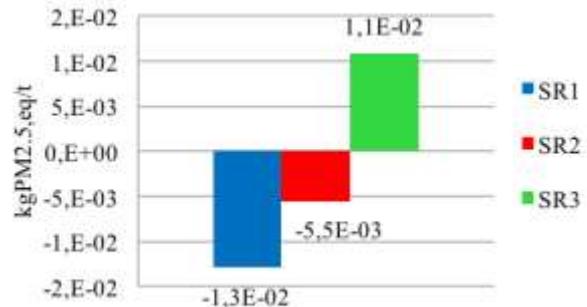
(a) Riscaldamento globale



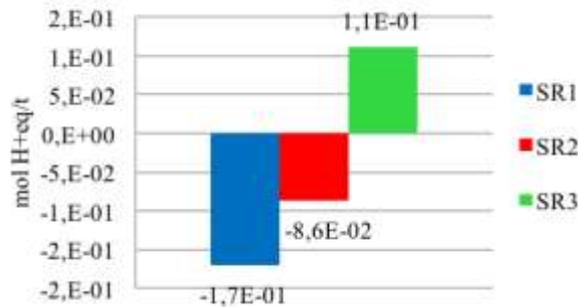
(b) Riduzione dello strato di ozono



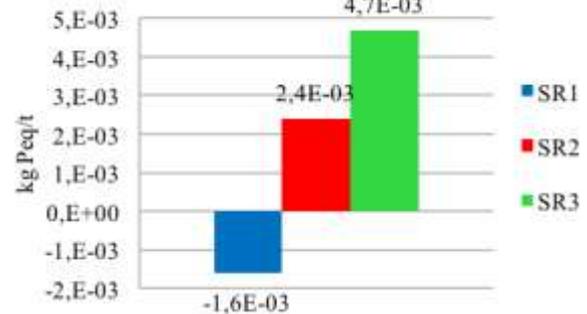
(c) Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)



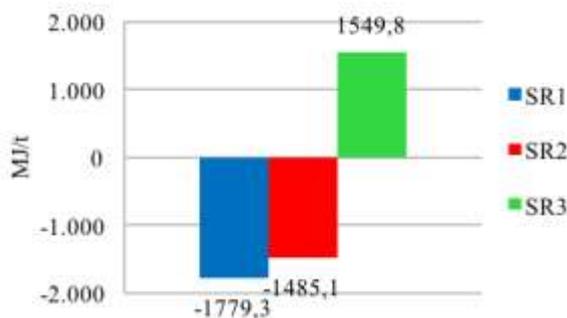
(d) Assunzione di materiale particolato



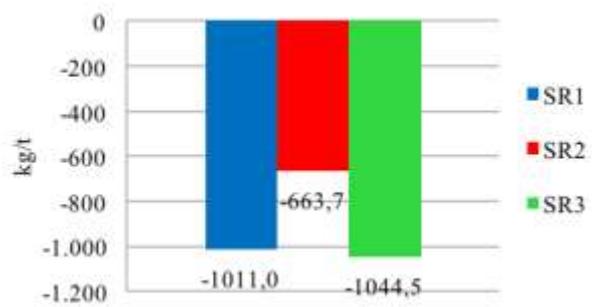
(e) Acidificazione



(f) Eutrofizzazione in acqua dolce



(g) Impatto energetico (CED)



(f) Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)

**Figura 41.** Confronto di alcuni impatti ambientali, dell'impatto energetico e dell'indicatore di sabbia e ghiaia associati al trattamento di una tonnellata di fessato a caldo (scenario SR1), a freddo con produzione di eco-basi (scenario SR2) e a freddo con produzione di misto cementato ad alta duttilità (scenario SR3).

#### 3.2.2.4 *Analisi dei trasporti*

Nelle analisi di sensitività relative ai trasporti sono stati valutati quattro diversi scenari:

- nello scenario ST1 è stata variata la distanza di conferimento del fresato agli impianti ( $ST1_{\min}=30$  km;  $ST1_{\max}=50$  km) rispetto a quella assunta per lo scenario attuale pari a 46 km;
- nello scenario ST2 è stata variata la distanza di approvvigionamento del bitume vergine ( $ST2_{\min}=185$  km;  $ST2_{\max}=240$  km) rispetto a quella assunta per lo scenario attuale pari a 210 km;
- nello scenario ST3 è stata variata la distanza di approvvigionamento del cemento ( $ST3_{\min}=60$  km;  $ST3_{\max}=100$  km) rispetto a quella assunta per lo scenario attuale pari a 79 km;
- nello scenario ST4 è stata variata la distanza di approvvigionamento dell'emulsione bituminosa e degli ACF, sostanze chimiche utilizzate rispettivamente nel recupero a freddo e a caldo del fresato, ( $ST4_{\min}=30$  km;  $ST4_{\max}=70$  km) rispetto a quella assunta nello scenario attuale pari a 48 km.

In Tabella 138 sono riportati i risultati delle analisi di sensitività dei trasporti, in termini di impatti totali del sistema e calcolati rispetto alle 382.488 tonnellate di fresato recuperate in regione. Dai risultati emerge che la maggiore riduzione degli impatti rispetto allo scenario attuale si registra nello scenario  $ST1_{\min}$  ovvero quando si diminuisce la distanza di conferimento del fresato agli impianti. Variando i trasporti di approvvigionamento degli altri materiali, gli impatti del sistema rimangono pressoché invariati, in quanto i quantitativi di bitume vergine, nonché di cemento e additivi chimici sono molto piccoli in confronto alla quantità di fresato in ingresso al sistema. A titolo di esempio, nello scenario  $ST1_{\min}$  si osserva una riduzione del 35% per il riscaldamento globale rispetto allo scenario attuale (Tabella 132), mentre nello scenario  $SR2_{\min}$  (in cui viene ridotta la distanza di approvvigionamento del bitume vergine) la riduzione è solo del 3%; per la categoria di impatto ambientale relativa all'assunzione di materiale particolato, riducendo la distanza di conferimento del fresato si ottiene un beneficio aggiuntivo dell'11%, mentre riducendo la distanza di approvvigionamento del cemento l'impatto rimane invariato rispetto allo scenario attuale.

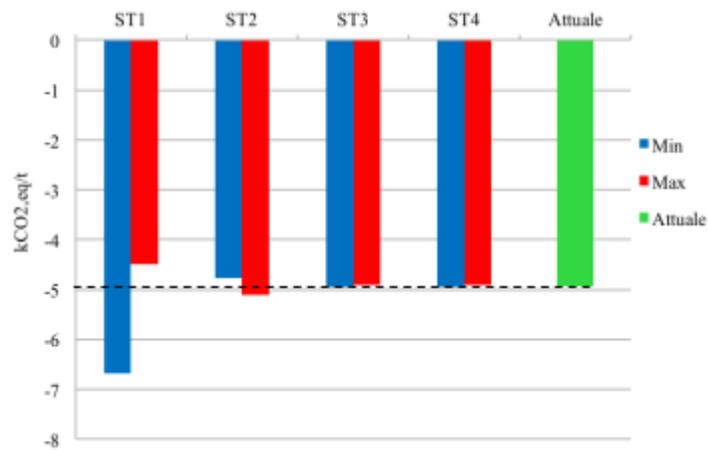
La maggiore riduzione degli impatti rispetto allo scenario attuale si registra per l'impoverimento delle risorse minerali e fossili, dove l'impatto passa da  $-5$  kgSb<sub>eq</sub> nello scenario attuale a  $-46,1$  kgSb<sub>eq</sub> nello scenario  $ST1_{\min}$ . L'indicatore di consumo di risorsa naturale non presenta variazioni significative tra uno scenario e l'altro, in quanto aumentando o diminuendo le distanze di trasporto cambia solo il quantitativo di sabbia e ghiaia impiegato per la costruzione delle infrastrutture stradali, mentre rimangono invariati i quantitativi di inerti vergini risparmiati nel processo di recupero. Allo stesso modo, è lo scenario  $ST1_{\max}$  in cui viene aumentata la distanza di conferimento dei rifiuti dove si registra l'aumento più significativo degli impatti ambientali e dell'impatto energetico, mentre negli altri scenari peggiorativi (aumento delle distanze di approvvigionamento del bitume vergine, del cemento e degli additivi chimici) gli impatti risultano invariati.

In Figura 42 sono riportati in forma grafica i confronti tra gli scenari alternativi dei trasporti e lo scenario attuale per le categorie di impatto del riscaldamento globale, della riduzione dello strato di ozono e dell'assunzione di particolato e per l'impatto energetico: i valori sono espressi per tonnellata di fresato in ingresso al sistema.

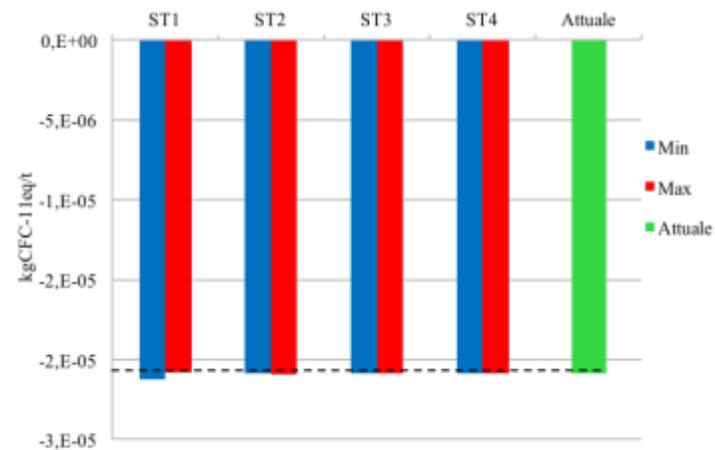
Dall'analisi si può concludere che è la distanza di conferimento del fresato agli impianti ad influenzare in modo significativo i risultati finali dell'analisi LCA2, mentre la variazione delle distanze di approvvigionamento degli altri materiali non condiziona gli impatti complessivi e il consumo di sabbia e ghiaia.

**Tabella 138.** Indicatori di impatto ambientale, impatto energetico e consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) riferiti alla gestione di 382.488 tonnellate di fresato negli scenari alternativi ST1, ST2, ST3 e ST4 in cui variano le distanze di trasporto del fresato agli impianti, del bitume vergine, del cemento e degli additivi chimici (emulsione bituminosa e ACF).

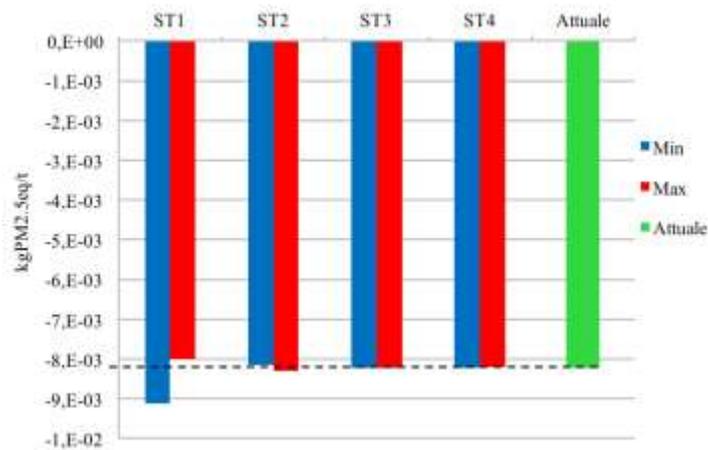
	Unità di misura	ST1		ST2		ST3		ST4	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Categorie di impatto ambientale (ILCD):									
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-2,6E+06	-1,7E+06	-1,8E+06	-2,0E+06	-1,9E+06	-1,9E+06	-1,9E+06	-1,9E+06
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-8,12	-7,96	-7,98	-8,00	-7,99	-7,99	-7,99	-7,99
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-0,42	-0,23	-0,25	-0,28	-0,27	-0,27	-0,27	-0,26
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-9,2E-02	-7,0E-02	-7,2E-02	-7,6E-02	-7,4E-02	-7,4E-02	-7,4E-02	-7,4E-02
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-3,5E+03	-3,1E+03	-3,1E+03	-3,2E+03	-3,1E+03	-3,1E+03	-3,1E+03	-3,1E+03
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	1,3E+05							
Acidificazione	molc H+ eq	-5,1E+04	-4,7E+04	-4,8E+04	-4,8E+04	-4,8E+04	-4,8E+04	-4,8E+04	-4,8E+04
Eutrofizzazione terrestre	molc N eq	-7,7E+04	-6,6E+04	-6,7E+04	-6,9E+04	-6,8E+04	-6,8E+04	-6,8E+04	-6,8E+04
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-104,8	-48,9	-55,8	-65,2	-60,4	-59,8	-60,6	-59,5
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-7,3E+03	-6,3E+03	-6,4E+03	-6,6E+03	-6,5E+03	-6,5E+03	-6,5E+03	-6,5E+03
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1,1E+07	-5,6E+06	-6,3E+06	-7,0E+06	-6,6E+06	-6,6E+06	-6,7E+06	-6,5E+06
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	3,9E+03	4,0E+03						
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-46,1	5,3	-0,5	-10,4	-5,2	-4,8	-5,4	-4,5
Impatto energetico (CED)	MJ	-6,3E+08	-6,1E+08	-6,2E+08	-6,2E+08	-6,2E+08	-6,2E+08	-6,2E+08	-6,2E+08
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-3,5E+08							



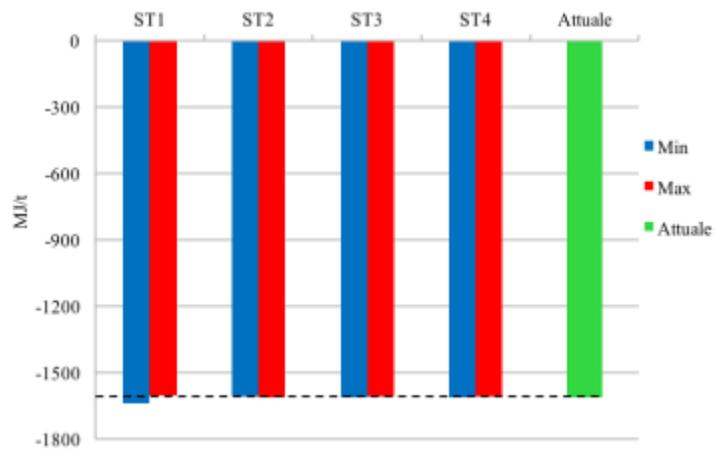
(a) Riscaldamento globale



(b) Riduzione dello strato di ozono



(c) Assunzione di materiale particolato



(d) Impatto energetico (CED)

**Figura 42.** Alcuni impatti ambientali e impatto energetico riferiti alla gestione di una tonnellata di fessato negli scenari ST1, ST2, ST3 e ST4 a confronto con lo scenario attuale.

### 3.2.3 Scenario migliorativo futuro

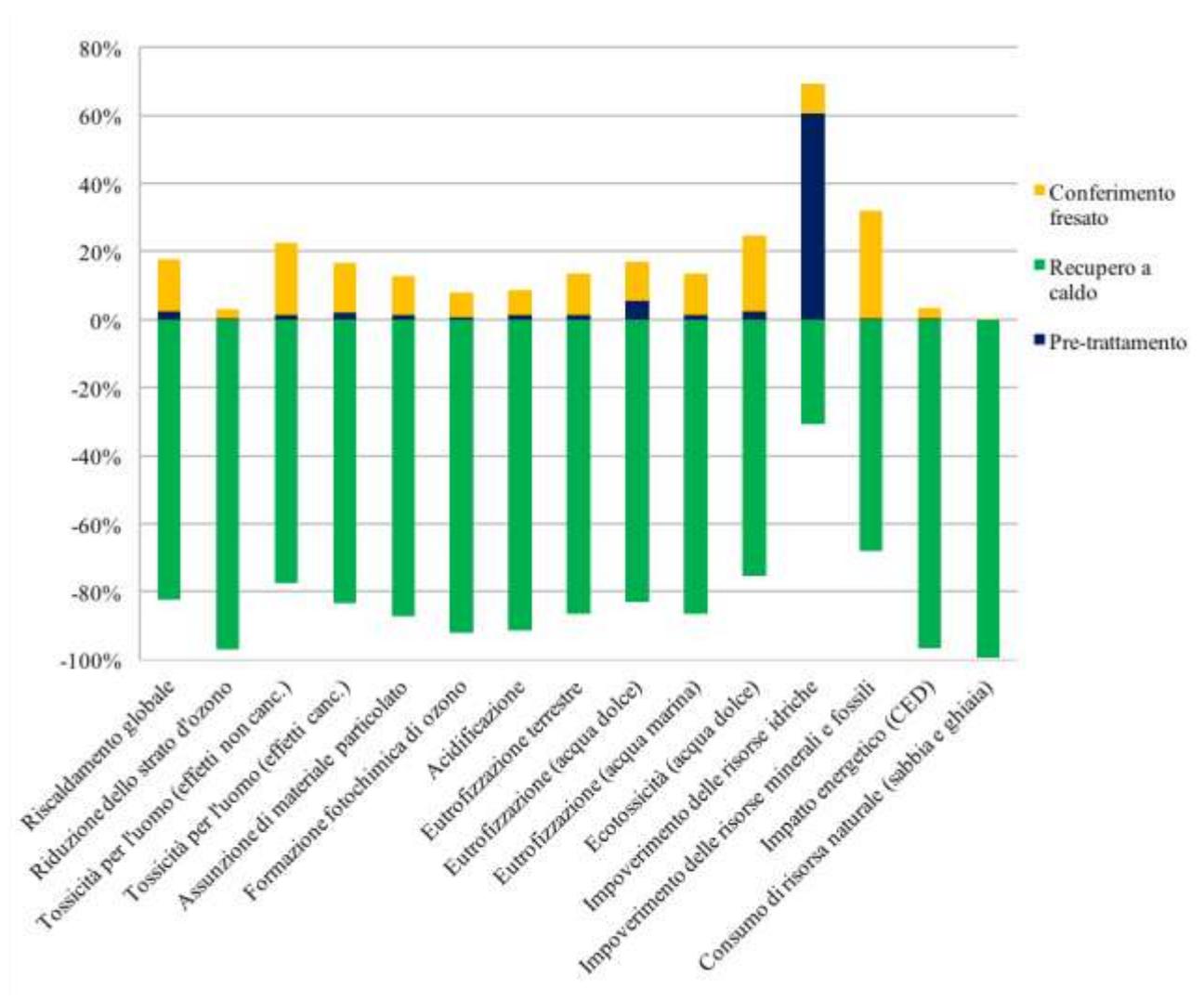
In base ai risultati ottenuti nello scenario attuale e attraverso le analisi di sensitività degli scenari alternativi è stato possibile costruire uno scenario migliorativo futuro nell'ottica di massimizzare le prestazioni dell'intero sistema di recupero dedicato del fresato rispetto alla situazione attuale. Per la costruzione dello scenario migliorativo futuro sono stati quindi ottimizzati i principali parametri del sistema, in particolare:

- l'intero quantitativo di fresato (382.488 tonnellate) è stato inviato al recupero a caldo per la produzione di nuovo conglomerato bituminoso, in quanto dal confronto tra gli scenari SR1 e SR2 nel paragrafo 3.2.1 è emerso che il recupero a caldo permette di ottenere vantaggi ambientali complessivi maggiori rispetto al recupero a freddo con produzione di eco-basi;
- è stata minimizzata la distanza di conferimento del fresato agli impianti (assunta pari a 30 km) e di approvvigionamento degli ACF (assunta pari a 30 km), mentre la distanza di approvvigionamento del bitume vergine è rimasta invariata rispetto allo scenario attuale (215 km).

In Tabella 139 sono riportati gli impatti e il consumo di sabbia e ghiaia associati alla gestione di 382.488 tonnellate di fresato nello scenario migliorativo futuro, a confronto con i risultati dello scenario attuale di gestione, mentre in Figura 43 sono mostrati in forma grafica i contributi percentuali delle diverse fasi della gestione sugli impatti totali e sul consumo di risorsa naturale. Dai risultati emerge che esiste un discreto margine di miglioramento per il sistema; infatti, nello scenario migliorativo si ottengono benefici per l'impatto energetico, per il consumo di sabbia e ghiaia e per tutte le categorie di impatto ambientale, ad eccezione dell'impoverimento delle risorse idriche (per questo indicatore, il consumo di energia elettrica durante la fase di pre-trattamento del fresato (barra blu in Figura 43) risulta essere il processo maggiormente impattante). L'impatto associato alla formazione fotochimica di ozono, che è un impatto in segno positivo nello scenario attuale, diventa un beneficio per l'ambiente nello scenario migliorativo futuro, passando da  $+1,3E+05$  kgNMVOC a  $-6,1E+04$  kgNMVOC (diminuzione dell'impatto del 146% rispetto lo scenario attuale). Le maggiori riduzioni degli impatti nello scenario migliorativo rispetto a quello attuale si osservano per il riscaldamento globale (riduzione del 179% dell'impatto complessivo), per l'eutrofizzazione in acqua dolce (riduzione del 708% dell'impatto complessivo) e per l'impoverimento delle risorse minerali e fossili (riduzione del 1.675% dell'impatto complessivo).

Per capire se lo scenario migliorativo è potenzialmente applicabile è necessario considerare l'intera produzione di conglomerati bituminosi a livello regionale: nel 2013 (ultimo dato disponibile) in Italia sono state prodotte 19.418.300 tonnellate di conglomerati bituminosi (fonte: SITEB – Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade) e, assumendo che la Lombardia contribuisca per il 24% (come per il PIL nazionale, dati ISTAT 2014), si può approssimare una produzione di conglomerati bituminosi in regione di circa 4,6 milioni di tonnellate. Pertanto, se tutti i produttori di conglomerato bituminoso implementassero il recupero del fresato a caldo, introducendo circa il 19% di fresato nella miscela finale (che è una prassi piuttosto diffusa, come emerso dalle indagini telefoniche ai gestori – Tabella 40), verrebbero impiegate circa 885.000

tonnellate di fresato, quantitativo decisamente maggiore rispetto a quello avviato a recupero dedicato nel 2014 pari a 382.488 tonnellate di fresato. Tuttavia, se si considera la produzione totale di fresato in regione (i.e. 1.018.850 tonnellate nel 2014) o il rifiuto gestito (971.656 t), se si volesse garantire il totale riciclo del fresato attraverso tecnologie a caldo, sarebbe necessario raggiungere una percentuale di reinserimento di fresato nei nuovi conglomerati bituminosi almeno pari al 22% (tecnicamente raggiungibile attraverso le tecnologie ad oggi disponibili). Si può concludere che, in linea teorica, sarebbe possibile recuperare l'intero quantitativo di fresato prodotto in regione attraverso sistemi di riciclo a caldo purché venga aumentata la percentuale di fresato aggiunto nelle miscele.



**Figura 43.** Contributi percentuali delle diverse fasi del recupero del fresato sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale nello scenario migliorativo futuro.

**Tabella 139.** Confronto degli indicatori di impatto ambientale, energetico e del consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia) riferiti alla gestione di 382.488 tonnellate di fresato nello scenario migliorativo e nello scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario migliorativo	Scenario attuale	Differenza <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-13,7	-4,9	-179%
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,2E-05	-2,1E-05	-4%
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-2,0E-06	-7,0E-07	-186%
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-4,1E-07	-1,9E-07	-114%
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2,5</sub> eq	-1,1E-02	-8,2E-03	-33%
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-1,6E-01	3,5E-01	-146%
Acidificazione	mol H <sup>+</sup> eq	-1,5E-01	-1,3E-01	-23%
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	-2,6E-01	-1,8E-01	-49%
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-1,3E-03	-1,6E-04	-708%
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,5E-02	-1,7E-02	-46%
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-45,4	-17,3	-163%
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	2,4E-03	1,0E-02	-77%
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-2,3E-04	-1,3E-05	-1675%
Impatto energetico (CED)	MJ	-1715,0	-1611,4	-6%
Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)	kg	-1006,7	-917,6	-10%

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### **3.2.4 Conclusioni LCA2 e raccomandazioni per il miglioramento del sistema di gestione delle miscele bituminose**

I risultati dell'analisi di LCA del sistema attuale di recupero delle miscele bituminose (i.e. fresato d'asfalto) hanno mostrato che, per la maggior parte delle categorie di impatto ambientale (eccetto l'impoverimento delle risorse idriche e la formazione fotochimica di ozono), l'impatto energetico e il consumo di sabbia e ghiaia, gli indicatori hanno segno negativo dimostrando che i benefici derivanti dal recupero del fresato compensano gli impatti indotti dalla gestione e dal trattamento dello stesso. L'attuale sistema implementato in Lombardia risulta quindi già caratterizzato da buone prestazioni ambientali ed energetiche, grazie al riciclo a caldo del fresato che risulta ad oggi la soluzione tecnologica più diffusa ed alla quale sono associati i maggiori vantaggi ambientali. Infatti, le opzioni di riciclo a freddo, per la produzione di misti cementati (ancora in fase sperimentale) e di eco-basi (il cui impiego si sta diffondendo in regione), presentano al momento prestazioni ambientali ed energetiche inferiori a causa dell'impiego di additivi chimici (emulsioni bituminose) la cui produzione appare altamente impattante, sebbene per questo processo non siano stati utilizzati dati primari; tuttavia, è bene specificare che la presente analisi LCA non include i benefici/impatti connessi alla fase di stesa e posa in opera dei diversi materiali, esclusa dai confini dello studio, che potrebbe determinare vantaggi ambientali maggiori per i conglomerati a freddo (eco-basi e MCAD) caratterizzati da emissioni molto minori rispetto ai CB a caldo.

Fermo restando queste considerazioni, è stato costruito uno scenario migliorativo futuro basato esclusivamente sul riciclo a caldo del fresato e sull'ottimizzazione dei trasporti per il conferimento del rifiuto agli impianti di confezionamento dei conglomerati bituminosi; dai risultati emerge un netto miglioramento delle prestazioni rispetto alla situazione attuale, con un ulteriore aumento dei benefici, in particolare per il riscaldamento globale (-179% dell'impatto), per l'eutrofizzazione in acqua dolce (-708% dell'impatto) e per l'impoverimento delle risorse minerali e fossili (-1.675% dell'impatto). L'impatto associato alla formazione fotochimica di ozono, in segno positivo nello scenario attuale, diventa un beneficio per l'ambiente nello scenario migliorativo futuro; solo l'impoverimento delle risorse idriche presenta un impatto in segno positivo dovuto al consumo di energia elettrica per il pre-trattamento del fresato.

Alla luce di questi risultati, le azioni che possono essere intraprese sono:

- semplificazione della normativa e del regime autorizzatorio per agevolare il riciclo del fresato;
- aggiornamento dei Capitolati Speciali di Appalto che spesso non prevedono l'utilizzo del fresato o introducono limiti di impiego molto prudenziali (ad esempio, alcune stazioni appaltanti escludono l'utilizzo del fresato negli strati di usura);
- promozione del riciclo a caldo del fresato;

- incentivazione di interventi di revamping degli impianti di CB a caldo per promuovere l'adozione di tecnologie a minor impatto ambientale e in grado di raggiungere elevate percentuali di impiego di fresato nelle miscele;
- ottimizzazione dei trasporti dei rifiuti che tenga conto della disponibilità degli impianti di riciclo in regione.

### 3.3 Risultati dell'analisi LCA3 (rifiuti a base di gesso)

#### 3.3.1 Scenario attuale

In questo paragrafo vengono descritti i risultati dell'analisi LCA3 relativi al recupero dedicato dei rifiuti C&D a base di gesso in regione Lombardia. I metodi di caratterizzazione usati sono quelli illustrati nel paragrafo 2.2.1; oltre agli indicatori di impatto ambientale (metodo ILCD) e di impatto energetico (CED), si riportano anche i due indicatori costruiti *ad hoc* per il presente studio che comprendono l'indicatore per la stima del consumo di gesso naturale, espresso in kg di gesso consumato o risparmiato per tonnellata di rifiuti in gesso, e l'indicatore per la quantificazione del volume di discarica risparmiata, espresso in m<sup>3</sup> di discarica per tonnellata di rifiuti.

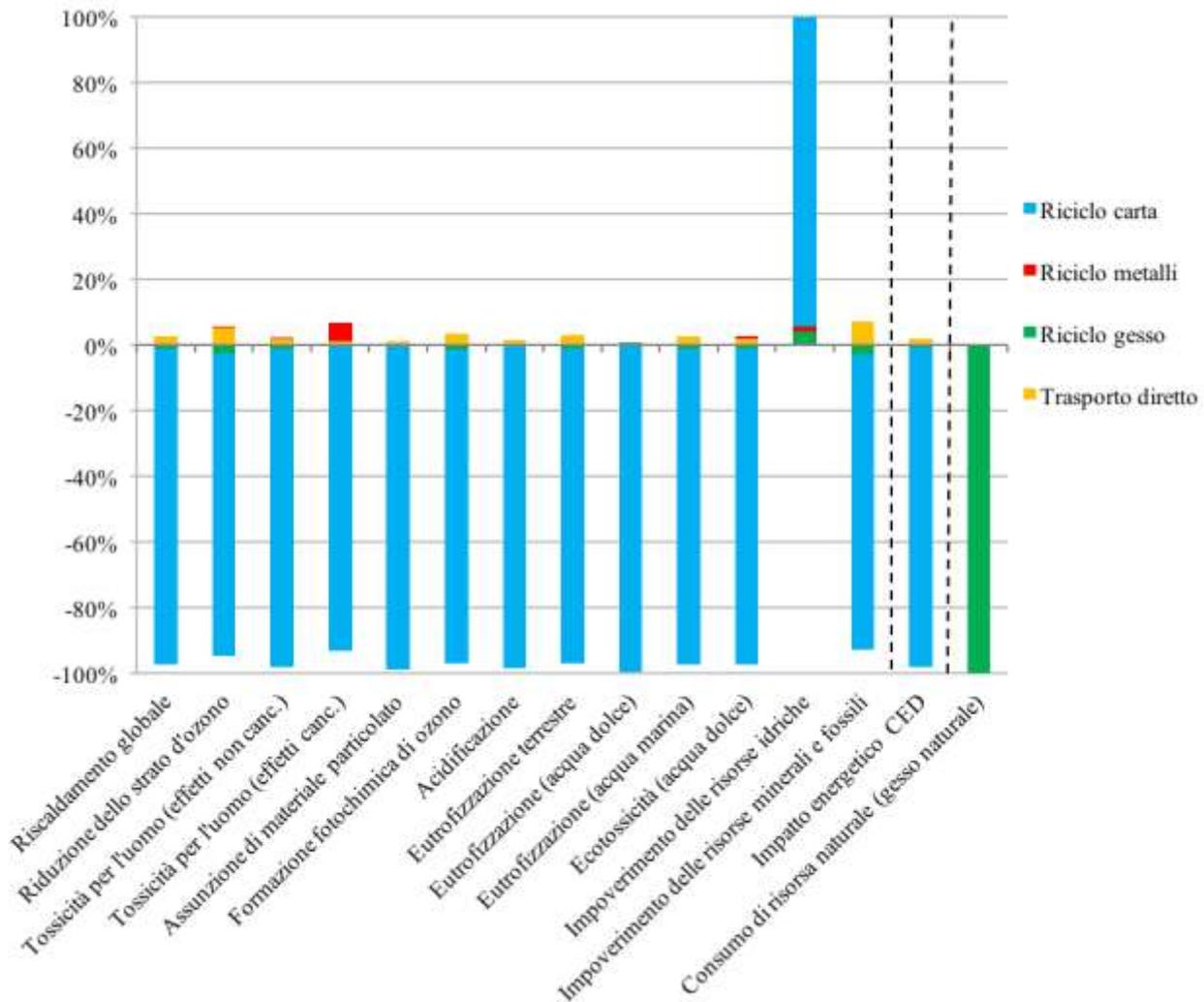
#### Risultati specifici

Nella Tabella 140 sono riportati i valori degli indicatori ottenuti per lo scenario attuale di gestione, riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso inviati a trattamento in impianto dedicato. Sono stati evidenziati i contributi derivanti dalle fasi della gestione prese in considerazione, che comprendono il trasporto per il conferimento dei rifiuti all'impianto di recupero, il riciclo dei rifiuti in gesso, il riciclo dei metalli ferrosi e di carta/ cartone separati durante il trattamento. Dalla Tabella 140 si può osservare che gli indicatori di impatto ambientale hanno tutti segno negativo, ad eccezione dell'impovertimento delle risorse idriche (0,22 m<sup>3</sup><sub>water,eq</sub>/t), indice del fatto che attraverso il trattamento dedicato dei rifiuti in gesso si riescono a compensare quasi tutti gli impatti sull'ambiente associati alle altre fasi di gestione e trattamento. Tuttavia, dai risultati appare evidente che il beneficio ottenuto in quasi tutte le categorie di impatto è dovuto essenzialmente agli impatti evitati grazie al riciclo della carta e cartone, ad eccezione del consumo/risparmio di gesso naturale, in cui il vantaggio è dovuto esclusivamente alla produzione di gesso riciclato ed al suo utilizzo in sostituzione del gesso vergine.

Come si vede dalla Figura 44, dove sono riportati, per ciascuna categoria di impatto, i contributi percentuali delle diverse fasi di gestione rispetto agli impatti complessivi del sistema, il riciclo di carta/cartone conferisce un beneficio maggiore del 90% in quasi tutte le categorie di impatto ambientale (98,5% nella categoria di impatto associata all'assunzione di materiale particolato e 99,5% in quella relativa all'eutrofizzazione in acqua dolce). Il riciclo e la mancata produzione di gesso naturale comporta vantaggi ambientali, sebbene di minore entità, in quasi tutte le categorie di impatto, ad esclusione di quelle associate all'eutrofizzazione dell'acqua dolce (9,56E-05 kgP<sub>eq</sub>/t) e all'impovertimento delle risorse idriche (0,01 m<sup>3</sup><sub>water,eq</sub>/t) dove gli impatti sono di segno positivo, indicando un carico aggiuntivo sul sistema, e sono dovuti principalmente all'energia elettrica consumata dal trattamento.

**Tabella 140.** Indicatori di impatto e consumo di risorsa naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso prodotto e trattato in regione nel 2014.

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-158,49	4,47	-1,53	-0,19	-161,24
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,4E-05	8,5E-07	-4,2E-07	1,4E-08	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,0E-05	1,1E-06	-6,4E-07	1,3E-08	-5,1E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,0E-05	1,4E-07	-3,8E-08	6,9E-07	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,21	2,4E-03	-7,7E-04	-7,4E-05	-0,21
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,73	0,03	-0,01	-5,3E-04	-0,74
Acidificazione	moli H+ eq	-1,42	0,02	-0,01	-7,5E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,73	0,09	-0,03	-1,6E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,12	3,47E-04	9,56E-05	-3,2E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,28	0,01	-2,84E-03	-1,5E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.330	28	-15	10	-1353
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,22	5,47E-04	0,01	2,9E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,3E-03	3,7E-04	-1,5E-04	-4,80E-06	-4,52E-03
Impatto energetico CED	MJ	-3.859	76	-29	-2	-3.904
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	1,96E-03	-755	0	0



**Figura 44.** Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione dei rifiuti sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale del sistema attuale.

Attraverso l'analisi dei contributi si è potuto capire quali sono i processi che incidono maggiormente sul risultato finale, sia in termini di impatto che di beneficio, per ogni categoria di impatto ambientale.

- L'impatto legato al cambiamento climatico mostra un beneficio derivante prevalentemente dalle azioni di recupero della carta, e in misura minore dal recupero di gesso e metalli ferrosi. Il contributo al *saving* è dovuto principalmente all'evitata emissione di CO<sub>2</sub> fossile grazie al mancato consumo di energia elettrica per produrre pasta termomeccanica: infatti, il consumo associato alla produzione di pasta termomeccanica vergine, evitata attraverso il riciclo degli scarti cellulosici, è di tre ordini di grandezza maggiore (2.156 kWh/t) rispetto al consumo indotto dal trattamento di riciclo dei rifiuti in gesso (6,11 kWh/t). Di conseguenza, anche se la quantità di carta separata non è elevata, gli impatti evitati sono tali da rendere il contributo di questo processo determinante sulle prestazioni complessive del sistema;

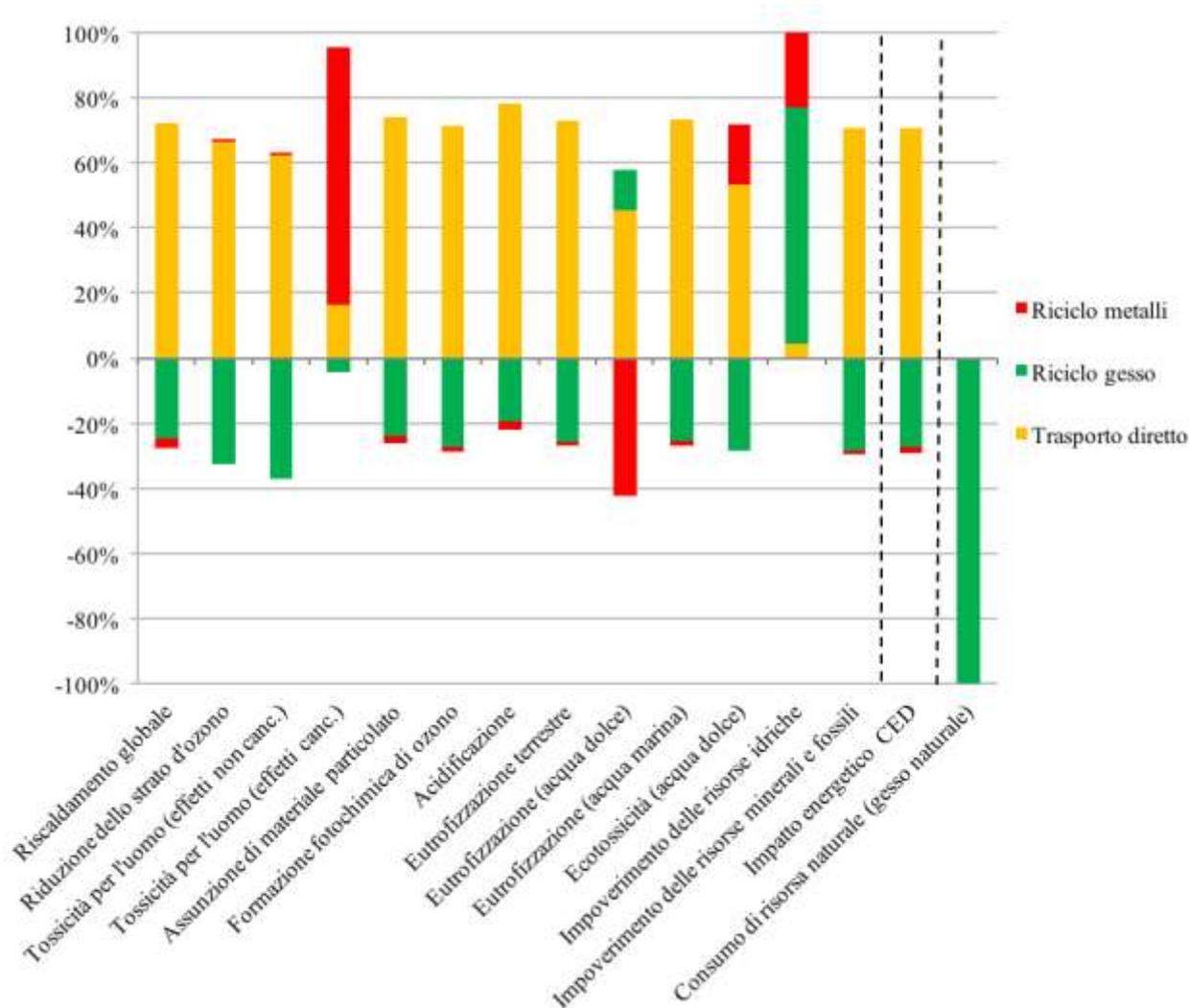
- Nella categoria di impatto riferita all’impoverimento delle risorse idriche il riciclo genera impatti molto elevati e ciò è essenzialmente dovuto alla produzione di energia elettrica necessaria per trattare, separare e recuperare i diversi flussi di rifiuti e materiali: infatti, per la modellizzazione si è usato il processo rappresentativo del mix energetico italiano (*Electricity, medium voltage (IT), market for*), che include una quota del 14% di idroelettrico cui viene assegnato un “consumo” di risorsa idrica;
- Nella categoria di impatto inerente la tossicità umana (effetti cancerogeni), se si escludesse il contributo in segno negativo del riciclo della carta, si otterrebbe nel complesso un indicatore in segno positivo, poiché il beneficio ottenuto con il riciclo dei rifiuti in gesso è minore sia dell’impatto derivante dal trasporto, sia, da quello più evidente associato alla produzione di acciaio secondario; questo processo, infatti, dà luogo a scarti che sono smaltiti in discarica e che rilasciano nell’ambiente Cromo esavalente attraverso la lisciviazione nel percolato;
- La fase del trasporto contribuisce in misura simile all’interno delle categorie di impatto inerenti l’eutrofizzazione terrestre e marina, l’acidificazione e la formazione fotochimica d’ozono. Il fatto che questo contributo abbia segno positivo, e che quindi rappresenti un impatto sul sistema, è legato all’emissione degli ossidi di azoto dovuti alla combustione di diesel.

Dato l’elevata incidenza del processo di riciclo della carta sui risultati finali dell’analisi LCA3, si è voluto analizzare il profilo ambientale del sistema ponendo l’attenzione esclusivamente sul gesso riciclato, che rappresenta la principale materia prima secondaria ottenuta attraverso il trattamento dedicato dei rifiuti a base di gesso. In Tabella 141 sono riportati i valori che gli indicatori assumono nella LCA3, riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti, nel caso in cui si trascuri il contributo dovuto al riciclo di carta e cartone mentre in Figura 45 sono riportati, per ciascun indicatore, i contributi percentuali delle diverse fasi di gestione rispetto agli impatti complessivi del sistema, sempre nel caso in cui non venga considerato il processo di riciclo di carta e cartone. Dalla Tabella 141 si nota come, in questo caso, gli indicatori hanno tutti segno positivo, ad eccezione del consumo di risorsa naturale che si mantiene invariato. Senza il *saving* generato dal riciclo della carta, i benefici associati al recupero del gesso e dei metalli non sono sufficienti a compensare gli impatti provocati dai trasporti, che hanno un peso determinante sul sistema (come già osservato per l’LCA1); il contributo dei trasporti è infatti maggiore del 60-70% per la maggior parte delle categorie di impatto (Figura 45), ad esclusione di tossicità per l’uomo (effetti cancerogeni), eutrofizzazione in acqua dolce, ecotossicità in acqua dolce e impoverimento delle risorse idriche. Dal grafico in Figura 45 si nota che il riciclo del gesso comporta sempre benefici, ad eccezione dell’eutrofizzazione in acqua dolce e dell’impoverimento delle risorse idriche; il contributo maggiore è riferito al consumo evitato di gesso naturale, mentre per quasi tutte le altre categorie di impatto contribuisce con un beneficio del 20-30% sul totale della categoria di impatto. Infine, il riciclo dei metalli genera per lo più benefici, eccetto per la tossicità umana, l’ecotossicità in acqua dolce e il consumo delle risorse idriche.

Alla luce dei risultati ottenuti si può quindi concludere che è necessario ottimizzare il trattamento di riciclo dedicato dei rifiuti a base di gesso in modo da ottenere, contestualmente alla polvere di gesso riciclato, rifiuti in carta di buona qualità da poter inviare nelle cartiere, poiché da ciò derivano i vantaggi ambientali più significativi.

**Tabella 141.** Indicatori di impatto e consumo di risorsa naturale associati al recupero di una tonnellata di rifiuti in gesso in regione, al netto del beneficio derivante dal riciclo di carta e cartone.

	Unità di misura	Scenario attuale (no Carta)
Categorie di impatto ambientale (ILCD):		
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,75
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	4,5E-07
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	4,5E-07
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,9E-07
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,6E-03
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,02
Acidificazione	moli H+ eq	0,02
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,06
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,2E-04
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	5,2E-03
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	22,60
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,01
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	2,2E-04
Impatto energetico CED	MJ	44
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755



**Figura 45.** Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale del sistema, al netto del riciclo di carta e cartone.

### **Risultati complessivi del sistema regionale**

In regione Lombardia nel 2014 sono state gestite 97 tonnellate di rifiuti C&D a base gesso inviate a trattamento dedicato nell'impianto di riciclo sperimentale; moltiplicando gli impatti specifici mostrati in Tabella 140 per questo quantitativo è possibile calcolare gli impatti totali associati a tale filiera di recupero e riportati in Tabella 142. Dai risultati complessivi del sistema si evince che, in Lombardia, il trattamento dedicato del gesso ha portato ad un risparmio di 15 tonnellate di CO<sub>2,eq</sub>, 374 GJ di energia ed alla evitata estrazione di 73 tonnellate di gesso naturale. Tuttavia, se si osservano i risultati dell'ultima colonna in Tabella 142, ottenuti escludendo i benefici associati al recupero della carta, il sistema presenta un beneficio netto solo per l'indicatore del consumo di risorsa naturale.

È stato inoltre stimato il volume di discarica risparmiata per il sistema LCA3, calcolato come rapporto tra le 97 tonnellate di rifiuto a base gesso avviate al trattamento e il suo peso specifico (0,2 t/m<sup>3</sup>, fonte sito

www.gyproc.it); le stime mostrano che, attraverso il recupero del gesso, è stato possibile risparmiare 485 m<sup>3</sup> di discarica.

**Tabella 142.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di risorsa naturale associati al sistema di recupero dedicato dei rifiuti a base di gesso nel 2014, con e senza il riciclo della carta.

	Unità di misura	Scenario attuale	Scenario attuale (no Carta)
Categorie di impatto ambientale (ILCD):			
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,5E+04	266,8
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,4E-03	4,3E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-4,9E-03	4,4E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,0E-03	7,7E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-2,1E+01	0,2
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-3,6E+03	1,5
Acidificazione	moli H <sup>+</sup> eq	-1,4E+02	1,7
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,7E+02	5,5
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-1,2E+01	1,2E-02
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,7E+01	0,5
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1,3E+05	2.192
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	2,2E+01	1,2
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,2E-01	2,1E-02
Impatto energetico CED	MJ	-3,7E+05	4.304
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-7,3E+04	-73.248

### 3.3.2 Scenari alternativi LCA3

#### 3.3.2.1 Scenario SA1

Nella Tabella 143 sono riportati i valori assunti dagli indicatori per 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione nello scenario di utilizzo del gesso riciclato in impianti di produzione dei pannelli in cartongesso (SA1). Gli indicatori risultano in segno negativo (ad eccezione dell'impoverimento delle risorse idriche), grazie al beneficio derivante dal riciclo della carta.

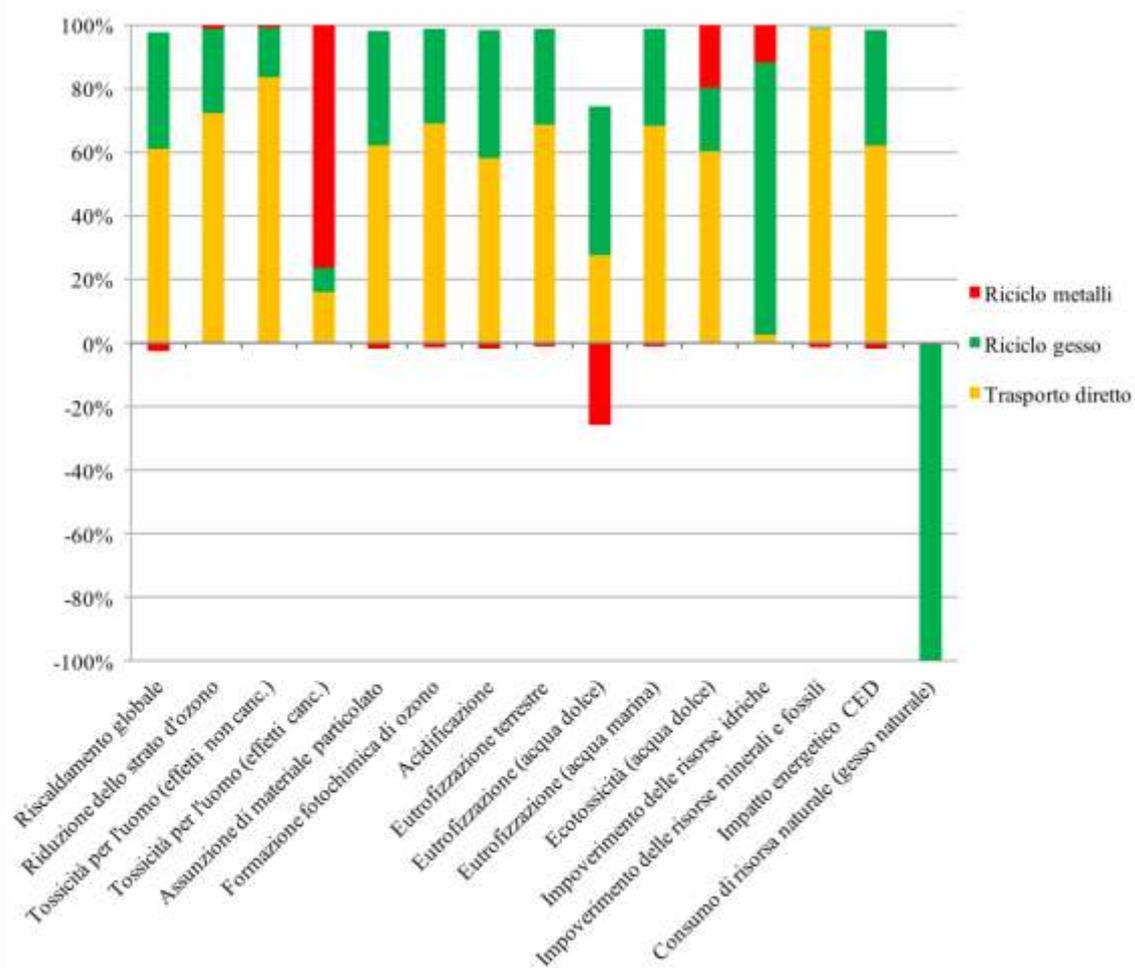
Se si considera solo il processo di riciclo del gesso, in questo scenario, a differenza di quello attuale, il sistema presenta impatti netti (indicatori di segno positivo) ed un minore risparmio di gesso naturale (pari a 740 kg); questo perché il quantitativo di risorsa evitata nel caso di reinserimento del gesso riciclato nei pannelli in cartongesso è inferiore rispetto a quello ottenibile con l'uso del gesso nella produzione dei gessi di defecazione. Gli impatti associati al riciclo del gesso nello scenario SA1, quindi, non sono compensati dai benefici derivanti dall'evitata estrazione e lavorazione del gesso naturale, a causa del peso notevole che

hanno i trasporti di commercializzazione del gesso riciclato. Si ricorda, infatti, che nello scenario SA1 si è scelto di considerare, come destini finali del gesso riciclato, gli impianti di produzione del cartongesso in provincia di Asti, Ravenna e Pisa, da cui deriva una distanza media di trasporto di 253 km per il gesso riciclato e 283 km per il gesso naturale. Il riciclo del gesso genera, per tonnellata di rifiuto trattata, un impatto di 2,7 kg CO<sub>2</sub> eq per la categoria inerente il riscaldamento globale, un consumo energetico di 44,8 MJ, un impatto di 0,04 moli N<sub>eq</sub> per la categoria relativa all'eutrofizzazione terrestre e di 9,71 CTUe per quella riferita all'ecotossicità dell'acqua dolce (Tabella 143). Questa è una differenza considerevole rispetto allo scenario attuale (vedi il processo "riciclo gesso" in Tabella 140), in cui al processo di riciclo del gesso sono associati benefici per quasi tutte le categorie di impatto.

**Tabella 143.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di risorsa naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione nello scenario SA1 (destino del gesso riciclato: produzione di nuovi pannelli in cartongesso).

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-154,34	4,52	2,70	-0,19	-161,37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,4E-05	8,7E-07	3,2E-07	1,4E-08	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-4,9E-05	1,1E-06	2,1E-07	1,3E-08	-5,1E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,0E-05	1,4E-07	7,1E-08	6,9E-07	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,21	2,5E-03	1,5E-03	-7,4E-05	-0,21
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,71	0,03	0,01	-5,3E-04	-0,74
Acidificazione	moli H+ eq	-1,39	0,02	0,02	-7,5E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,66	0,09	0,04	-1,6E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,12	3,4E-04	5,88E-04	-3,2E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,27	0,01	3,72E-03	-1,5E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.305	29,02	9,71	9,56	-1.354
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,24	6,1E-04	0,02	2,9E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,2E-03	3,5E-04	1,9E-07	-4,8E-06	-4,5E-03
Impatto energetico CED	MJ	-3.786	77	45	-2	-3.906
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-740	0	-740	0	0

In Figura 46 sono riportati, per ciascuna categoria di impatto, i contributi percentuali agli impatti delle diverse fasi di gestione rispetto agli impatti complessivi dell'intero sistema nello scenario SA1, trascurando il riciclo della carta. Dal grafico si nota che l'incidenza del trasporto per il conferimento dei rifiuti è maggiore del 60% in tutte le categorie di impatto, se non in quelle associate alla tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), all'eutrofizzazione in acqua dolce e all'impoverimento delle risorse idriche. Dalla Figura 46 si può inoltre osservare che il riciclo del gesso in questo scenario ha un peso notevole in termini, però, di impatto: le operazioni di riciclo contribuiscono per oltre il 40% nelle categorie relative al riscaldamento globale, al consumo energetico, all'acidificazione, all'eutrofizzazione in acqua dolce e all'impoverimento delle risorse idriche.. Il profilo del sistema di gestione e recupero dei rifiuti nello scenario SA1 è quindi molto diverso da quello mostrato in Figura 45 relativo allo scenario attuale e mostra un generale peggioramento delle prestazioni ambientali.



**Figura 46.** Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione sugli impatti complessivi e sul consumo di risorsa naturale del sistema nello scenario SA1, trascurando il riciclo di carta e cartone.

La Tabella 144 mette a confronto lo scenario SA1 con lo scenario attuale, al fine di evidenziare le differenze, sia in termini di impatti che di benefici, derivanti dal diverso destino di utilizzo della polvere di gesso riciclata, i.e. gli impianti di produzione di nuovi pannelli in cartongesso (SA1) vs impianti di produzione di gessi di defecazione (scenario attuale). Per rendere più apprezzabile il confronto tra i due scenari in esame, si è scelto di escludere, nel computo degli impatti, il contributo derivante dal riciclo di carta/cartone (in entrambi gli scenari); tale assunzione sarà ripetuta anche per l'analisi degli altri scenari alternativi. Ciò è stato necessario perché i benefici del riciclo della carta sono talmente maggiori rispetto a quelli derivanti dal riciclo del gesso e dei metalli da oscurare completamente tutti gli altri contributi.

Dal confronto mostrato in Tabella 144, si nota come, rispetto allo scenario attuale, ci sia un notevole peggioramento in quasi tutte le categorie di impatto nello scenario SA1, soprattutto nella riduzione dello strato di ozono ( $1,2E-06$  kg CFC-11<sub>eq</sub> rispetto ai  $4,5E-07$  kg CFC-11<sub>eq</sub>), nella tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni), che aumenta più del doppio portandosi a  $1,3E-06$  CTUh invece di  $4,5E-07$  CTUh nello scenario attuale; l'incremento dell'impatto è ancora più considerevole per l'eutrofizzazione in acqua dolce che raggiunge  $6,1E-04$  kgP<sub>eq</sub> rispetto ai  $1,2E-04$  kgP<sub>eq</sub> dello scenario attuale. Anche l'impatto energetico dello scenario alternativo SA1 risulta molto maggiore rispetto a quello attuale (120 MJ invece di 44 MJ), a causa del consumo maggiore di gasolio nella fase di trasporto per la commercializzazione del gesso riciclato e naturale, essendo i siti di produzione dei pannelli in cartongesso presenti fuori dalla regione Lombardia.

**Tabella 144.** Impatti ambientali ed energetico e consumo di risorsa naturale, associati alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario attuale e nello scenario SA1 (escludendo il riciclo della carta); differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario attuale di gestione.

	Unità di misura	Scenario attuale (No Carta)	SA1 (No Carta)	Differenza <sup>1</sup> (%)
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,75	7,04	156
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	4,5E-07	1,2E-06	170
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	4,5E-07	1,3E-06	195
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,9E-07	9,0E-07	14
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,6E-03	3,9E-03	150
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,02	0,04	142
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	0,04	133
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,06	0,13	129
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,2E-04	6,1E-04	412
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	5,2E-03	1,2E-02	129
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	22,60	48,29	114
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	1,3E-02	2,5E-02	94
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	2,2E-04	3,5E-04	61
Impatto energetico CED	MJ	44	120	170
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	-740	-2

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### *Analisi di sensitività: variazione del rapporto di sostituzione*

Come già accennato al paragrafo 2.5.4, è stata effettuata un'analisi di sensitività per il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e gesso naturale, facendolo variare tra il valore massimo pari a 0,95 (scenario SA1<sub>max</sub>) e quello minimo di 0,78 (scenario SA1<sub>min</sub>). Si specifica che il rapporto di sostituzione usato per lo scenario SA1 è pari a 0,882; le variazioni percentuali di questo parametro sono quindi pari a +8% e -11%, rispettivamente per lo scenario SA1<sub>max</sub> e SA1<sub>min</sub>.

In Tabella 145 sono riportati i risultati degli impatti ottenuti nei due casi analizzati e le rispettive variazioni percentuali, calcolate rispetto ai valori dello scenario SA1. Si è tenuto in considerazione, anche in questa analisi, solo il processo di riciclo del gesso, poiché le altre fasi di gestione non sono influenzate dalla variazione del rapporto di sostituzione. Dalla tabella si nota che, considerando il rapporto di sostituzione massimo si ha un miglioramento in tutte le categorie di impatto, ottenendo, in particolare, un valore in segno negativo dell'impatto nella tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni) e nell'impovertimento delle risorse minerali e fossili, oltre ad una diminuzione significativa degli impatti nelle restanti categorie, con variazioni dei valori degli indicatori comprese tra il 50% e il 100%. Se si considera invece lo scenario SA1<sub>min</sub>, le prestazioni del sistema peggiorano rispetto allo scenario SA1; gli incrementi percentuali maggiori sono relativi alla tossicità per l'uomo (248%) e alla riduzione dello strato di ozono (139%). Le emissioni di gas serra aumentano a 4,9 kgCO<sub>2,eq</sub>, così come il consumo energetico che raddoppia portandosi a 85 MJ e si ottiene un minore risparmio di gesso naturale, pari a 658 kg.

Dai risultati mostrati si evince che, anche massimizzando i benefici del riciclo del gesso nello scenario SA1<sub>max</sub>, la maggior parte degli indicatori continua a presentare un valore di segno positivo in quanto gli impatti evitati attraverso l'utilizzo del gesso riciclato non riescono a compensare i carichi ambientali dovuti principalmente al trasporto del gesso riciclato agli impianti di cartongesso. Questa analisi di sensitività dimostra, inoltre, quanto il rapporto di sostituzione sia un parametro determinante per il sistema studiato, poiché sue piccole variazioni (di circa il 10%) comportano invece differenze notevoli in termini di impatti e benefici del riciclo del gesso (differenze percentuali anche maggiori del 100%, Tabella 145).

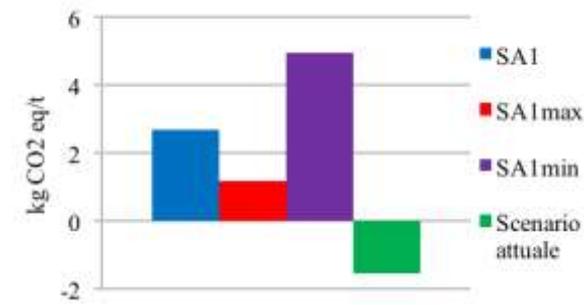
**Tabella 145.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di risorsa naturale derivanti dal riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA1, SA1<sub>max</sub>, SA1<sub>min</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA1.

	Unità di misura	SA1	SA1 <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA1 <sub>max</sub> -SA1	SA1 <sub>min</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA1 <sub>min</sub> -SA1
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,70	1,18	-57	4,97	84
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	3,2E-07	2,0E-08	-94	7,63E-07	139
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	2,1E-07	-1,4E-07	-167	7,2E-07	248
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,1E-08	3,1E-08	-56	1,3E-07	83
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,5E-03	5,3E-04	-64	2,9E-03	95
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,01	0,00	-85	0,03	127
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	0,01	-52	0,03	77
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,04	0,01	-82	0,09	122
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	5,9E-04	4,8E-04	-18	7,5E-04	27
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	3,7E-03	7,1E-04	-81	8,2E-03	120
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	9,71	0,42	-96	23,50	142
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,02	0,02	-4	0,02	7
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	1,9E-07	-6,8E-05	-36227	1,0E-04	53792
Impatto energetico CED	MJ	45	18	-60	85	89
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	-740	-795	7	-658	-11

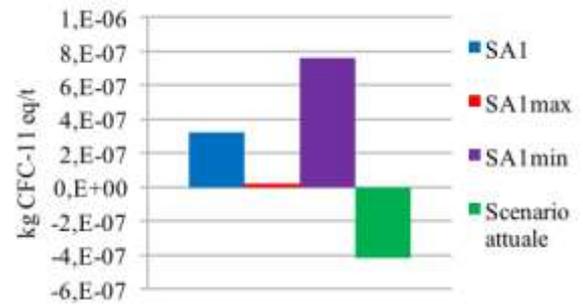
<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA1.

In Figura 47 vengono riportati gli impatti ambientali più rappresentativi per il sistema in esame, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso negli scenari SA1, SA1<sub>max</sub>, SA1<sub>min</sub> a confronto con quelli dello scenario attuale di gestione. Si sono selezionate, sia per questo scenario che per i successivi alternativi futuri, le categorie che presentano la maggiore variazione percentuale degli impatti al cambiare delle ipotesi e dei valori di input.

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



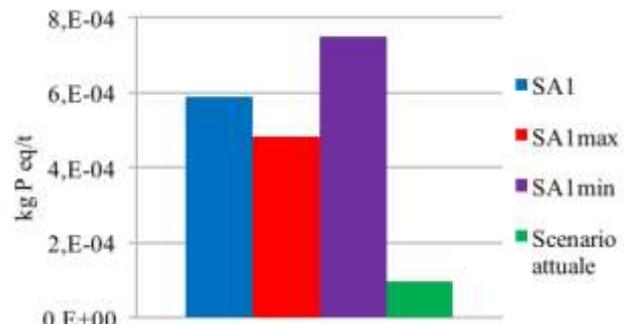
(a) Riscaldamento globale



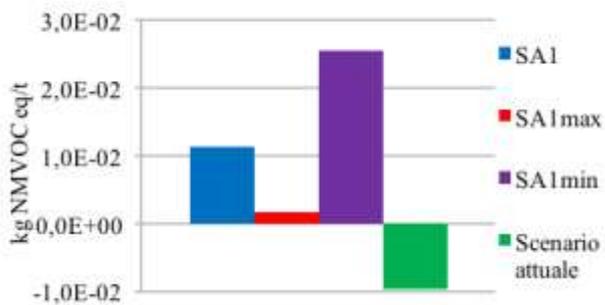
(b) Riduzione dello strato di ozono



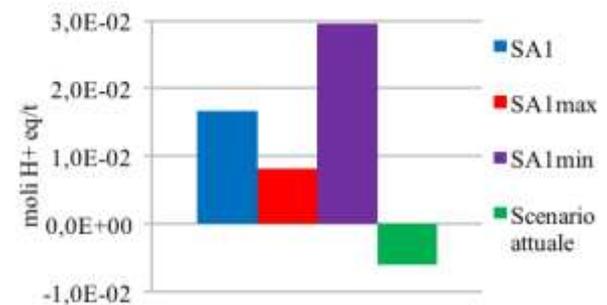
(c) Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)



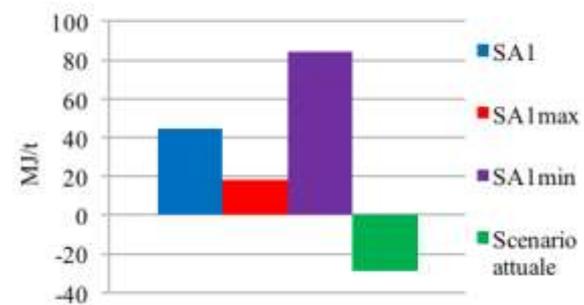
(d) Eutrofizzazione (acqua dolce)



(e) Formazione fotochimica di ozono



(f) Acidificazione



(g) Impatto energetico (CED)



(h) Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)

**Figura 47.** Confronto tra scenario attuale e scenari SA1, SA1<sub>max</sub>, SA1<sub>min</sub> per alcuni degli impatti ambientali, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso.

### Analisi dei trasporti dello scenario SA1

Visto il ruolo determinante del trasporto per il sistema in esame, è stata svolta anche un'analisi di sensitività riducendo la distanza di commercializzazione del gesso riciclato; nello scenario SA1T<sub>min</sub>, in cui si considera solo l'impianto di cartongesso più vicino situato in provincia di Asti, la distanza di trasporto per il gesso riciclato è stata ridotta a 158 km (invece di 253 km dello scenario SA1) mentre per il gesso naturale è stata considerata una percorrenza media di 250 km dalla cava di BG al sito di Asti (30 km in meno di quella utilizzata nello scenario SA1).

I risultati dell'analisi LCA, riferiti alla sola fase di riciclo del gesso, sono mostrati nella Tabella 146. La riduzione del trasporto comporta una diminuzione degli impatti ambientali in tutte le categorie; i decrementi percentuali più significativi (calcolati rispetto allo scenario base SA1) sono relativi alla riduzione dello strato di ozono (100%), alla tossicità per l'uomo da effetti cancerogeni (96%), all'ecotossicità in acqua dolce (90%) e all'acidificazione (86%).

Tuttavia anche nello scenario SA1T<sub>min</sub> gli impatti indotti dal riciclo del gesso continuano ad essere maggiori dei benefici derivanti dall'impiego del gesso riciclato (al netto del riciclo della carta) confermando che, allo stato attuale, questo scenario non sia conveniente dal punto di vista ambientale ed energetico a causa della mancanza dei siti di produzione di nuovi pannelli in regione.

Si è quindi voluto capire quali dovessero essere le "condizioni" del sistema che garantissero buone prestazioni (valori negativi degli indicatori) nel caso di utilizzo del gesso riciclato nei pannelli, variando congiuntamente la distanza di trasporto del gesso riciclato e naturale. Dalle simulazioni è risultato che il riciclo del gesso potrebbe portare dei benefici solo nel caso in cui ci fosse un impianto di cartongesso ad una distanza media dagli impianti di riciclo entro 50 km, e considerando al contempo una distanza di trasporto del gesso naturale pari ad almeno il doppio (ovvero 100 km).

Alla luce di queste considerazioni, nella definizione dello scenario futuro ideale della Lombardia, si è scelto di non considerare tale opzione di utilizzo del gesso riciclato in quanto, al momento, non risulta conveniente dal punto di vista ambientale ed energetico.

**Tabella 146.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di risorsa naturale derivanti dal riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA1 e SA1T<sub>min</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA1.

	Unità di misura	SA1	SA1T <sub>min</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA1T <sub>min</sub> -SA1
<b>Categorie di impatto ambientale (ILCD):</b>				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,70	0,57	-79
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	3,2E-07	4,7E-10	-100
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	2,1E-07	1,7E-07	-18
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,1E-08	3,1E-09	-96
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,5E-03	8,9E-04	-39
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,01	4,9E-03	-56
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	2,3E-03	-86
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,04	0,02	-39
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	5,9E-04	4,2E-04	-28
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	3,7E-03	1,6E-03	-56
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	9,71	0,94	-90
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,02	0,02	-2
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	1,9E-07	1,0E-07	-45
Impatto energetico CED	MJ	45	24	-46
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	-740	-740	0

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA1.

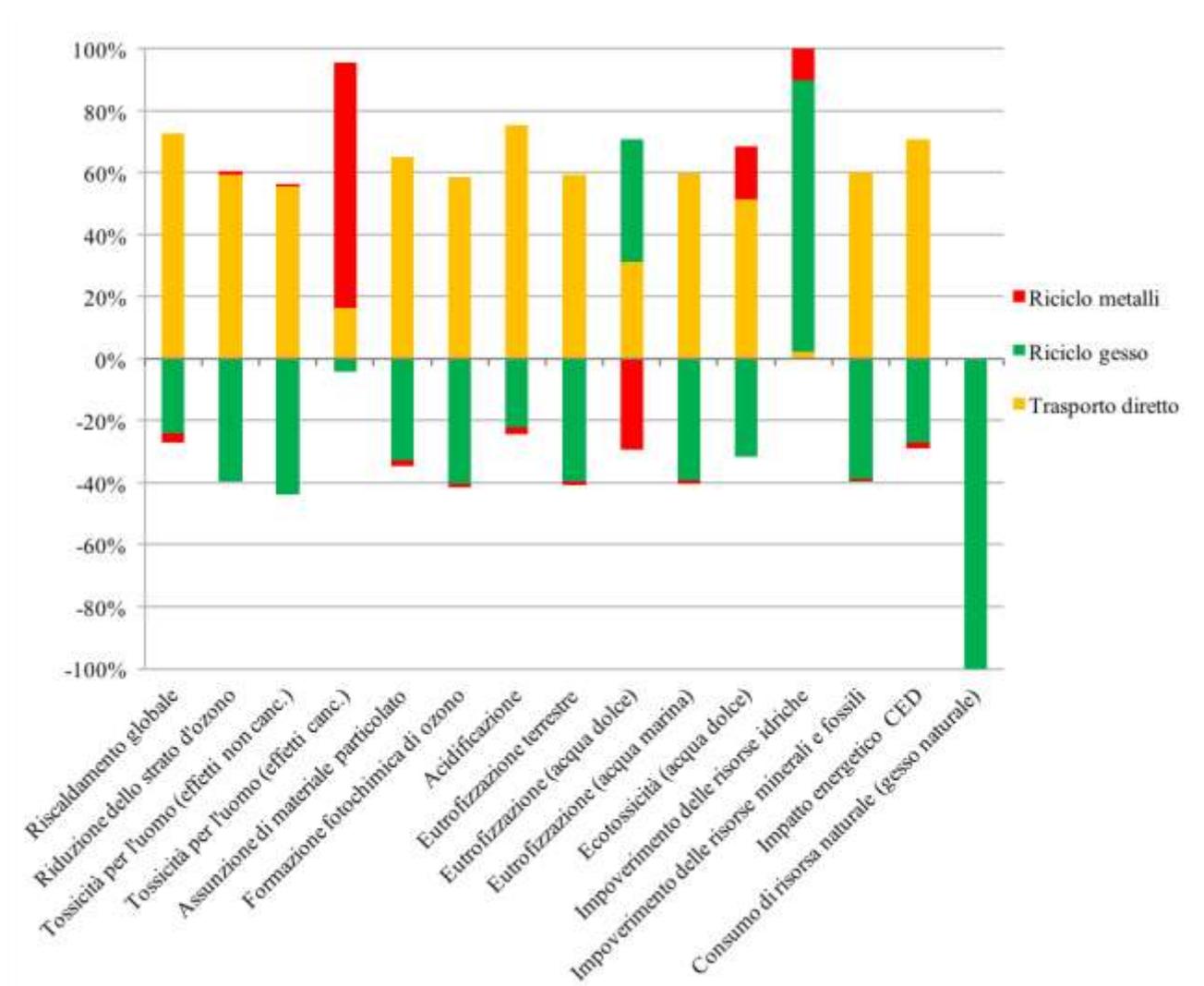
### 3.3.2.2 Scenario SA2

In Tabella 147 sono riportati i valori assunti dagli indicatori riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione nello scenario di utilizzo del gesso riciclato nei cementifici. Nel complesso, essi hanno quasi tutti segno negativo, sia per il beneficio molto elevato associato al riciclo di carta/cartone, sia per il *saving* generato dal riciclo del gesso e dei metalli, sebbene meno significativo rispetto a quello della carta. In questo scenario, infatti, a differenza del precedente, il riciclo del gesso porta un beneficio ambientale in tutte le categorie di impatto, ad eccezione dell'eutrofizzazione in acqua dolce (4,39E-04 kg P eq) e dell'impoverimento delle risorse idriche (0,03 m<sup>3</sup> water eq). Si nota, ad esempio, un risparmio di 1,5 kg CO<sub>2,eq</sub> nella categoria di impatto inerente il riscaldamento globale, un risparmio energetico di 30 MJ ed un risparmio di 831 kg di gesso naturale.

**Tabella 147.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di risorsa naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione nello scenario SA2 (destino del gesso riciclato: additivo nei cementifici).

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-158,54	4,52	-1,50	-0,19	-161,37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,5E-05	8,7E-07	-5,8E-07	1,4E-08	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,0E-05	1,1E-06	-8,8E-07	1,3E-08	-5,1E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,0E-05	1,4E-07	-3,7E-08	6,9E-07	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,21	2,5E-03	-1,3E-03	-7,4E-05	-0,21
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,74	0,03	-0,02	-5,3E-04	-0,74
Acidificazione	moli H+ eq	-1,42	0,02	-0,01	-7,5E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,76	0,09	-0,06	-1,6E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,12	3,44E-04	4,39E-04	-3,2E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,28	0,01	-5,43E-03	-1,5E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.333	29	-18	9,56	-1.354
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,24	6,14E-04	0,03	2,9E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,4E-03	3,5E-04	-2,3E-04	-4,80E-06	-4,53E-03
Impatto energetico CED	MJ	-3.860	77	-30	-2	-3.906
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-831	0	-831	0	0

In Figura 48 sono riportati i contributi percentuali delle diverse fasi della gestione rispetto agli impatti complessivi del sistema nello scenario SA2, trascurando il processo di riciclo della carta. In questo scenario si nota che i pesi relativi al trasporto per il conferimento dei rifiuti e al riciclo dei metalli restano sostanzialmente invariati rispetto allo scenario SA1, mentre ciò che cambia in modo considerevole è il contributo del riciclo del gesso: in questo caso, infatti, il riciclo comporta benefici in quasi tutte le categorie di impatto, con un peso di oltre il 30% nella riduzione dello strato di ozono, nella tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni), nell'assunzione di materiale particolato, nella formazione fotochimica di ozono, nell'eutrofizzazione terrestre e in acqua marina e nell'impoverimento delle risorse minerali e fossili. Nella categoria del riscaldamento globale e per il consumo energetico si ha un *saving* rispettivamente del 24% e del 27%.



**Figura 48.** Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione sugli impatti totali e sul consumo di risorsa naturale del sistema, al netto del riciclo di carta e cartone (scenario SA2).

In Tabella 148 viene messo a confronto lo scenario SA2 con lo scenario attuale, mostrando le differenze percentuali calcolate trascurando il riciclo della carta. Lo scenario SA2 presenta un evidente aumento degli impatti nelle categorie di eutrofizzazione in acqua dolce (incremento percentuale pari a 287%) e di impoverimento delle risorse idriche (129% di incremento), un lieve aumento delle emissioni di CO<sub>2,eq</sub> (+3%) ed una riduzione degli impatti in tutte le restanti categorie di impatto, in particolare nella formazione fotochimica di ozono (0,01 kg NMVOC<sub>eq</sub> rispetto a 0,02 kg NMVOC<sub>eq</sub>), nell'eutrofizzazione terrestre (0,03 moliN<sub>eq</sub> rispetto a 0,06 moliN<sub>eq</sub>) e nell'eutrofizzazione di acqua marina (2,7E-03 kgN<sub>eq</sub> rispetto a 5,2E-03 kgN<sub>eq</sub>).

**Tabella 148.** Impatti ambientali ed energetico e consumo di risorsa naturale riferiti alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario attuale e nello scenario SA2 (trascurando il riciclo della carta), differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario attuale (No carta)	SA2 (No carta)	Differenza (%) <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,75	2,83	3
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	4,5E-07	3,0E-07	-32
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	4,5E-07	2,5E-07	-45
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,9E-07	8,0E-07	0
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,6E-03	1,2E-03	-25
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,02	0,01	-50
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	0,02	-5
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,06	0,03	-49
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,2E-04	4,6E-04	287
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	5,2E-03	2,7E-03	-48
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	22,60	20,88	-8
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	1,3E-02	2,9E-02	129
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	2,2E-04	1,2E-04	-44
Impatto energetico CED	MJ	44	46	3
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	-831	10

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### **Analisi di sensitività: variazione del rapporto di sostituzione**

Anche per questo scenario si è deciso di effettuare un'analisi di sensitività per il rapporto di sostituzione tra gesso naturale e gesso riciclato. Si ricorda che il rapporto di sostituzione utilizzato nello scenario SA2 è già piuttosto elevato e pari a 0,991; nello scenario SA2<sub>max</sub> il valore del rapporto di sostituzione risulta di 0,998 (ottenuto considerando la purezza massima del gesso riciclato) mentre nello scenario SA2<sub>min</sub> è stato ridotto a 0,969 (corrispondente alla purezza minima del gesso riciclato).

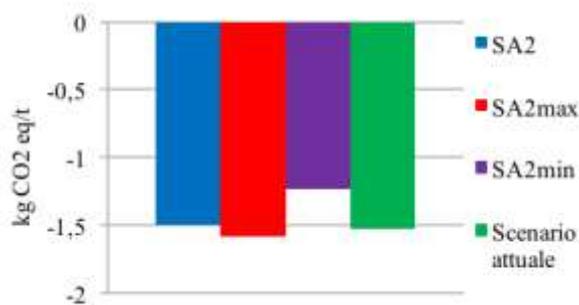
In Tabella 149 sono riportati i risultati degli indicatori ottenuti nei due casi analizzati e le rispettive variazioni percentuali calcolate rispetto allo scenario SA2, relativi al solo processo di riciclo del gesso. Dalla tabella si può notare che le variazioni percentuali tra lo scenario SA2 e SA2<sub>max</sub> sono inferiori rispetto a quelle presenti tra lo scenario SA2 e SA2<sub>min</sub>. Nel primo caso sono infatti tutte inferiori al 10% mentre nel secondo caso superano il 15% nelle categorie di impatto relative al riscaldamento globale, alla tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), all'acidificazione e all'impatto energetico. In particolare, nello scenario SA2<sub>max</sub> si registra una riduzione degli impatti del 7% per l'acidificazione e del 6% per il riscaldamento globale e la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni). Invece, nello scenario SA2<sub>min</sub> si evidenzia, ad esempio, un incremento degli impatti pari al 22% per l'acidificazione, al 19% per la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni) e pari al 18% per il riscaldamento globale. È doveroso sottolineare che tali risultati sono stati ottenuti a fronte di una variazione del parametro in input (i.e. rapporto di sostituzione) pari allo 0,7% nello scenario SA2<sub>max</sub> e a 2,2% nello scenario SA2<sub>min</sub> (le percentuali di variazione del rapporto di sostituzione sono calcolate rispetto al valore assegnato nello scenario base SA2). Pertanto, in questo scenario, essendo l'incertezza legata al calcolo del rapporto di sostituzione piuttosto ristretta (tra 0,7 e 2,2%) anche i risultati che si ottengono dall'analisi LCA sono piuttosto solidi, ovvero l'errore che si può commettere è contenuto.

Nella Figura 49 vengono riportati gli impatti ambientali più rappresentativi per il sistema in esame, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso secondo lo scenario SA2, SA2<sub>max</sub>, SA2<sub>min</sub> a confronto con lo scenario attuale. Dai grafici si vede che lo scenario SA2 è sempre migliore dello scenario attuale per le categorie riduzione dello strato di ozono, tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni), formazione fotochimica di ozono e consumo di risorsa naturale, anche nel caso di rapporto di sostituzione minimo; invece, per le altre categorie di impatto, dipende dal valore assegnato al rapporto di sostituzione.

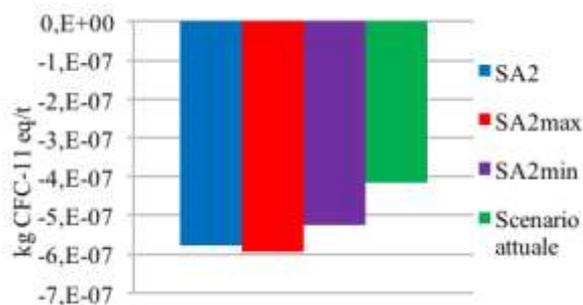
**Tabella 149.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di risorsa naturale riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA2, SA2<sub>max</sub>, SA2<sub>min</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA2.

	Unità di misura	SA2	SA2 <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA2 <sub>max</sub> - SA2	SA2 <sub>min</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA2 <sub>min</sub> - SA2
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,50	-1,59	6	-1,23	-18
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-5,8E-07	-6,0E-07	3	-5,3E-07	-9
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-8,8E-07	-8,9E-07	2	-8,1E-07	-7
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-3,7E-08	-4,0E-08	6	-3,0E-08	-19
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-1,3E-03	-1,3E-03	4	-1,1E-03	-14
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,02	-0,02	3	-0,02	-10
Acidificazione	moli H+ eq	-7,13E-03	-7,64E-03	7	-5,55E-03	-22
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-0,06	-0,06	3	-0,05	-10
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	4,4E-04	4,3E-04	-1	4,6E-04	4
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-5,4E-03	-5,6E-03	3	-4,9E-03	-10
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-17,70	-18,21	3	-16,09	-9
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,03	0,03	0	0,03	0
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-2,3E-04	-2,3E-04	2	-2,2E-04	-5
Impatto energetico CED	MJ	-30	-31	5	-25	-16
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-831	-837	1	-813	-2

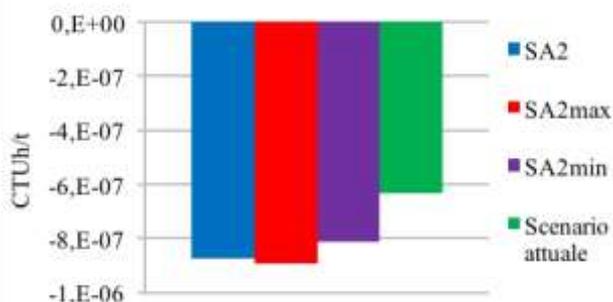
<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA2



(a) Riscaldamento globale



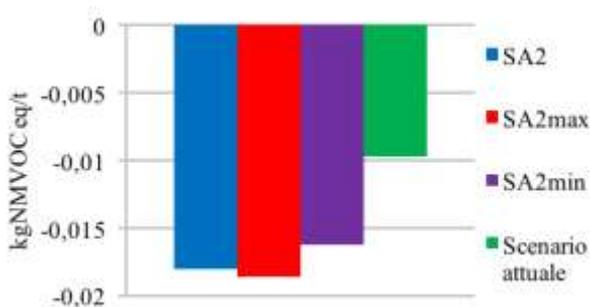
(b) Riduzione dello strato di ozono



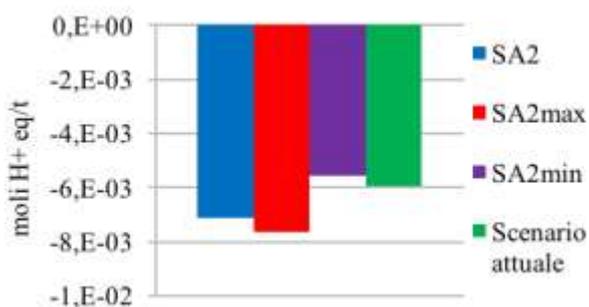
(c) Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)



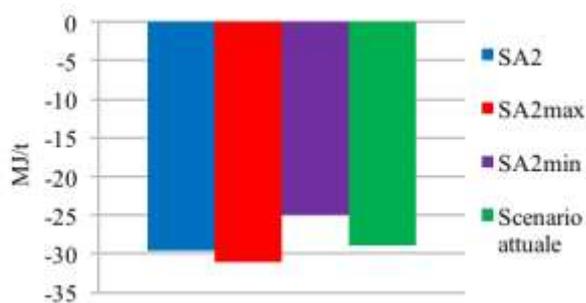
(d) Eutrofizzazione in acqua dolce



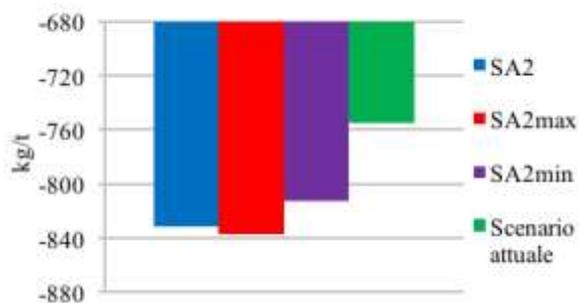
(e) Formazione fotochimica di ozono



(f) Acidificazione



(g) Impatto energetico (CED)



(h) Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)

**Figura 49.** Confronto tra scenario attuale e scenari SA2, SA2<sub>max</sub>, SA2<sub>min</sub> per alcuni degli impatti ambientali, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso.

### Analisi dei trasporti nello scenario SA2

Si è effettuata un'analisi di sensitività dei trasporti anche per lo scenario SA2 considerando, nello scenario SA2T<sub>min</sub> il cementificio più vicino agli impianti di riciclo, ovvero quello situato a Calusco D'Adda e, nello scenario SA2T<sub>max</sub>, il cementificio più lontano, ovvero quello presente a Caravate. Con tali assunzioni, nello scenario SA2T<sub>min</sub> la distanza di trasporto del gesso riciclato è quindi pari a 49 km, mentre quella del gesso naturale è di 140 km. Nello scenario SA2T<sub>max</sub>, invece, la distanza di commercializzazione del gesso riciclato aumenta a 106 km e quella del gesso naturale diventa di 152 km. Si ricorda che nello scenario SA2 le distanze di trasporto del gesso riciclato e naturale erano rispettivamente di 82 km e 152 km. I risultati dell'analisi sono mostrati nella Tabella 150 e sono relativi alla sola fase di riciclo del gesso.

Dalla Tabella 150 si può vedere come all'aumentare delle distanze di trasporto di gesso riciclato e naturale aumentino tutti gli impatti (+134% per l'acidificazione, +120% per la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), +116% per il riscaldamento globale e +104% per il consumo di energia); alcuni indicatori, come il riscaldamento globale e il CED, passano da valori in segno negativo nello scenario SA2 a valori in segno positivo nel nuovo scenario SA2T<sub>max</sub>, evidenziando come la valutazione di tali distanze sia determinante per il sistema.

**Tabella 150.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di risorsa naturale riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA2, SA2T<sub>max</sub>, SA2T<sub>min</sub>: differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA2.

	Unità di misura	SA2	SA2T <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA2T <sub>max</sub> -SA2	SA2T <sub>min</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA2T <sub>min</sub> -SA2
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,50	0,24	-116	-2,96	97
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-5,8E-07	-2,3E-07	-60	-8,71E-07	51
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-8,8E-07	-4,5E-07	-48	-1,2E-06	40
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-3,7E-08	7,5E-09	-120	-7,5E-08	101
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-1,3E-03	-2,2E-04	-82	-2,1E-03	69
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,02	-0,01	-60	-0,03	50
Acidificazione	moli H+ eq	-0,01	2,4E-03	-134	-0,02	112
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-0,06	-0,02	-61	-0,09	51
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	4,4E-04	5,5E-04	25	3,5E-04	-21
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-5,4E-03	-2,1E-03	-62	-8,2E-03	52
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-17,70	-6,60	-63	-27,00	53
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,03	0,03	1	0,03	-1
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-2,3E-04	-1,4E-04	-37	-3,0E-04	31
Impatto energetico CED	MJ	-30	1	-104	-55	87
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	-831	-831	0	-831	0

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA2.

### 3.3.2.3 Scenario SA3

Nella Tabella 151 sono mostrati i valori assunti dagli indicatori riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione, nello scenario di impiego del gesso riciclato per produrre gessi di defecazione. Anche in questo scenario, così come per i precedenti riportati, gli impatti complessivi del sistema hanno tutti segno negativo, se non per la categoria relativa all'impoverimento delle risorse idriche ( $0,23 \text{ m}^3_{\text{water,eq}}$ ), grazie al *saving* associato al riciclo di carta/cartone. Ponendo l'attenzione solo sul trattamento di riciclo del gesso, che rappresenta l'unico contributo che varia in base ai diversi destini di impiego del gesso riciclato, anche nello scenario SA3, così come ottenuto nello scenario SA2, il riciclo comporta benefici in tutte le categorie, se non per l'eutrofizzazione in acqua dolce e l'impoverimento delle risorse idriche, con degli impatti rispettivamente pari a  $1,11\text{E-}04 \text{ kg P eq}$  e  $0,01 \text{ m}^3_{\text{water,eq}}$ . In particolare, dal processo di riciclo dei rifiuti e riutilizzo del gesso si ottiene un *saving* di  $-1,3 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}$  per il riscaldamento globale,  $-6,2\text{E-}04 \text{ kgPM}_{2.5,\text{eq}}$  per l'assunzione di materiale particolato,  $-0,03 \text{ molN}_{\text{eq}}$  per l'eutrofizzazione terrestre,  $-13,19 \text{ CTUe}$  per l'ecotossicità in acqua dolce, un risparmio di  $-24,5 \text{ MJ}$  e di  $-755 \text{ kg}$  di gesso naturale.

**Tabella 151.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di risorsa naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione nello scenario SA3 (destino del gesso riciclato: additivo per produrre gessi di defecazione).

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-158,32	4,52	-1,28	-0,19	-161,37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,4E-05	8,7E-07	-3,7E-07	1,4E-08	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,0E-05	1,1E-06	-5,7E-07	1,3E-08	-5,1E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,0E-05	1,4E-07	-3,2E-08	6,9E-07	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,21	2,5E-03	-6,2E-04	-7,4E-05	-0,21
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,73	0,03	-0,01	-5,3E-04	-0,74
Acidificazione	moli H+ eq	-1,42	0,02	-4,6E-03	-7,5E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,73	0,09	-0,03	-1,6E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,12	3,44E-04	1,11E-04	-3,2E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,28	0,01	-2,35E-03	-1,5E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.328	29,02	-13,19	9,56	-1.354
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,23	6,14E-04	0,01	2,9E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,3E-03	3,5E-04	-1,4E-04	-4,80E-06	-4,53E-03
Impatto energetico CED	MJ	-3.855	77	-24	-2	-3.906
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	1,96E-03	-755	0	0

In Tabella 152 si mette a confronto lo scenario SA3 con lo scenario attuale, trascurando il contributo dovuto al riciclo della carta. I risultati mostrano che i benefici del sistema non riescono a compensare gli impatti indotti soprattutto dal trasporto, come riscontrato anche per lo scenario attuale; inoltre, si nota un ulteriore incremento degli impatti complessivi del sistema rispetto allo scenario attuale. In particolare, la riduzione dello strato di ozono aumenta del +16%, la tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni) del +22%, l'assunzione di materiale particolato del +17% ed il consumo energetico del +14%. Il motivo di questa differenza è dovuto al fatto che nello scenario SA3 variano le distanze di trasporto per il conferimento dei rifiuti e per la vendita del gesso riciclato e naturale, rispettivamente del +20%, +10% e - 9% rispetto ai valori dello scenario attuale e ciò genera impatti maggiori nello scenario SA3 rispetto a quelli del sistema attuale.

**Tabella 152.** Impatti ambientali ed energetico e consumo di gesso naturale riferiti alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario attuale e nello scenario SA3 (trascurando il riciclo della carta); differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario attuale (No carta)	SA3 (No carta)	Differenza (%) <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,75	3,05	11
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	4,5E-07	5,2E-07	16
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	4,5E-07	5,5E-07	22
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,9E-07	8,0E-07	1
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,6E-03	1,8E-03	17
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,02	0,02	15
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	0,02	10
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,06	0,06	12
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,2E-04	1,3E-04	11
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	5,2E-03	5,8E-03	12
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	22,60	25,39	12
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	1,3E-02	1,3E-02	1
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	2,2E-04	2,1E-04	-2
Impatto energetico CED	MJ	44	51	14
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	-755	0

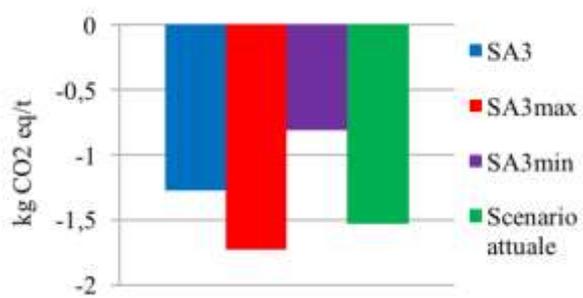
<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### *Analisi di sensitività: variazione del rapporto di sostituzione*

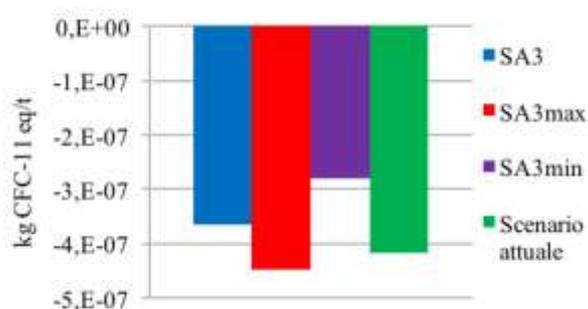
Nell'analisi di sensitività relativa al rapporto di sostituzione tra gesso naturale e gesso riciclato, è stato considerato il valore massimo di 0,93 nello scenario SA3<sub>max</sub> (corrispondente al dosaggio massimo) e quello minimo di 0,87 nello scenario SA3<sub>min</sub> (ottenuto considerando il dosaggio minimo). Si specifica che il rapporto di sostituzione usato per lo scenario SA3 è pari al valore medio di 0,9, quindi le variazioni percentuali di questo parametro sono del 3,7%, in entrambi gli scenari SA3<sub>max</sub> e SA3<sub>min</sub>.

In Tabella 153 sono riportati i risultati degli indicatori ottenuti nei due casi analizzati e le rispettive variazioni percentuali rispetto allo scenario SA3, riferiti al solo processo di riciclo del gesso. Dalla tabella si nota che, considerando il rapporto di sostituzione massimo (SA3<sub>max</sub>) si raggiunge un miglioramento in tutte le categorie di impatto, ottenendo, in particolare, un decremento percentuale degli impatti pari al -57% nell'acidificazione, -44% nell'assunzione di materiale particolato e -38% per l'eutrofizzazione in acqua dolce. Se si considera invece lo scenario SA3<sub>min</sub>, si ha un peggioramento del sistema rispetto allo scenario SA3, con un incremento percentuale degli impatti del tutto simile allo scenario SA3<sub>max</sub> ma di segno opposto.

In Figura 50 vengono riportati gli impatti ambientali più rappresentativi, l'impatto energetico e il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso secondo lo scenario SA3, SA3<sub>max</sub>, SA3<sub>min</sub> a confronto con quello simulato nello scenario attuale. Si nota che lo scenario SA3<sub>max</sub> ha benefici sempre maggiori rispetto allora scenario base, mentre l'SA3 e l'SA3<sub>min</sub> comportano impatti maggiori per tutte le categorie di impatto raffigurate.

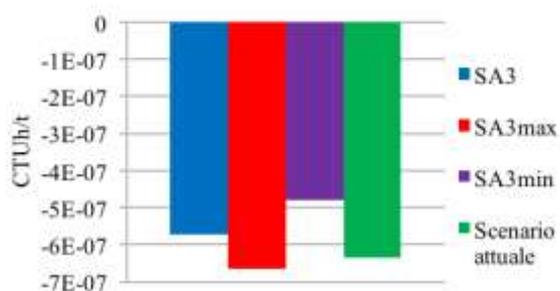


(a) Riscaldamento globale

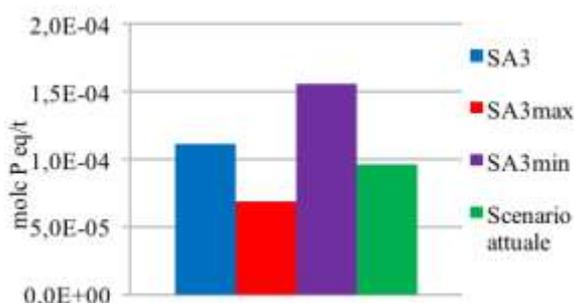


(b)

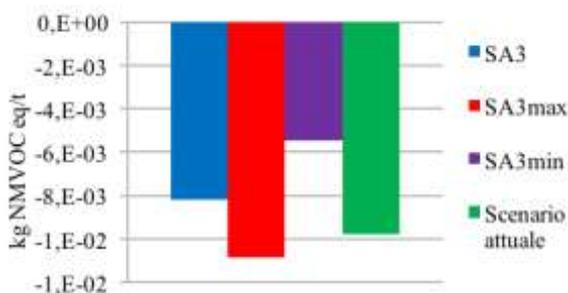
Riduzione dello strato di ozono



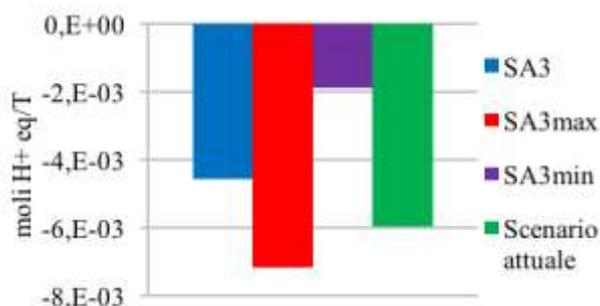
(c) Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)



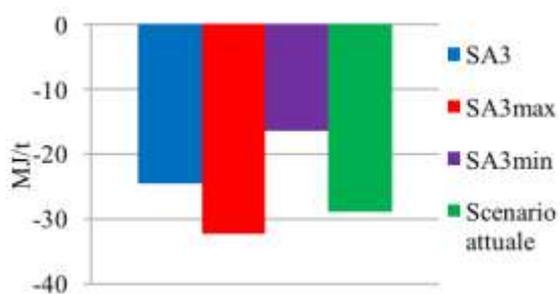
(d) Eutrofizzazione in acqua dolce



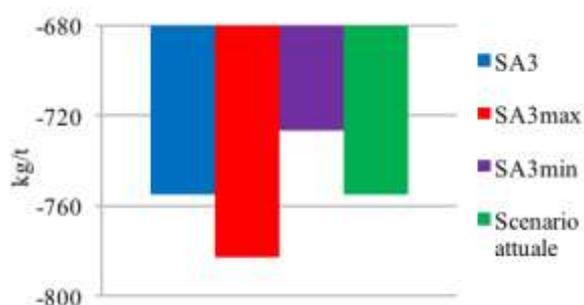
(e) Formazione fotochimica di ozono



(f) Acidificazione



(g) Impatto energetico (CED)



(h) Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)

**Figura 50.** Confronto tra scenario attuale e scenari SA3, SA3<sub>max</sub>, SA3<sub>min</sub> per alcuni degli impatti ambientali, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso.

**Tabella 153.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di gesso naturale riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA3, SA3<sub>max</sub>, SA3<sub>min</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA3.

	Unità di misura	SA3	SA3 <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA3 <sub>max</sub> -SA3	SA3 <sub>min</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA3 <sub>min</sub> -SA3
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,28	-1,73	35	-0,81	-37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-3,7E-07	-4,5E-07	23	-2,8E-07	-23
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,7E-07	-6,7E-07	16	-4,8E-07	-17
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-3,2E-08	-4,4E-08	37	-2,0E-08	-38
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-6,2E-04	-8,9E-04	44	-3,4E-04	-45
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-8,19E-03	-1,09E-02	33	-5,44E-03	-34
Acidificazione	moli H+ eq	-4,56E-03	-7,15E-03	57	-1,88E-03	-59
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-0,03	-0,04	35	-0,02	-36
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,1E-04	6,9E-05	-38	1,6E-04	39
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,4E-03	-3,2E-03	36	-1,5E-03	-37
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-13,19	-15,77	20	-10,54	-20
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,01	0,01	-9	0,01	9
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-1,4E-04	-1,5E-04	12	-1,2E-04	-13
Impatto energetico CED	MJ	-24	-32	32	-16	-33
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	-755	-783	4	-727	-4

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA3.

### Analisi dei trasporti nello scenario SA3

In Tabella 154 sono mostrati i risultati dell'analisi di sensitività dei trasporti, mettendo a confronto i valori degli indicatori ottenuti nei due scenari SA3T<sub>min</sub> e SA3T<sub>max</sub> con quelli relativi allo scenario SA3, per la sola fase di riciclo dei rifiuti in gesso. Si ricorda che nello scenario SA3T<sub>min</sub>, la distanza di trasporto del gesso riciclato è pari a 54 km e quella del gesso naturale è di 130 km mentre nello scenario SA3T<sub>max</sub>, le distanze sono rispettivamente di 96 km per il gesso riciclato e 76 km per il gesso naturale.

La Tabella 154 mostra un peggioramento del sistema nel caso in cui si aumenti la distanza di trasporto del gesso riciclato e un miglioramento del sistema nel caso in cui questa venga ridotta, come atteso. Nello specifico, nello scenario SA3T<sub>max</sub> si ha un aumento degli impatti del 598% per l'acidificazione, del 481% per l'assunzione di materiale particolato, del 407% per l'eutrofizzazione in acqua marina, del 401% per la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni) e del 389% per il riscaldamento globale. Nello scenario SA3T<sub>min</sub>, invece, si hanno decrementi percentuali in queste categorie di impatto rispettivamente pari al 194%, 156%, 132%, 130% e 126%. L'incremento degli impatti nello scenario SA3T<sub>max</sub> è molto più evidente perché in questo caso aumenta la distanza di trasporto del gesso riciclato, che oltretutto risulta maggiore di quella del gesso naturale.

**Tabella 154.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di gesso naturale riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA3, SA3T<sub>max</sub>, SA3T<sub>min</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA3.

	Unità di misura	SA3	SA3T <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA3T <sub>max</sub> - SA3	SA3T <sub>min</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA3T <sub>min</sub> - SA3
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-1,28	3,69	-389	-2,89	126
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-3,7E-07	6,3E-07	-273	-6,89E-07	88
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,7E-07	6,3E-07	-209	-9,6E-07	68
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-3,2E-08	9,6E-08	-401	-7,3E-08	130
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-6,2E-04	2,4E-03	-481	-1,6E-03	156
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,01	0,02	-375	-0,02	122
Acidificazione	moli H+ eq	-4,5E-03	0,02	-598	-0,01	194
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-0,03	0,08	-402	-0,06	130
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,1E-04	4,2E-04	277	1,1E-05	-90
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-2,4E-03	7,2E-03	-407	-5,5E-03	132
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-13,19	18,44	-240	-23,46	78
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	9,3E-03	1,0E-02	11	9,0E-03	-3
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-1,4E-04	1,0E-04	-176	-2,2E-04	57
Impatto energetico CED	MJ	-24	63	-358	-53	116
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	-755	-755	0	-755	0

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA3.

#### 3.3.2.4 Scenari SA4a e SA4b

In Tabella 155 e Tabella 156 sono riportati i valori assunti dagli indicatori riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione negli scenari SA4a e SA4b, in cui il destino di riutilizzo del gesso riciclato è lo spandimento su suolo agricolo per correggere il pH. Il prodotto evitato è la calce nello scenario SA4a e i correttivi a base di  $\text{CaCO}_3$  nello scenario SA4b, con rapporti di sostituzione rispettivamente pari a 0,4 e 0,655; per tale ragione, il risparmio di gesso naturale in entrambi gli scenari è nullo.

Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, gli indicatori risultano tutti con segno negativo, ad eccezione dell'impovertimento delle risorse idriche ( $0,20 \text{ m}^3 \text{ water eq}$  nello scenario SA4a e  $0,19 \text{ m}^3 \text{ water eq}$  nello scenario SA4b), in virtù dell'evitata produzione di pasta termomeccanica grazie al riciclo dei rifiuti in carta.

Focalizzando l'attenzione sul solo riciclo del gesso si nota invece un netto miglioramento delle prestazioni del sistema, sia per SA4a che per SA4b, in quanto i benefici risultano sostanzialmente maggiori degli impatti indotti per tutte le categorie, in particolare per il riscaldamento globale ed il consumo energetico. Il motivo principale dell'aumento notevole dei benefici associati al trattamento di riciclo è dovuto perlopiù all'evitato processo di cottura (nei forni alimentati a gas naturale) per la produzione della calce e dei correttivi a base di  $\text{CaCO}_3$ : è infatti questo processo che incide maggiormente sul *saving* per entrambi gli scenari e che rende questo destino di utilizzo migliore, dal punto di vista ambientale ed energetico, rispetto agli altri scenari alternativi finora analizzati, per i quali gli impatti evitati sono più contenuti, in quanto il prodotto sostituito è il gesso naturale crudo, al quale sono associati i consumi della sola estrazione e macinazione. Inoltre, in questi scenari, i trasporti di commercializzazione del gesso riciclato e dei prodotti evitati sono inferiori, e questo contribuisce al ridurre il carico ambientale del sistema.

In particolare, il *saving* ottenuto dal solo riciclo del gesso, risulta, rispettivamente per i due scenari, pari a 10,7 e 16,9  $\text{kg CO}_{2,\text{eq}}$  per il riscaldamento globale, a  $6,1\text{E-}07$  e  $8,0\text{E-}07$  CTUh per la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), 0,12 e 0,23  $\text{moliN}_{\text{eq}}$  per l'eutrofizzazione terrestre e 224 e 246 MJ per il consumo energetico.

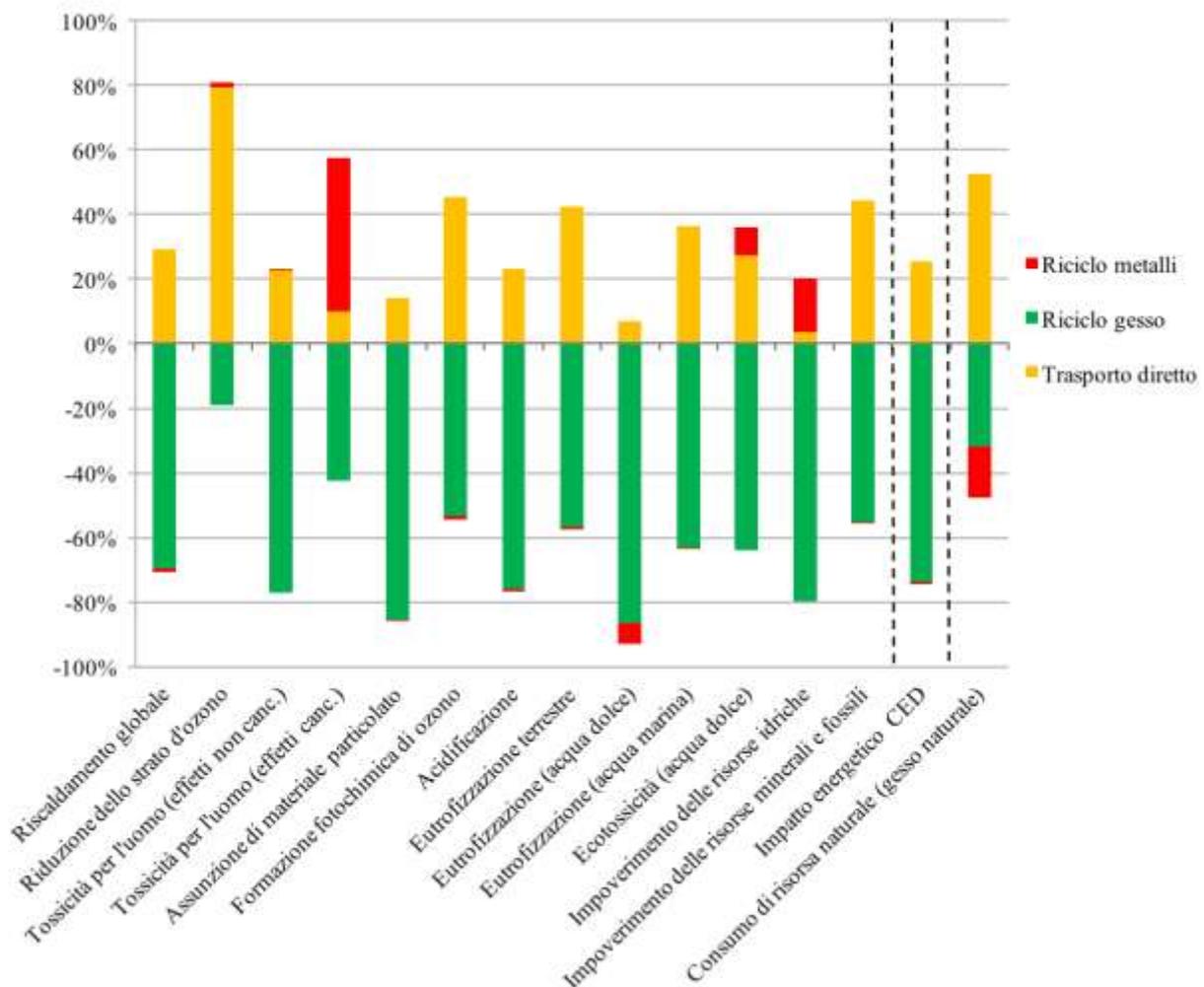
**Tabella 155.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di gesso naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione nello scenario SA4a (destino del gesso riciclato: spandimento agricolo come correttivo del pH in sostituzione della calce).

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-167,75	4,52	-10,71	-0,19	-161,37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,4E-05	8,7E-07	-2,1E-07	1,4E-08	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,3E-05	1,1E-06	-3,8E-06	1,3E-08	-5,1E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,1E-05	1,4E-07	-6,1E-07	6,9E-07	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,23	2,5E-03	-1,5E-02	-7,4E-05	-0,21
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,75	0,03	-0,03	-5,3E-04	-0,74
Acidificazione	moli H+ eq	-1,49	0,02	-0,08	-7,5E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,83	0,09	-0,12	-1,6E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,12	3,44E-04	-4,23E-03	-3,2E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,29	0,01	-1,44E-02	-1,5E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.383	29,02	-68,34	9,56	-1.354
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,20	6,14E-04	-0,01	2,9E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,6E-03	3,5E-04	-4,4E-04	-4,80E-06	-4,53E-03
Impatto energetico CED	MJ	-4.055	77	-224	-2	-3.906
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	0	0	0	0	0

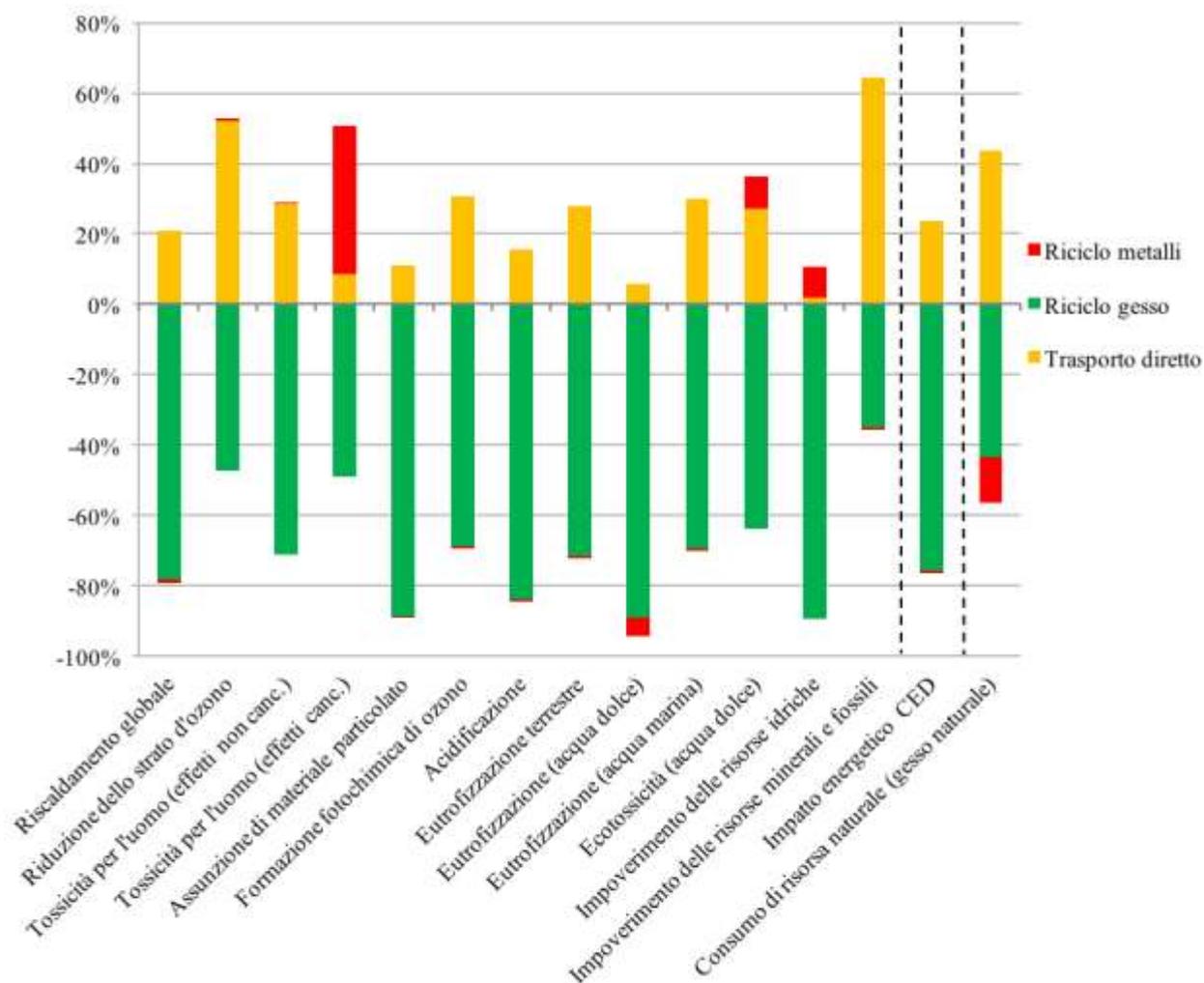
**Tabella 156.** Impatti ambientali, impatto energetico ed indicatore di consumo di gesso naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione nello scenario SA4b (destino del gesso riciclato: spandimento agricolo come correttivo del pH in sostituzione dei correttivi come CaCO<sub>3</sub>).

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-173,93	4,52	-16,89	-0,19	-161,37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,5E-05	8,7E-07	-7,9E-07	1,4E-08	-1,5E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,2E-05	1,1E-06	-2,8E-06	1,3E-08	-5,1E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,1E-05	1,4E-07	-8,0E-07	6,9E-07	-1,1E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,23	2,5E-03	-2,0E-02	-7,4E-05	-0,21
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,78	0,03	-0,06	-5,3E-04	-0,74
Acidificazione	moli H <sup>+</sup> eq	-1,54	0,02	-0,13	-7,5E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,94	0,09	-0,23	-1,6E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,13	3,44E-04	-5,35E-03	-3,2E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,29	0,01	-1,92E-02	-1,5E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.383	29,02	-67,70	9,56	-1.354
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,19	6,14E-04	-0,03	2,9E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,4E-03	3,5E-04	-1,9E-04	-4,80E-06	-4,53E-03
Impatto energetico CED	MJ	-4.077	77	-246	-2	-3.906
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	0	0	0,00	0	0

In Figura 51 e Figura 52 sono mostrati i contributi percentuali delle diverse fasi di gestione rispetto agli impatti complessivi dell'intero sistema negli scenari SA4a e SA4b, trascurando, per entrambi, il processo di riciclo della carta. Appare evidente come il riciclo del gesso abbia un contributo ben maggiore rispetto agli scenari precedenti (vedi Figure Figura 45, Figura 46 e Figura 48) superando in molte categorie di impatto il contributo in segno positivo derivante dal trasporto dei rifiuti. Ad esempio, per l'assunzione di materiale particolato, per l'eutrofizzazione in acqua dolce e per l'impoverimento delle risorse idriche, il riciclo del gesso presenta, in entrambi gli scenari, un peso maggiore dell'80% e raggiunge valori oltre il 70% anche nelle categorie di impatto relative al riscaldamento globale, all'acidificazione e al consumo energetico. Il trasporto dei rifiuti assume un peso superiore al 40% solo nelle categorie di impatto riferite alla riduzione dello strato di ozono (SA4a e SA4b), alla formazione fotochimica dell'ozono (SA4a) ed all'impoverimento di risorse minerali e fossili (SA4b).



**Figura 51.** Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione sugli impatti e sul consumo di risorsa naturale del sistema nello scenario SA4a (prodotto evitato: calce CaO), al netto del riciclo di carta e cartone.



**Figura 52.** Contributi percentuali delle diverse fasi di gestione sugli impatti e sul consumo di risorsa naturale del sistema nello scenario SA4b (prodotto evitato: correttivi come  $\text{CaCO}_3$ ), al netto del riciclo di carta e cartone.

In Tabella 157 si mettono a confronto gli scenari SA4a e SA4b con lo scenario attuale, trascurando il contributo dovuto al riciclo della carta. Si nota che, in entrambi i casi e a differenza dei 3 scenari precedenti, anche non tenendo conto del beneficio derivante dal riciclo della carta, il sistema riesce a compensare gli impatti indotti dal trasporto generando un *saving* in tutte le categorie di impatto, compreso l'impoverimento delle risorse idriche (sempre di segno positivo negli scenari precedenti); fanno eccezione solo le categorie della riduzione dello strato di ozono e della tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), che rimangono in segno positivo ma mostrano valori degli indicatori inferiori di quasi un ordine di grandezza rispetto a quelli ottenuti negli scenari precedentemente illustrati (vedi Tabelle Tabella 141, Tabella 144, Tabella 148 e Tabella 152).

**Tabella 157.** Impatti ambientali ed energetico e impatti legati al consumo di gesso associati alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario attuale e negli scenari SA4a e SA4b (trascurando il riciclo della carta); differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario attuale (No carta)	SA4a (No carta)	Differenza <sup>1</sup> (%)	SA4b (No carta)	Differenza <sup>1</sup> (%)
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,75	-6,38	-332	-12,56	-557
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	4,5E-07	6,7E-07	51	9,6E-08	-78
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	4,5E-07	-2,7E-06	-689	-1,6E-06	-462
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,9E-07	2,2E-07	-72	2,8E-08	-96
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,6E-03	-1,3E-02	-903	-1,8E-02	-1233
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,02	-0,01	-133	-0,03	-314
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	-0,06	-425	-0,11	-714
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,06	-0,03	-157	-0,14	-355
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,2E-04	-4,2E-03	-3635	-5,3E-03	-4572
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	5,2E-03	-6,2E-03	-221	-1,1E-02	-314
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	22,60	-29,76	-232	-29,12	-229
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	1,3E-02	-1,1E-02	-183	-2,6E-02	-307
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	2,2E-04	-9,2E-05	-143	1,6E-04	-27
Impatto energetico CED	MJ	44	-149	-436	-171	-485
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	0		0	

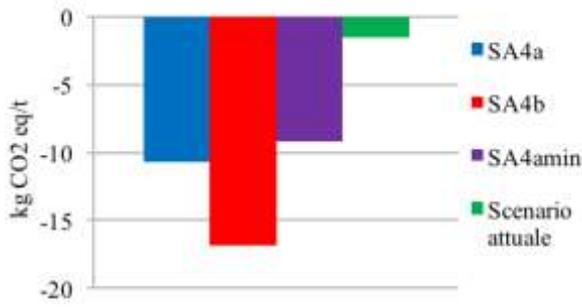
<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### **Analisi di sensitività: variazione del rapporto di sostituzione nello scenario SA4a**

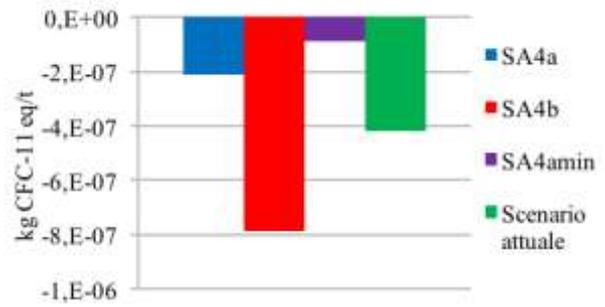
Anche per questo scenario si è scelto di effettuare un'analisi di sensitività, facendo variare il rapporto di sostituzione tra gesso riciclato e calce. Si ricorda che il rapporto di sostituzione utilizzato nello scenario SA4a è pari a 0,4, ottenuto assumendo un titolo del 92% per la calce in commercio. Nello scenario SA4a<sub>min</sub>, invece, è stata considerata la massima purezza del prodotto, ottenendo il rapporto di sostituzione minimo pari a 0,367; in questa analisi, quindi, la variazione percentuale del parametro è dell'8%.

In Tabella 158 sono riportati i risultati degli indicatori per l'SA4a<sub>min</sub> e la rispettiva variazione percentuale rispetto allo scenario SA4a, tenendo in considerazione esclusivamente il processo di riciclo del gesso. Dalla tabella si può notare che i decrementi percentuali dei benefici tra lo scenario SA4a e SA4a<sub>min</sub> sono rilevanti nelle categorie di impatto riferite alla formazione fotochimica di ozono (20%), alla riduzione dello strato di ozono (59%) e all'impovertimento delle risorse idriche (25%) mentre sono più contenute per le altre categorie di impatto come l'eutrofizzazione terrestre (19%) e in acqua marina (16%). Tuttavia, anche prendendo il valore minimo del rapporto di sostituzione nello scenario peggiorativo SA4a<sub>min</sub>, gli indicatori continuano a essere tutti in segno negativo, mostrando che l'utilizzo del gesso riciclato come correttivo dei suoli resta il miglior scenario dal punto di vista della prestazione ambientale. Si ricorda che nello scenario base SA4a si è assunto un valore del rapporto di sostituzione tendente al valore minimo, in via cautelativa: in effetti, in commercio esistono prodotti con diverso tenore di calce e, se si considerasse una minore purezza del prodotto primario, essendo questo valore al denominatore per il calcolo del rapporto di sostituzione, aumenterebbe il prodotto evitato e di conseguenza anche i benefici del riciclo, per cui i vantaggi risulterebbero ancora più elevati rispetto a quelli indicati nello scenario SA4a.

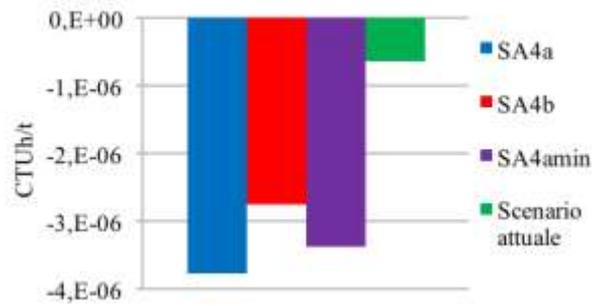
In Figura 53 vengono riportati gli impatti ambientali più rappresentativi per il sistema studiato, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso per gli scenari SA4a, SA4b, SA4a<sub>min</sub> a confronto con lo scenario attuale. Dai risultati si nota che l'uso del gesso riciclato come correttivo del pH è l'impiego che consente di ottenere le prestazioni ambientali migliori, poiché, anche se c'è maggiore incertezza sul tipo di prodotto sostituito e sul rapporto di sostituzione rispetto agli scenari precedenti, comunque, i benefici ottenuti in questo scenario di utilizzo sono sempre maggiori, e in modo significativo, rispetto a quelli dello scenario attuale, con l'unica eccezione della riduzione dello strato di ozono nello scenario SA4a e SA4a<sub>min</sub> e per la quantità di gesso naturale risparmiato con il riciclo.



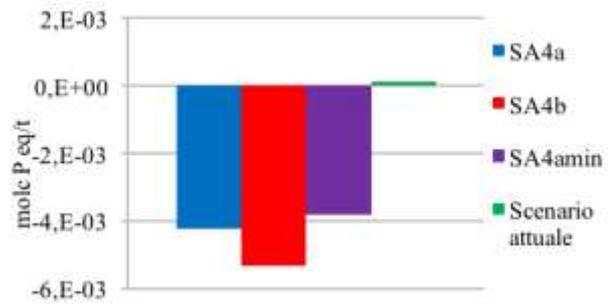
(a) Riscaldamento globale



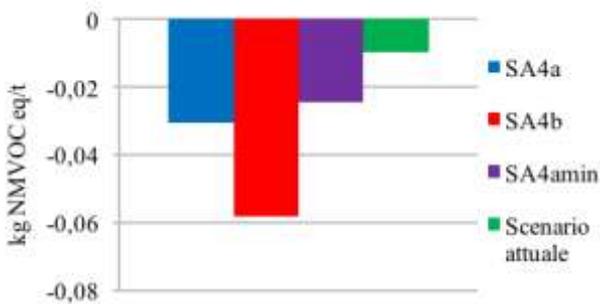
(b) Riduzione dello strato di ozono



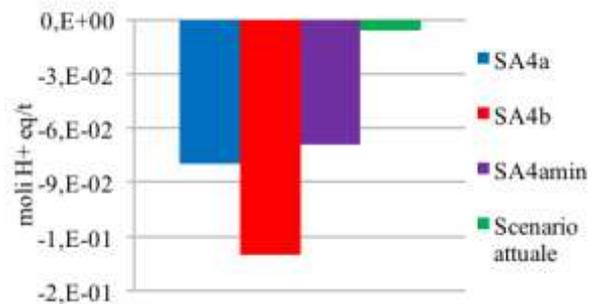
(c) Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)



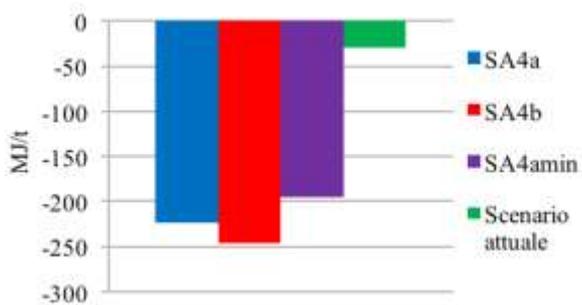
(d) Eutrofizzazione in acqua dolce



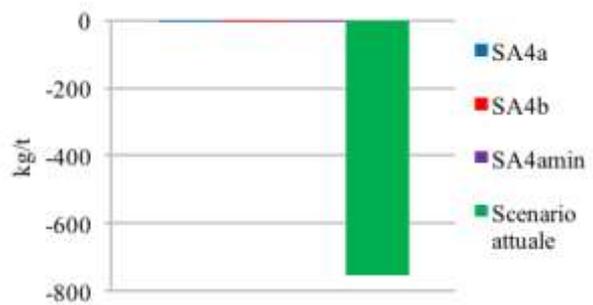
(e) Formazione fotochimica di ozono



(f) Acidificazione



(g) Impatto energetico (CED)



(h) Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)

**Figura 53.** Confronto tra scenario attuale e scenari SA4a, SA4b, SA4a<sub>min</sub> per alcuni degli impatti ambientali, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di una tonnellata di rifiuti in gesso.

**Tabella 158.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di gesso naturale relativi al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA4a e SA4<sub>min</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA4a.

	Unità di misura	SA4a	SA4a <sub>min</sub>	Differenza (%) SA4a <sub>min</sub> -SA4a <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-10,71	-9,19	-14
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,1E-07	-8,6E-08	-59
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-3,8E-06	-3,4E-06	-11
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-6,1E-07	-5,5E-07	-11
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-1,5E-02	-1,3E-02	-11
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,03	-0,02	-20
Acidificazione	moli H+ eq	-0,08	-0,07	-13
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-0,12	-0,10	-19
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-4,2E-03	-3,8E-03	-10
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-1,4E-02	-1,2E-02	-16
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-68,34	-59,73	-13
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	-0,01	-0,01	-25
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,4E-04	-3,9E-04	-11
Impatto energetico CED	MJ	-224	-195	-13
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	0	0	0

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA4a.

### **Analisi dei trasporti nello scenario SA4a**

Nell'analisi di sensitività dei trasporti per lo scenario SA4a, si è deciso di aumentare la distanza di commercializzazione del gesso riciclato e naturale (SA4aT<sub>max</sub>), considerando una distanza di 90 km per il gesso riciclato e di 110 km per quello naturale. Si ricorda che nello scenario base SA4a le distanze di trasporto del gesso riciclato e naturale erano rispettivamente di 48 km e 63 km. I risultati dell'analisi LCA relativi alla sola fase di riciclo del gesso sono mostrati in Tabella 159.

Dalla Tabella 159 si evince un peggioramento del sistema in tutte le categorie di impatto ambientale, soprattutto per la riduzione dello strato di ozono (in cui da un beneficio di 2,1E-07 kg CFC-11 eq si passa a un impatto di 1,3E-07 kg CFC-11 eq), per la formazione fotochimica di ozono, con una riduzione dei benefici del -34% e per l'eutrofizzazione terrestre, in cui il decremento percentuale dei benefici è del -29%. Comunque, anche nel caso peggiorativo in cui le distanze di commercializzazione della materia prima e secondaria raddoppino, i benefici dovuti al riciclo del gesso in questo scenario restano sempre molto più elevati rispetto a quelli degli scenari precedenti, conferendo un maggiore "margine" per il sistema in esame di compensare gli impatti, anche nel caso in cui questi risultassero maggiorati.

**Tabella 159.** Confronto degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di gesso naturale derivanti dal riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SA4a e SA4aT<sub>max</sub>; differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SA4a.

	Unità di misura	SA4a	SA4aT <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SA4aT <sub>max</sub> - SA4a
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-10,71	-9,02	-16
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-2,1E-07	1,3E-07	-162
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-3,8E-06	-3,4E-06	-11
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-6,1E-07	-5,7E-07	-7
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-1,5E-02	-1,4E-02	-7
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,03	-0,02	-34
Acidificazione	moli H+ eq	-0,08	-0,07	-12
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-0,12	-0,09	-29
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-4,2E-03	-4,1E-03	-2
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-1,4E-02	-1,1E-02	-23
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-68,34	-57,59	-16
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	-0,01	-0,01	-2
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-4,4E-04	-3,6E-04	-19
Impatto energetico CED	MJ	-224	-194	-13
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	0	0	0

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario SA4a.

### 3.3.3 Scenario migliorativo suggerito

L'analisi LCA degli scenari futuri alternativi è servita come supporto per la definizione di uno scenario migliorativo di gestione dei rifiuti in gesso che tenga conto degli utilizzi del gesso riciclato con migliori prestazioni ambientali ed energetiche e che sia realisticamente applicabile al contesto regionale in esame.

Per crearlo si sono considerati congiuntamente quattro aspetti:

- le prestazioni ambientali ottenute dalle analisi LCA associate ai singoli destini di impiego del gesso riciclato;
- la qualità e il tipo di dati che sono stati usati per condurre lo studio di LCA (i.e. dati primari/secondari e relativo range di variabilità);
- le limitazioni tecniche del gesso riciclato associate a ciascun destino di utilizzo;
- l'effettiva richiesta/domanda di mercato di gesso riciclato in Lombardia, stimata per ogni settore di applicazione analizzato.

Gli scenari alternativi considerati sono stati ordinati, nell'ambito di ciascun criterio, in ordine decrescente e sono stati assegnati dei pesi ad ogni scenario alternativo a seconda della prestazione esibita. Dalla media dei pesi che ciascun scenario presenta nei vari ambiti di valutazione, si ottiene un punteggio finale, sulla base del quale è stato costruito lo scenario suggerito di gestione dei rifiuti in gesso in regione.

Innanzitutto si è deciso di escludere, nella definizione dello scenario suggerito, le alternative rappresentate dagli scenari SA1 e SA4b. La scelta di non considerare lo scenario di gestione SA1, che prevede l'inserimento della polvere di gesso negli impianti di produzione di pannelli in cartongesso, è stata dettata dal fatto che, a questo scenario, sono associate le prestazioni ambientali ed energetiche peggiori: come mostrato al paragrafo 3.3.2.1, al netto del riciclo di carta/cartone, in questo caso il trasporto ha un peso decisivo in termini di impatti ambientali rendendo questa opzione molto svantaggiosa rispetto agli altri scenari. È importante sottolineare che questa considerazione vale per il contesto della regione Lombardia; tale opzione di utilizzo del gesso riciclato potrebbe invece diventare conveniente per quei contesti in cui è presente un sito di produzione dei pannelli (ad esempio in Piemonte), dove il gesso riciclato può essere inviato senza trasporti eccessivi agli stabilimenti produttivi. Inoltre, si è scelto di escludere anche lo scenario SA4b poiché si è considerato più diffuso l'uso della calce come correttivo del pH, in quanto è un prodotto facilmente reperibile sul mercato ed ha un costo più basso dei correttivi a base di  $\text{CaCO}_3$ . Inoltre, i benefici della calce sono minori rispetto a quelli dei prodotti a base di  $\text{CaCO}_3$ , quindi la scelta è anche cautelativa. Infine, ci sono maggiori incertezze rispetto alle informazioni e ai dati relativi all'impiego dei correttivi a base di  $\text{CaCO}_3$ . Alla luce di queste considerazioni, per lo scenario dell'uso in agricoltura, si è ipotizzato più realistico che il prodotto evitato sia la calce piuttosto che gli altri correttivi.

Quindi, per la costruzione dello scenario migliorativo, si sono considerati solo gli scenari SA2, SA3, SA4a. Di seguito viene spiegato come ognuno di questi scenari risponde ai 4 criteri rispetto ai quali sono stati assegnati le percentuali che compongono lo scenario:

- per quanto riguarda la prestazione ambientale, lo scenario migliore è risultato essere l'SA4a (utilizzo del gesso riciclato in agricoltura come correttivo al posto della calce) in cui il beneficio ambientale derivante dal recupero del gesso è massimo (vedi Tabella 155). A questo segue lo scenario di utilizzo nei cementifici (SA2), in cui si è riscontrato un beneficio netto del riciclo del gesso seppur in misura minore rispetto a SA4a e lievemente maggiore rispetto allo scenario SA3 (vedi Tabella 151) dove il gesso è impiegato per il trattamento dei fanghi da depurazione da cui si producono gessi di defecazione;
- in merito alla qualità e al tipo di dati ricavati durante la fase di inventario, lo scenario SA4a è quello che risponde peggio a questo criterio, in quanto le incertezze associate alla stima dei trasporti sono molto più elevate rispetto agli altri due scenari e perché, per modellizzare il prodotto evitato, è stato usato un processo di default presente in ecoinvent 3.3, meno rappresentativo del contesto regionale. Il tipo di dato utilizzato è importante poiché influenza direttamente la qualità dei risultati dell'analisi

LCA. Per questo motivo gli scenari SA2 e SA3 sono stati valutati come i migliori, in quanto i dati di input ai processi sono sito-specifici, le incertezze dei valori sono piuttosto contenute, e c'è una minore variabilità del rapporto di sostituzione e nella stima dei trasporti;

- in riferimento alle possibili limitazioni tecniche del gesso riciclato nel destino d'uso previsto, lo scenario che presenta meno problemi è l'SA3, in quanto la qualità del gesso riciclato non inficia sulla qualità dei gessi di defecazione prodotti: il vincolo è riferito al tenore di solfato di calcio che si deve raggiungere nel prodotto finale (gessi di defecazione) per cui, a seconda della purezza del gesso riciclato, si agisce modificandone il dosaggio. Lo scenario SA2 invece ha vincoli più restrittivi, poiché le impurità nel gesso riciclato (soprattutto in termini di carta residua) possono creare problemi per la presa del cemento e diventare limitanti per questo impiego. Lo scenario che risponde in modo peggiore a questo criterio è l'SA4a, in quanto il gesso riciclato, per essere riusato in agricoltura, deve rispondere ai criteri stabiliti dal D.Lgs.75/2010 per i correttivi, in cui si sono fissati i tenori minimi di CaO e SO<sub>3</sub> che il gesso agricolo deve rispettare. Inoltre, a seconda di quanto è spinto il trattamento di riciclo e delle caratteristiche dei rifiuti in gesso in ingresso all'impianto, questi parametri potrebbero non essere rispettati, come emerso anche dalle campagne di analisi condotte nell'impianto di riciclo dei rifiuti esistente in Lombardia (v. paragrafo 2.5.3.1);
- infine, considerando la potenziale domanda di gesso riciclato in regione, allo scenario SA3 è stata assegnata la valutazione migliore in quanto in grado di assorbire il maggior quantitativo di materia prima secondaria. Si ricorda che l'offerta di gesso riciclato in regione è pari a 26.340 t considerando il quantitativo totale di rifiuti a base di gesso *prodotti* in Lombardia (caso ottimale) oppure pari a 17.793 t se si tiene in conto la quantità di rifiuti a base di gesso *attualmente inviati a recupero*. Se per lo scenario SA3 si suppone che solo l'impianto in provincia di Pavia utilizzi gesso riciclato per produrre gessi di defecazione (come è avvenuto nel 2014), si avrebbe una domanda di gesso pari a 21.519 t, che già da sola potrebbe assorbire completamente l'offerta di gesso riciclato (o quasi totalmente se si considerano 26.340 t). Nel caso in cui, invece, tutti gli impianti di trattamento dei fanghi usassero in futuro gli stessi dosaggi dell'impianto in provincia di Pavia per produrre gessi di defecazione, allora la quantità totale di gesso richiesto dai 5 impianti in regione sarebbe pari a 58.573 t, valore che va ben oltre l'offerta di gesso riciclato. Allo scenario SA2 è stata assegnata una valutazione intermedia perché la domanda effettiva in regione di gesso naturale/riciclato è di 6.679 t, inferiore rispetto a quella dello scenario SA3; questa rappresenta la domanda "attuale" calcolata considerando di usare il 5% del gesso riciclato in miscelazione a quello naturale, ma teoricamente potrebbe essere anche superiore in quanto, potenzialmente, servirebbero 133.590 t di gesso per produrre il cemento in regione. Lo scenario SA4a è stato valutato come il peggiore rispondente a questo criterio, poiché ad oggi i dati a disposizione sono affetti da notevoli incertezze, sia per quanto riguarda la stima della domanda futura di gesso riciclato, sia, di conseguenza, per quanto riguarda la valutazione di un possibile mercato futuro in questo settore.

In Tabella 160 si riporta il *ranking* dei tre scenari per i quattro criteri presi in analisi. Nella prima riga di ogni criterio è stato posizionato lo scenario con la valutazione migliore. L'ordine è decrescente con la prestazione di ciascun scenario.

**Tabella 160.** Ranking degli scenari SA2, SA3, SA4a (migliore in alto, peggiore in basso).

Benefici ambientali (risultati dell'analisi LCA)	Qualità e tipo di dati usati nell'analisi LCA	Limitazioni tecniche per l'impiego del gesso riciclato	Domanda effettiva di gesso riciclato in regione
SA4a	SA2-SA3	SA3	SA3
SA2	SA4a	SA2	SA2
SA3		SA4a	SA4a

Sulla base di queste valutazioni si è scelto di assegnare alle tre opzioni di utilizzo il medesimo peso all'interno dello scenario suggerito, poiché se si considerano le prestazioni dei tre scenari rispetto ai quattro criteri considerati, nel complesso, queste risultano bilanciate. Infatti, non c'è uno scenario che abbia una prestazione migliore degli altri in tutti i fattori analizzati.

Riassumendo, avendo come riferimento 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione, lo scenario migliorativo potenzialmente realizzabile in futuro in Lombardia 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 reimpiego descritto nello scenario SA4a.

In Tabella 161 sono riportati i valori assunti dagli indicatori riferiti a 1 tonnellata di rifiuti in gesso gestiti in regione nello scenario suggerito sopra descritto. Gli indicatori risultano tutti con segno negativo, ad eccezione dell'impoverimento delle risorse idriche ( $0,22 \text{ m}^3_{\text{water,eq}}$ ). I benefici associati ai prodotti primari evitati, soprattutto alla mancata produzione di pasta vergine termomeccanica, compensano pienamente gli impatti associati al trasporto ed alle operazioni di trattamento dei rifiuti. Se si analizza esclusivamente il riciclo del gesso, escludendo il beneficio della carta, lo scenario suggerito mostra tutti indicatori di segno negativo (beneficio netto) ad eccezione dell'impoverimento delle risorse idriche ( $+6,95\text{E}-03 \text{ m}^3_{\text{water,eq}}$ ). In particolare, si ha un risparmio di  $-4,5 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$  per il riscaldamento globale, di  $-2,27\text{E}-07 \text{ CTUh}$  per la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni), un risparmio di  $-1,23\text{E}-03 \text{ kgP}_{\text{eq}}$  per l'eutrofizzazione in acqua dolce e un risparmio di  $-93 \text{ MJ}$  di risorse energetiche.

**Tabella 161.** Indicatori associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto in gesso in regione nello scenario migliorativo suggerito.

	Unità di misura	Totale	Trasporto	Riciclo gesso	Riciclo metalli	Riciclo carta
Categorie di impatto ambientale (ILCD):						
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-161,54	4,52	-4,50	-0,19	-161,37
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	-1,4E-05	8,69E-07	-3,85E-07	1,40E-08	-1,49E-05
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-5,1E-05	1,11E-06	-1,74E-06	1,32E-08	-5,06E-05
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	-1,1E-05	1,43E-07	-2,27E-07	6,90E-07	-1,12E-05
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-0,21675	2,51E-03	-5,62E-03	-7,36E-05	-2,14E-01
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	-0,73694	0,03	-0,02	-5,35E-04	-0,74
Acidificazione	moli H+ eq	-1,44154	0,02	-0,03	-7,51E-04	-1,43
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	-2,77368	0,09	-0,07	-1,58E-03	-2,79
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-0,12094	3,44E-04	-1,23E-03	-3,23E-04	-0,12
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	-0,28294	0,01	-0,01	-1,52E-04	-0,28
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	-1.348	29,02	-33,08	9,56	-1.354
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,22	6,14E-04	6,95E-03	2,94E-03	0,21
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	-0,00445	3,52E-04	-2,68E-04	-4,80E-06	-4,53E-03
Impatto energetico CED	MJ	-3.924	77	-93	-2	-3.906
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-529	0	-529	0	0

In Tabella 162 si riportano i valori degli impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di gesso naturale nello scenario suggerito, a confronto con lo scenario attuale, riferiti alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso. È stata calcolata anche la differenza percentuale rispetto allo scenario attuale; ai fini del confronto si è preferito escludere il riciclo della carta, per i motivi illustrati al paragrafo 3.3.2.1.

**Tabella 162.** Impatti ambientali ed energetico e consumo di risorsa naturale associati alla gestione di 1 tonnellata di rifiuti a base di gesso nello scenario attuale e nello scenario migliorativo suggerito (trascurando il riciclo della carta); differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario attuale.

	Unità di misura	Scenario attuale (No carta)	Scenario migliorativo (No carta)	Differenza (%) <sup>1</sup>
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,75	-0,16	-106
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	4,5E-07	4,99E-07	12
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	4,5E-07	-6,21E-07	-238
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	7,9E-07	6,05E-07	-24
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	1,6E-03	-3,18E-03	-304
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	0,02	6,67E-03	-56
Acidificazione	moli H+ eq	0,02	-6,93E-03	-140
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,06	1,98E-02	-65
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	1,2E-04	-1,21E-03	-1.113
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	0,01	7,42E-04	-86
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	22,60	5,50	-76
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	0,01	1,05E-02	-18
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	2,2E-04	7,93E-05	-63
Impatto energetico CED	MJ	44,37	-18	-140
Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)	kg	-755	-529	-30

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

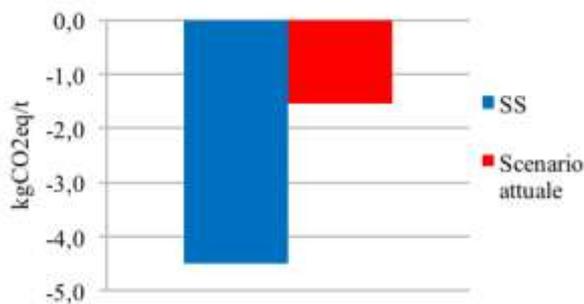
Dai risultati emerge che lo scenario suggerito presenta un sostanziale incremento dei benefici netti (valori negativi) per molte categorie d'impatto: in particolare per le categorie di impatto relative all'eutrofizzazione in acqua dolce (-1113%), all'assunzione di materiale particolato (-304%), alla tossicità per l'uomo con effetti non cancerogeni (-238%), all'acidificazione, all'impatto energetico (-140%) e al riscaldamento globale (-106%).

Il risparmio di gesso naturale è minore (529 kg rispetto a 755 kg) perché nello scenario migliorativo si è assunto che un terzo di 1 tonnellata gestita abbia come prodotto evitato la calce. Per la categoria dell'eutrofizzazione in acqua dolce si evidenzia il maggior beneficio complessivo rispetto allo scenario attuale, poiché da un impatto di 1,2E-04 kgP<sub>eq</sub> nello scenario attuale si passa ad un beneficio netto di -

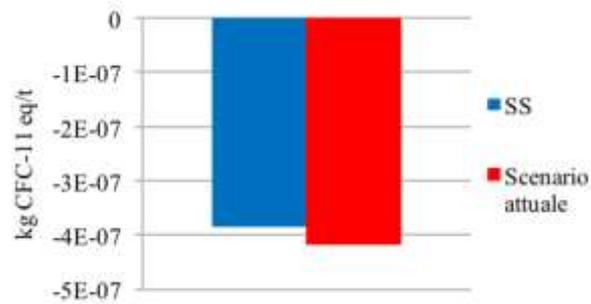
1,21E-03 kgP<sub>eq</sub> nello scenario migliorativo. Anche gli impatti sulla tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni) e sull'assunzione di materiale particolato, di segno positivo nello scenario attuale e pari rispettivamente a 4,5E-07 CTUh e 1,6E-03 kg PM2.5 eq, diventano un *saving* di -6,21E-07CTUh e -3,18E-03 kg PM2.5 eq nello scenario migliorativo.

Tuttavia, se si considera solo il riciclo del gesso e dei metalli, anche per lo scenario migliorativo, in alcune categorie di impatto (es. riscaldamento globale, riduzione strato di ozono, formazione fotochimica di ozono), i benefici derivanti dal reimpiego del gesso riciclato non riescono a compensare gli impatti di segno positivo delle varie fasi di gestione, sebbene il margine appaia piuttosto limitato (ad es. il riscaldamento globale). Combinando in tal modo gli utilizzi del gesso riciclato, gli impatti associati al trattamento risultano inferiori, rendendo il carico ambientale complessivo minore rispetto allo scenario attuale e apportando dei benefici notevoli nella maggior parte delle categorie di impatto.

In Figura 54 sono riportati gli impatti ambientali maggiormente rappresentativi per il sistema, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di 1 tonnellata di rifiuti in gesso secondo lo scenario suggerito, a confronto con lo scenario attuale.



(a) Riscaldamento globale



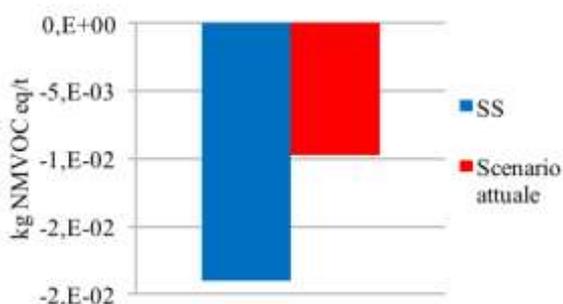
(b) Riduzione dello strato di ozono



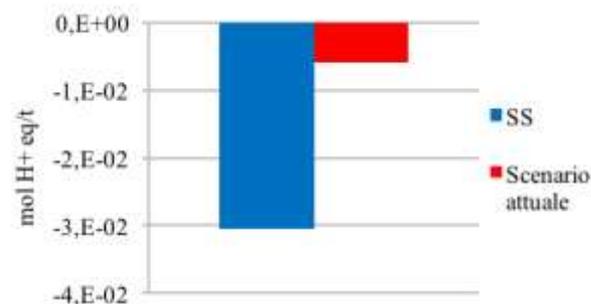
(c) Tossicità per l'uomo (effetti non cancerogeni)



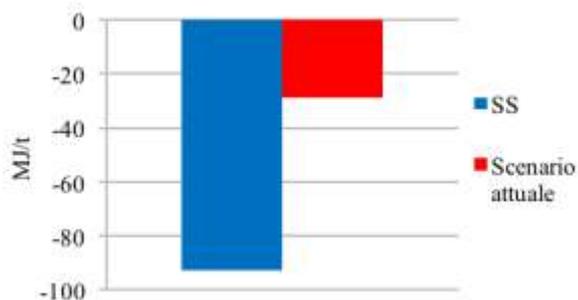
(d) Eutrofizzazione in acqua dolce



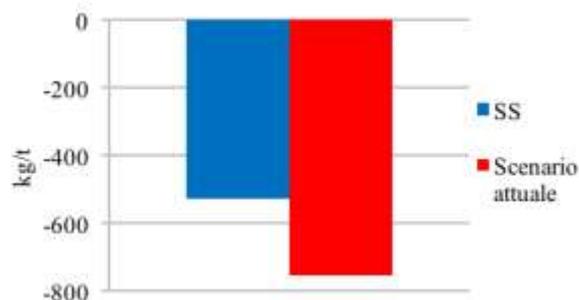
(e) Formazione fotochimica di ozono



(f) Acidificazione



(g) Impatto energetico (CED)



(h) Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)

**Figura 54.** Confronto tra scenario migliorativo suggerito (SS) e scenario attuale per alcuni degli impatti ambientali, l'impatto energetico e il consumo di risorsa naturale (gesso), riferiti al riciclo di una tonnellata di rifiuto in gesso.

### Analisi dei trasporti nello scenario migliorativo

È stata effettuata, infine, un'analisi di sensitività sui trasporti per lo scenario migliorativo suggerito. Si è deciso, in questo caso, di aumentare la distanza di conferimento dei rifiuti agli impianti, assumendola pari a 60 km ( $SST_{max}$ ), invece di 37 km come nello scenario base (SS): 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, che potrebbe risultare necessaria in futuro, al fine di ottimizzare il trasporto di conferimento in regione.

Il confronto tra i due scenari è riportato nella Tabella 163. Si è trascurato anche in questo caso il riciclo della carta, per avere un confronto più puntuale e relativo al solo gesso riciclato. Si può vedere che il trasporto di conferimento dei rifiuti incide in modo considerevole sui risultati: l'aumento del trasporto dei rifiuti, infatti, riduce i benefici in tutte le categorie di impatto, peggiorando le prestazioni del sistema in modo più evidente rispetto ai trasporti per la commercializzazione del gesso riciclato e naturale. Al netto del riciclo della carta, ad esempio, si ha un incremento degli impatti del 1.705% per il riscaldamento globale, del 693% per l'eutrofizzazione in acqua marina, del 284% per l'eutrofizzazione terrestre. Considerando il riciclo solo del gesso e dei metalli, all'aumentare della distanza di conferimento dei rifiuti ( $SST_{max}$ ) gran parte delle categorie di impatto che prima presentavano un indicatore di segno negativo cambiano di segno (es. riscaldamento globale, tossicità per l'uomo, acidificazione e CED), indicando un carico ambientale aggiunto al sistema; solo per l'eutrofizzazione in acqua dolce, l'assunzione di materiale particolato ed il consumo di risorsa naturale si può vedere ancora un beneficio netto.

A fronte di questi risultati, sarebbe preferibile incentivare nello scenario futuro il destino di riutilizzo del gesso riciclato come correttivo agricolo (SA4a), in quanto è quello che presenta la migliore prestazione ambientale ed energetica in termini assoluti ma che mostra anche i risultati più cautelativi; infatti è l'unico che, nel caso in cui si consideri solo il riciclo del gesso (senza i benefici del riciclo della carta), offre un margine più ampio di beneficio in grado di compensare gli impatti dovuti alle operazioni di riciclo stesso e ai trasporti. Come hanno dimostrato le analisi di sensitività condotte sullo scenario SA4A (vedi paragrafo 3.3.2.4), infatti, quasi tutti gli indicatori di impatto continuano a mantenere un segno negativo sia nel caso in cui si diminuisca il rapporto di sostituzione tra risorse secondarie e prodotti evitati, sia nel caso in cui si aumentino le distanze di trasporto per il conferimento dei rifiuti e la commercializzazione dei prodotti secondari e vergini.

I risultati delle analisi di sensitività evidenziano la necessità di scegliere con particolare attenzione la posizione dei futuri impianti di riciclo dei rifiuti in 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.

**Tabella 163.** Confronto degli impatti ambientali, dell’impatto energetico e del consumo di gesso naturale derivanti dalla gestione di 1 tonnellata di rifiuti in gesso nello scenario SS e SST<sub>max</sub>, (trascurando il riciclo della carta); differenza percentuale calcolata rispetto allo scenario SS.

	Unità di misura	SS	SST <sub>max</sub>	Differenza (%) <sup>1</sup> SST <sub>max</sub> -SS
Categorie di impatto ambientale (ILCD):				
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	-0,16	2,64	-1705
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	5,0E-07	1,0E-06	108
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh	-6,2E-07	6,8E-08	-111
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh	6,1E-07	6,9E-07	15
Assunzione di materiale particolato	kg PM2.5 eq	-3,2E-03	-1,6E-03	-49
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	6,7E-03	2,3E-02	244
Acidificazione	moli H+ eq	-0,01	0,01	-218
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	0,02	0,08	284
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-1,2E-03	-9,9E-04	-18
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	7,4E-04	5,9E-03	693
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	5,50	23,54	328
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	1,1E-02	1,1E-02	4
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	7,9E-05	3,0E-04	276
Impatto energetico CED	MJ	-18	31	-274
Consumo di risorsa naturale (gesso)	kg	-529	-529	0

<sup>1</sup> Calcolata rispetto allo scenario attuale.

### 3.3.4 Conclusioni LCA3 e raccomandazioni per il miglioramento del sistema di gestione dei rifiuti a base di gesso

Dai risultati dell’analisi di LCA3 relativa al trattamento in impianti dedicati dei rifiuti C&D a base di gesso è emerso che questa forma di gestione consente di ottenere benefici netti per tutte le categorie di impatto ambientale, per l’impatto energetico e per il consumo di gesso naturale, in quanto i benefici indotti dal riciclo riescono a compensare completamente tutti gli impatti generati dalle operazioni di riciclo stesse e ancor più dai trasporti; tuttavia, è doveroso sottolineare che il contributo maggiore al *saving* è dovuto all’ingente beneficio derivante dal riciclo della carta separata durante il trattamento dei rifiuti in gesso più che dall’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 costruiti 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 ricavati dalle simulazioni degli scenari alternativi sono stati quantificati i diversi vantaggi ambientali di ogni possibile destino preso in considerazione e si è cercato di comprendere quale opzione è in grado di rendere il sistema regionale più sostenibile in futuro. Per

ogni scenario alternativo sono state effettuate anche delle analisi di sensitività, finalizzate a valutare l'effetto delle ipotesi e delle incertezze dei dati di input sui risultati finali e ad individuare i parametri del sistema che ne influenzano maggiormente il bilancio ambientale.

Dai risultati delle simulazioni è emerso che il destino del gesso riciclato che conferisce la migliore prestazione ambientale è quello che ne prevede il riutilizzo in agricoltura come correttivo del pH dei terreni acidi (SA4 – paragrafo 3.3.2.4). 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 (SA1 – paragrafo 3.3.2.1); in questo scenario il trasporto 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 (se si esclude il riciclo della carta).

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. Per costruirlo si è tenuto conto delle prestazioni ambientali ottenute dalle analisi LCA dei diversi scenari alternativi, delle limitazioni tecniche associate a ciascun destino di utilizzo del gesso riciclato, dell'effettiva richiesta di mercato di gesso riciclato in regione in ogni settore considerato e della qualità dei dati utilizzati per l'analisi LCA. Bilanciando i diversi aspetti è stato ottenuto lo scenario migliorativo futuro di gestione (vedi paragrafo 3.3.3) in cui 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), in particolare per l'eutrofizzazione in acqua dolce (1.113%), l'assunzione di materiale particolato (304%), la tossicità per l'uomo con effetti non cancerogeni (238%), l'acidificazione e l'impatto energetico (140%) e il riscaldamento globale (106%).

L'analisi di sensitività condotta sullo scenario futuro (vedi paragrafo 3.3.3) 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, in sostituzione della pasta vergine termomeccanica. 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.

### 3.4 Risultati dell'intero sistema di gestione regionale

In questo paragrafo sono riportati i risultati complessivi del sistema di gestione regionale dei rifiuti C&D non pericolosi, ottenuti moltiplicando i risultati specifici delle analisi LCA1, LCA2 e LCA3 per i rispettivi quantitativi di rifiuti. L'elaborazione è stata fatta sia per quanto riguarda lo scenario attuale che per quello migliorativo futuro, che prevede l'ottimizzazione dei principali aspetti che influenzano le prestazioni ambientali ed energetiche del sistema. Si ricorda che nello scenario attuale i rifiuti C&D non pericolosi sono stati gestiti secondo le modalità illustrate di seguito:

- 6.999.986 tonnellate di rifiuti C&D non pericolosi sono state gestite nel sistema LCA1 (recupero in miscelazione dei rifiuti negli impianti C&D), di cui il 96,7% è stato recuperato in impianti per la produzione di aggregati riciclati misti e il 3,3% è stato smaltito in discarica (vedi paragrafo 2.3.2.6). La miscela di rifiuti è composta per l'80,6% da rifiuti misti (CER 170904), per l'11,1% da cemento, mattoni e mattonelle (CER 1701), per l'8% da rifiuti bituminosi (CER 170302) e per lo 0,4% da rifiuti a base di gesso (CER 170802);
- 382.488 tonnellate di rifiuti C&D bituminosi sono state gestite nel sistema LCA2, in impianti dedicati per il recupero del fresato, composti per il 75% da impianti a caldo per la produzione di nuovi conglomerati bituminosi e per il restante 25% in impianti a freddo per la produzione di eco-basi (vedi paragrafo 2.4.2.6);
- 97 tonnellate di rifiuti C&D a base di gesso sono state gestite nel sistema LCA3, in impianti dedicati per il recupero del cartongesso finalizzati all'ottenimento di polvere di gesso riciclato reimpiegato come additivo nel trattamento dei fanghi di depurazione con produzione di gessi di defecazione (vedi paragrafo 2.5.3.4).

Nello scenario migliorativo futuro è stato assunto che tutti i rifiuti C&D bituminosi (CER 170302) e i rifiuti a base di gesso (CER 170802) gestiti in regione siano inviati ad impianti di trattamento dedicati (descritti nelle analisi LCA2 e LCA3), evitando quindi la pratica di miscelazione di questi flussi con i rifiuti C&D misti; ciò, infatti, da un lato abbassa la qualità degli aggregati riciclati misti prodotti dagli impianti di recupero C&D, rendendoli meno appetibili sul mercato e limitandone i possibili campi di impiego, e, dall'altro, riduce i benefici ambientali potenzialmente ottenibili mediante il recupero dedicato di questi rifiuti. Ai fini della costruzione dello scenario migliorativo futuro, ad ogni flusso di rifiuto, sono state applicate le ipotesi degli scenari migliorativi già presentate nelle specifiche LCA (v. paragrafi 3.1.3 per lo scenario ideale 50/50, 3.2.3 e 3.3.3), che includono: l'eliminazione delle operazioni intermedie di stoccaggio e l'ottimizzazione dei trasporti per il conferimento dei rifiuti agli impianti, l'eliminazione dello smaltimento in discarica, l'esistenza di un mercato solido dei prodotti riciclati in regione, il trattamento di recupero secondo le migliori tecnologie disponibili e il miglior scenario di utilizzo della materia prima secondaria. Quindi, per il trattamento dei C&D misti si è considerato il 50% di impianti alimentati ad energia elettrica e il 50% di impianti a gasolio e la produzione di aggregati riciclati di elevata qualità da utilizzare in

applicazioni di maggior livello in sostituzione di aggregati naturali; per i rifiuti bituminosi si è considerato il 100% di impianti per la produzione di CB a caldo; infine, per i rifiuti in cartongesso, si è ipotizzato di aumentare la capacità di trattamento in regione al fine di recuperare il 100% dei rifiuti in impianti dedicati per ottenere carta e gesso riciclato: i rifiuti in carta sono destinati a recupero nelle cartiere mentre la polvere di gesso è destinata per 1/3 ai cementifici, per 1/3 alla produzione di gessi di defecazione e per 1/3 al settore agricolo.

In Tabella 164 sono riportati i flussi di rifiuti dello scenario di gestione attuale e dello scenario migliorativo futuro.

**Tabella 164.** Ripartizione dei flussi di rifiuti C&D all'interno del sistema di gestione regionale, rispettivamente nello scenario attuale e in quello futuro migliorativo.

Flussi di rifiuti	Scenario attuale (t)	Scenario migliorativo (t)
170904 + 1701 + 170302 + 170802 (LCA1)	6.999.986	6.389.927
170302 (LCA2)	382.488	971.656
170802 (LCA3)	97	20.988
<b>Totale</b>	<b>7.382.571</b>	<b>7.382.571</b>

Per calcolare le prestazioni complessive del sistema regionale nello scenario attuale e futuro, sono stati moltiplicati gli impatti ambientali ed energetico ed il consumo di risorse naturali specifici di ciascuna analisi LCA per il rispettivo quantitativo di rifiuti (Tabella 164) e sommati i contributi derivanti da ciascun flusso. In Tabella 165 sono riportati i risultati dell'analisi e mostrato il confronto tra lo scenario attuale e quello futuro: nelle prime colonne sono presenti i risultati complessivi di ogni singola analisi LCA, mentre nell'ultima colonna i risultati dell'intero sistema regionale. Nell'ultima riga della Tabella 165 è inoltre riportato il volume di discarica risparmiato, riportato per gli scenari attuali nei paragrafi 3.1.1, 3.2.1.4 e 3.3.1. e calcolato ora anche per gli scenari migliorativi. Dai risultati emerge che il sistema attuale di gestione presenta già buone prestazioni ambientali per alcune categorie di impatto come la riduzione dello strato di ozono, l'eutrofizzazione in acqua dolce e l'impatto energetico (CED), che mostrano impatti in segno negativo; questo è da attribuire al recupero del fessato e del cartongesso, i cui benefici riescono a compensare gli impatti in segno positivo associati all'LCA1. Inoltre, gli indicatori di risparmio di risorse naturali non rinnovabili (sabbia e ghiaia e gesso) presentano per tutte e tre le analisi LCA segno negativo, rappresentando quindi un beneficio ambientale.

Passando dallo scenario attuale allo scenario futuro, si ottiene un sostanziale miglioramento del sistema, con importanti riduzioni degli impatti ambientali ed energetico e del consumo di risorsa naturale: i benefici che

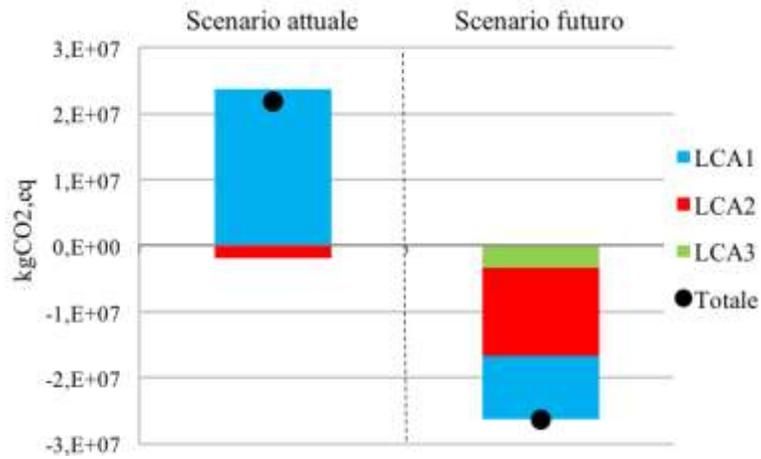
già caratterizzano il sistema attuale, relativi ad esempio all'impatto energetico ed alla riduzione dello strato di ozono, aumentano di più di un ordine di grandezza nello scenario migliorativo futuro (per la riduzione dello strato di ozono si passa da un beneficio netto pari a  $-1,5 \text{ kgCFC-11}_{\text{eq}}$  nello scenario attuale ad un beneficio di  $-21,3 \text{ kg CFC-11}_{\text{eq}}$  nello scenario futuro, mentre per l'impatto energetico si passa da un impatto in segno negativo di  $-1,62\text{E}+08 \text{ MJ}$  nello scenario attuale ad un impatto di  $-1,87\text{E}+09 \text{ MJ}$  nello scenario futuro). Per le categorie di impatto ambientale del riscaldamento globale, della tossicità umana non cancerogena, dell'assunzione di materiale particolato, della formazione fotochimica di ozono, dell'acidificazione e dell'eutrofizzazione terrestre, l'ottimizzazione del sistema di gestione permette di passare da impatti in segno positivo a benefici netti per il sistema; in questi casi, quindi, nello scenario futuro i benefici ambientali associati alle azioni di recupero aumentano fino a riuscire a bilanciare gli impatti aggiunti nell'ambiente. Le uniche categorie di impatto che continuano a presentare nello scenario futuro indicatori di segno positivo, quindi carichi aggiuntivi sull'ambiente, sono l'ecotossicità in acqua dolce ( $+3,82\text{E}+08 \text{ CTUe}$ ), l'impovertimento delle risorse idriche ( $+85.787 \text{ m}^3\text{water eq}$ ) e l'impovertimento delle risorse minerali e fossili ( $+262 \text{ kgSb}_{\text{eq}}$ ).

In Figura 55 sono mostrati in forma grafica i confronti tra lo scenario attuale e futuro di alcuni impatti ambientali, dell'impatto energetico e del consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia e gesso naturale) dove sono evidenziati i contributi delle tre LCA sugli impatti complessivi del sistema. Dai grafici si nota come i benefici associati al recupero del gesso (LCA3, barra verde) acquistino importanza nello scenario futuro rispetto a quello attuale, in quanto attualmente sono state inviate solo 97 tonnellate di C&D a base di gesso a trattamento dedicato, mentre nello scenario migliorativo è stato ipotizzato l'intero quantitativo di rifiuto gestito (i.e 20.988 tonnellate): ad esempio, per il riscaldamento globale, nello scenario attuale della LCA3 si ha un beneficio pari a  $-1,54\text{E}+04 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}$ , corrispondente allo 0,06% dell'impatto complessivo, mentre nello scenario futuro il beneficio risulta essere  $-3,39\text{E}+06 \text{ kgCO}_{2,\text{eq}}$ , contribuendo per il 13% al totale. Anche i benefici associati al recupero dei rifiuti C&D bituminosi (LCA2, barra rossa) aumentano nello scenario futuro, come conseguenza dell'incremento di rifiuti avviati a trattamento specifico in impianti di riciclo del fresato a caldo (da 382.488 t dello scenario attuale a 971.656 tonnellate nello scenario migliorativo). In particolare, per quanto riguarda l'impatto energetico (CED), il beneficio associato al recupero del fresato passa da  $-6,16\text{E}+08 \text{ MJ}$  nello scenario attuale a  $-1,67\text{E}+09$  nello scenario futuro, contribuendo per l'89% al beneficio complessivo del sistema. Nello scenario futuro aumenta il risparmio di sabbia e ghiaia (Figura 55, grafico (g)) grazie ai maggiori benefici derivanti dal recupero dei C&D misti (LCA1, barra azzurra), dovuti alla produzione di aggregati riciclati di elevata qualità che sostituiscono l'impiego di aggregati naturali in applicazioni più nobili rispetto a quanto avviene nello scenario attuale. Il risparmio di gesso naturale (Figura 55, grafico (h)) si ottiene solo dal trattamento dei rifiuti a base di gesso nella LCA3: pertanto, aumentando la quantità di rifiuti avviati a questo tipo di trattamento dedicato, aumenta anche il risparmio di gesso naturale estratto da cave, che passa da  $-73.248 \text{ kg}$  a  $-1,11\text{E}+07 \text{ kg}$  (aumento del beneficio del 15.053%).

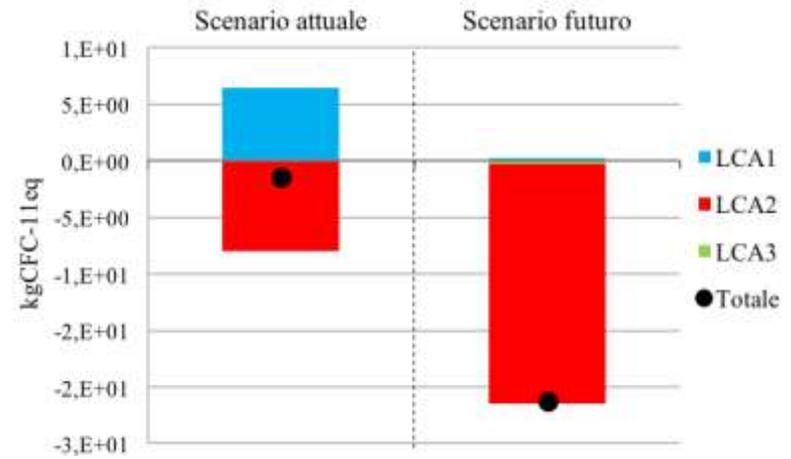
Dai risultati complessivi e dai confronti tra lo scenario attuale e quello futuro emerge quindi che la pianificazione territoriale per la gestione dei rifiuti C&D non pericolosi dovrebbe concentrarsi, oltre che sul miglioramento delle prestazioni di ogni singola filiera di trattamento approfondite nei paragrafi 3.1.3, 3.2.3 e 3.3.3, anche sulla riduzione delle pratiche di miscelazione dei rifiuti bituminosi e dei rifiuti a base di gesso con rifiuti misti, in quanto avviare questi flussi alla specifica filiera di recupero comporta la massimizzazione dei benefici associati alle azioni di recupero.

**Tabella 165.** Confronto degli impatti ambientali, dell'impatto energetico, del consumo di sabbia e ghiaia, del consumo di gesso naturale e del risparmio di discarica associati alla gestione di 7.382.571 tonnellate di rifiuti C&D non pericolosi nei sistemi LCA1, LCA2 e LCA3, secondo le ipotesi dello scenario attuale e dello scenario migliorativo futuro; nell'ultima colonna è riportato il totale degli impatti nel sistema complessivo della regione Lombardia.

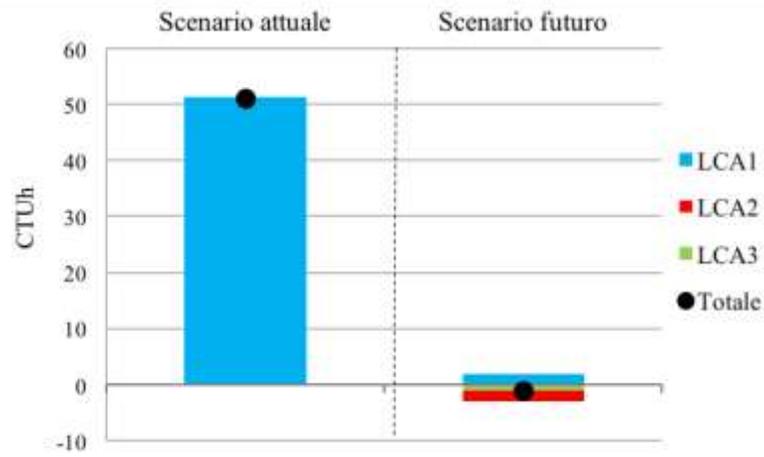
	Unità di misura	LCA1		LCA2		LCA3		Totale RL	
		Scenario attuale	Scenario migliorativo						
Categorie di impatto ambientale (ILCD):									
Riscaldamento globale	kg CO <sub>2</sub> eq	2,38E+07	-9,52E+06	-1,89E+06	-1,33E+07	-1,54E+04	-3,39E+06	<b>2,19E+07</b>	<b>-2,63E+07</b>
Riduzione dello strato d'ozono	kg CFC-11 eq	6	0,2	-8	-21	-1,40E-03	-0,3	<b>-1,5</b>	<b>-21,3</b>
Tossicità per l'uomo (effetti non canc)	CTUh	51	2	-0,3	-2	-4,87E-03	-1	<b>51</b>	<b>-1</b>
Tossicità per l'uomo (effetti canc)	CTUh	35	31	-0,1	-0,4	-1,01E-03	-0,2	<b>35</b>	<b>30</b>
Assunzione di materiale particolato	kg PM <sub>2,5</sub> eq	20.518	-4.009	-3.145	-10.659	-21	-4.549	<b>17.352</b>	<b>-19.217</b>
Formazione fotochimica di ozono	kg NMVOC eq	202.078	-14.131	133.056	-154.628	-71	-15.467	<b>335.063</b>	<b>-184.225</b>
Acidificazione	moli H <sup>+</sup> eq	173.187	-34.548	-48.020	-149.581	-137	-30.254	<b>125.030</b>	<b>-214.383</b>
Eutrofizzazione terrestre	moli N eq	723.533	-24.798	-67.872	-256.804	-265	-58.213	<b>655.396</b>	<b>-339.815</b>
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kg P eq	-9.645	-12.365	-60	-1.233	-12	-2.538	<b>-9.716</b>	<b>-16.136</b>
Eutrofizzazione (acqua marina)	kg N eq	65.910	-2.702	-6.474	-24.018	-27	-5.938	<b>59.409</b>	<b>-32.658</b>
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe	1,58E+09	4,55E+08	-6,60E+06	-4,41E+07	-1,29E+05	-2,83E+07	<b>1,58E+09</b>	<b>3,82E+08</b>
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq	144.420	78.746	3.979	2.366	22	4.674	<b>148.421</b>	<b>85.787</b>
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kg Sb eq	1.967	581	-5	-225	-0,4	-93	<b>1.962</b>	<b>262</b>
CED	MJ	4,55E+08	-1,26E+08	-6,16E+08	-1,67E+09	-3,74E+05	-8,23E+07	<b>-1,62E+08</b>	<b>-1,87E+09</b>
Consumo di sabbia e ghiaia	kg	-4,28E+09	-6,53E+09	-3,51E+08	-9,78E+08	0	0	<b>-4,63E+09</b>	<b>-7,51E+09</b>
Consumo di gesso naturale	kg	0	0	0	0	-73.248	-1,11E+07	<b>-73.248</b>	<b>-1,11E+07</b>
Discarica risparmiata	m <sup>3</sup>	4.834.994	4.564.233	562.482	1.428.906	485	194.940	<b>5.397.961</b>	<b>6.098.079</b>



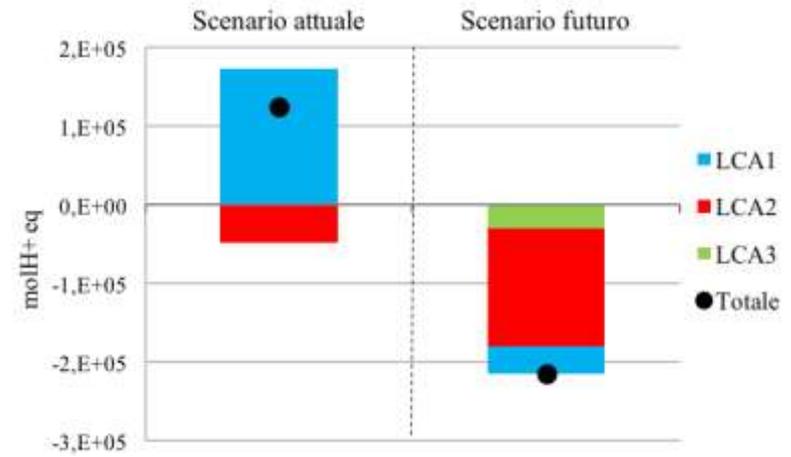
(a) Riscaldamento globale



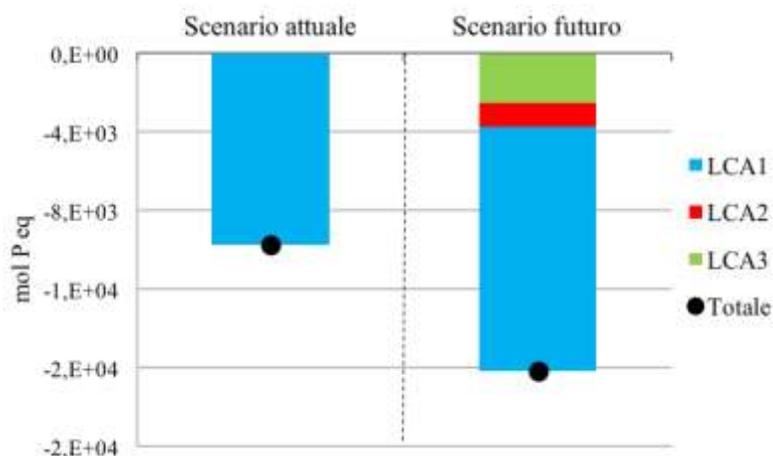
(b) Riduzione dello strato di ozono



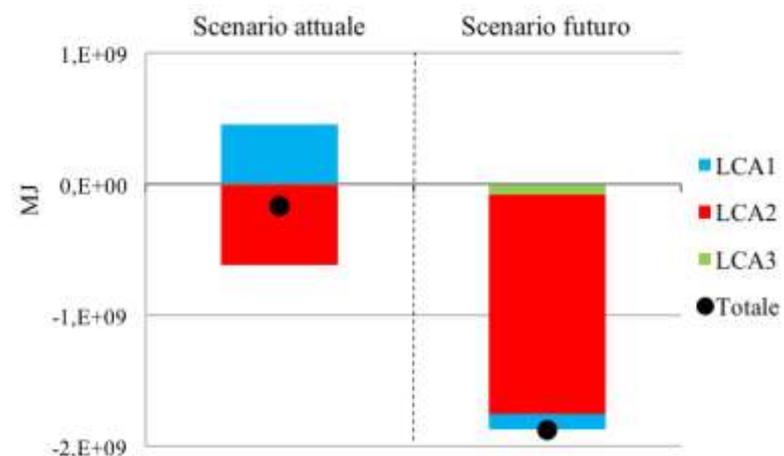
(c) Tossicità umana (effetti non cancerogeni)



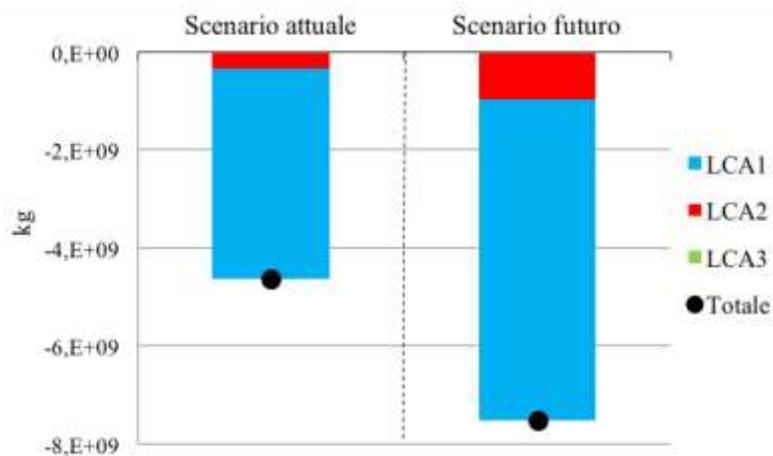
(d) Acidificazione



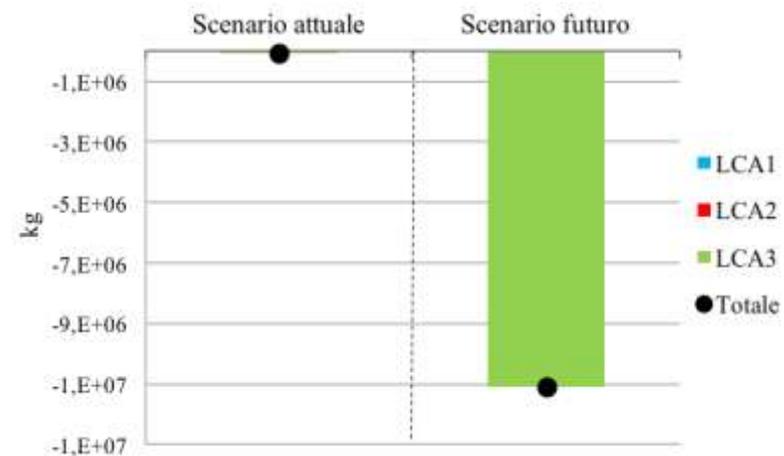
(e) Eutrofizzazione in acqua dolce



(f) Impatto energetico (CED)



(g) Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)



(h) Consumo di risorsa naturale (gesso naturale)

**Figura 55.** Confronto di alcuni impatti ambientali, dell'impatto energetico, del consumo di sabbia e ghiaia e del consumo di gesso naturale nello scenario attuale di gestione e nello scenario migliorativo futuro, con evidenziati i contributi derivanti dai diversi sistemi di gestione LCA1 (recupero in miscelazione C&D misti), LCA2 (recupero dedicato fresato) e LCA3 (recupero dedicato dei rifiuti a base di gesso).

## CONCLUSIONI, RACCOMANDAZIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente studio è stato condotto con lo scopo di quantificare sono le prestazioni ambientali ed energetiche dell'attuale sistema di gestione e trattamento dei rifiuti C&D non pericolosi in regione Lombardia, applicando la metodologia dell'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment).

Come primo step, ai fini della valutazione, è stato necessario quantificare i flussi di rifiuti prodotti e gestiti in regione e come questi si ripartiscono tra i vari impianti di destino (stoccaggio, recupero e discarica). L'analisi dei flussi, basata sull'elaborazione della banca dati MUD del 2014, ha evidenziato che i rifiuti misti (CER 170904) rappresentano il flusso prevalente prodotto in regione, con oltre 5.851.639 t, seguito dalle miscele bituminose CER 170302 (1.018.580 t), dai rifiuti contenenti cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche CER 1701 (804.625 t) e, in ultimo, dai rifiuti a base di gesso CER 17 08 02 (31.405 t). Al netto di Import ed Export, i rifiuti trattati negli impianti regionali, nel 2014, sono risultati pari a 5.625.978 t per il CER 17 09 04, 971.656 t per il CER 17 03 02, 763.950 t per il CER 1701 e 20.988 t per il CER 17 08 02. Dunque, quasi tutto il rifiuto prodotto in regione è stato anche trattato all'interno del sistema impiantistico regionale, essendo le percentuali di gestito su prodotto totale, pari al 95% per i CER 1701 e 170302 e al 96% per i rifiuti misti. Invece, per i rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02), poiché sono stati registrati notevoli quantitativi avviati ad impianti fuori regione, la percentuale di gestito su prodotto risulta significativamente inferiore (pari circa al 67%) e ciò è indicativo di una possibile carenza nel trattamento di recupero di questo specifico flusso di rifiuti in regione.

Riguardo le modalità di gestione dei rifiuti in esame, i risultati delle elaborazioni hanno evidenziato che questi rifiuti vengono indirizzati principalmente verso gli impianti di recupero, con percentuali che si attestano sopra al 90%, ad eccezione dei rifiuti a base di gesso, per i quali si stima che circa l'85% del totale gestito in regione venga trattato negli impianti di recupero mentre il 14% rimane stoccato all'interno degli impianti di messa in riserva. Il ricorso alla discarica rappresenta una percentuale piuttosto ridotta rispetto alle altre modalità di gestione, pari a circa il 3,5 % per i rifiuti misti 17 09 04, all'1,8 % per i rifiuti della categoria 17 01, allo 0,95% per le miscele bituminose e inferiore allo 0,5% per i rifiuti a base di gesso.

Ai fini del bilancio di massa per il sistema in esame, sono stati inoltre valutati i rifiuti in ingresso ed uscita dal sistema regionale: complessivamente, nel 2014, sono entrate 608.815 tonnellate di rifiuti (di cui: 47.075 t per il CER 17 01, 174.389 t per il CER 17 03 02, 4.419 t per il CER 17 08 02 e 382.931 t per il CER 17 09 04) e ne sono uscite circa 323.678 tonnellate (di cui: 40.675 t per il CER 17 01, 46.924 t per il CER 17 03 02, 10.417 t per il CER 17 08 02 e 225.661 t per il CER 17 09 04). Analizzando nel dettaglio l'origine dei rifiuti importati negli impianti della Lombardia, si nota che questi flussi provengono principalmente dalle regioni confinanti, ovvero Emilia Romagna, Piemonte e Veneto. Riguardo il flusso di rifiuti in uscita dal territorio regionale, le regioni destinatarie sono prevalentemente il Piemonte, l'Emilia-Romagna ed il Veneto: a titolo di esempio, oltre l'87% dei rifiuti da costruzione a base di gesso (CER 17 08 02) in uscita dalla regione è stato conferito in Piemonte, in particolare ad un impianto di recupero della Saint Gobain specializzato nel

trattamento di questa specifica tipologia di rifiuti. Inoltre, i risultati relativi ai flussi in uscita dalla Lombardia hanno evidenziato che il contributo principale deriva dai rifiuti direttamente esportati dai soggetti in regione (circa 83% dell'Export totale) mentre la parte di rifiuti transitati attraverso gli impianti regionali e consegnata a terzi fuori regione è piuttosto ridotta (circa 17% dell'Export totale); ciò implica che, a causa delle esenzioni previste da normativa per i soggetti produttori di rifiuti C&D non pericolosi che non sono obbligati alla presentazione della dichiarazione MUD, il flusso di rifiuti esportati potrebbe essere in realtà sottostimato, e, di conseguenza, anche la produzione totale.

Infine, l'analisi relativa alla movimentazione dei rifiuti all'interno del territorio regionale ha permesso di costruire le "matrici di spostamento" che mettono in relazione la provincia di produzione del rifiuto con quella di destinazione (dove sono ubicati gli impianti di trattamento); tale analisi ha mostrato che, nella maggior parte dei casi, i rifiuti prodotti in una certa provincia vengono gestiti prevalentemente all'interno della medesima provincia; le percentuali risultano variabili tra il 57% e l'88% per i rifiuti misti 17 09 04, con le sole eccezioni delle province di Monza-Brianza e Pavia dove viene trattato rifiuto proveniente principalmente da Milano (59,1% e 47,9% rispettivamente per MB e PV), data la vicinanza al Capoluogo di regione. Le province che hanno ricevuto e gestito i maggiori quantitativi di rifiuti C&D misti risultano Milano (con oltre il 35%), Brescia (per il 21% circa) e Bergamo (per il 13% circa) mentre la restante parte del flusso di rifiuti misti è suddivisa in modo piuttosto omogeneo tra le altre province.

A completamento dell'analisi iniziale, è stato effettuato il confronto con il metodo PRGR per la stima del rifiuto prodotto in regione. I singoli contributi che compaiono nelle equazioni di bilancio variano in modo significativo a seconda delle modalità di estrazione ed elaborazione dei dati MUD ma, in termini di risultato finale, i quantitativi di rifiuto prodotto in regione ottenuti con i due metodi appaiono molto simili per i codici CER esaminati. Infatti, le differenze sulle stime di produzione ottenute con i due metodi sono inferiori al 3% con l'unica eccezione dei rifiuti a base di gesso (CER 17 08 02) per i quali, invece, il metodo PRGR potrebbe sottostimare i quantitativi prodotti del 25%.

Nella successiva fase, la ricerca si è concentrata nell'approfondire i principali aspetti del recupero dei rifiuti C&D secondo le metodologie ad oggi in uso in regione che comprendono: la miscelazione dei rifiuti C&D misti con i flussi minori (cemento, mattoni, mattonelle, rifiuti bituminosi e rifiuti a base di gesso) negli impianti di riciclo per la produzione di aggregati riciclati misti da riutilizzare nel settore stradale (LCA1 – paragrafi 2.3 e 3.1), il recupero dedicato dei rifiuti bituminosi (LCA2 – paragrafi 2.4 e 3.2) mediante tecnologie di riciclo a caldo e a freddo per il confezionamento di nuovi prodotti da impiegare nelle pavimentazioni stradali, e il recupero dedicato dei rifiuti a base di gesso (LCA3 – paragrafi 2.5 e 3.3), finalizzato all'ottenimento di polvere di gesso riciclato da destinare a diverse applicazioni (produzione di nuovi pannelli in cartongesso, cementifici, trattamento dei fanghi da depurazione, agricoltura).

I risultati dell'analisi LCA1 hanno evidenziato che il sistema attuale di gestione dei rifiuti C&D determina carichi aggiuntivi sull'ambiente, in quanto i benefici derivanti dal riciclo e utilizzo degli aggregati misti non riescono a compensare gli impatti indotti dalle altre fasi di gestione e, in particolare, dal trasporto dei rifiuti, qualora non vengano inclusi i benefici associati alla discarica evitata. Sebbene il riciclo dei C&D misti

mostri notevoli vantaggi rispetto allo smaltimento in discarica di tali rifiuti, le prestazioni del sistema attuale risultano comunque limitate per due ragioni principali: da un lato, la mancanza di un mercato solido degli aggregati riciclati in regione, per cui solo una parte degli aggregati prodotti negli impianti viene effettivamente utilizzata nel settore delle costruzioni e, dall'altro, la disponibilità di aggregati riciclati di medio/bassa qualità non idonei ad applicazioni di maggior livello (e.g. calcestruzzi a bassa resistenza, misti cementati, fondazioni sciolte) che garantirebbero maggiori benefici ambientali.

Al contrario, l'analisi LCA2 relativa alla gestione del fresato (CER 17 03 02) ha evidenziato che l'attuale sistema implementato in Lombardia risulta già caratterizzato da buone prestazioni ambientali ed energetiche, grazie al riciclo a caldo del fresato che risulta ad oggi la soluzione tecnologica più diffusa (75%) ed alla quale sono associati i maggiori vantaggi ambientali. Infatti, le opzioni di riciclo a freddo (25%), per la produzione di misti cementati (ancora in fase sperimentale) e di eco-basi (il cui impiego si sta diffondendo in regione), presentano al momento prestazioni ambientali ed energetiche inferiori a causa dell'impiego di additivi chimici (emulsioni bituminose) la cui produzione appare altamente impattante; tuttavia, è doveroso sottolineare che non sono stati utilizzati dati primari per la modellizzazione della produzione degli additivi e che, di conseguenza, il profilo ambientale del riciclo a freddo potrebbe cambiare in modo significativo rispetto a quanto mostrato in questa analisi; tale aspetto meriterebbe quindi un'indagine più approfondita.

Dall'analisi LCA3 è emerso che il trattamento in impianti dedicati dei rifiuti a base di gesso consente di ottenere benefici netti per tutte le categorie di impatto ambientale e per l'impatto energetico ed un risparmio di gesso naturale; infatti, i benefici indotti dal riciclo riescono a compensare completamente tutti gli impatti generati dalle operazioni di riciclo stesse e ancor più dai trasporti; tuttavia, è doveroso sottolineare che il contributo maggiore al *saving* è dovuto all'ingente beneficio derivante dal riciclo della carta separata durante il trattamento dei rifiuti in gesso, più che dall'utilizzo del gesso riciclato in sostituzione della materia prima vergine. Tale soluzione appare quindi molto più vantaggiosa rispetto al recupero del cartongesso in miscelazione con gli altri flussi C&D che, tuttavia, rappresenta, ad oggi, la pratica più diffusa in regione.

Considerando tutte e tre le analisi LCA e quindi l'intero sistema attuale di gestione, dai risultati emerge che tale sistema presenta già buone prestazioni per alcune categorie di impatto come la riduzione dello strato di ozono, l'eutrofizzazione in acqua dolce e l'impatto energetico (CED), che mostrano impatti in segno negativo; questo è da attribuire al recupero del fresato e del cartongesso, i cui benefici riescono a compensare gli impatti in segno positivo associati all'LCA1. Le prestazioni del sistema possono però essere migliorate. In particolare, dalle analisi e dai risultati ottenuti è stato possibile capire quali sono le carenze del sistema attuale, dove è maggiormente efficace agire per migliorarne le prestazioni e su quali aspetti dovrebbe concentrarsi in modo prioritario la pianificazione territoriale. In particolare, si possono formulare le seguenti raccomandazioni:

1. Evitare la miscelazione di rifiuti C&D misti con rifiuti bituminosi (CER 170302) e rifiuti a base di gesso (CER 170802) negli impianti di produzione di aggregati riciclati misti; questo permette di conseguire maggiori benefici ambientali ed energetici, poiché dalle filiere di trattamento specifiche del fresato (LCA2) e dei pannelli di cartongesso (LCA3) si ottengono materie prime secondarie di

qualità maggiore rispetto agli aggregati riciclati prodotti dal trattamento dei rifiuti misti (LCA1), in grado di sostituire l'utilizzo di risorse non rinnovabili come aggregati naturali, bitume vergine e gesso naturale. Oltremodo, limitando tale pratica è possibile migliorare la qualità degli aggregati riciclati da C&D e ampliare i loro possibili destini di impiego.

2. Favorire il mercato degli aggregati riciclati misti, diffondendo la conoscenza tra le imprese stradali, i progettisti e le Direzioni Lavori, circa le reali caratteristiche prestazionali di questi materiali e, in parallelo, cercando di limitare l'utilizzo delle risorse minerali naturali (come il mistone naturale) per quelle applicazioni in cui potrebbero essere utilizzate le materie prime secondarie.
3. Effettuare demolizione selettiva in cantiere, avviando a riciclo rifiuti già ben selezionati e privi di materiali indesiderati come terre, mattoni, mattonelle e ceramiche, consente di ottenere aggregati riciclati misti di maggiore qualità, da poter impiegare in applicazioni più nobili rispetto a quelle diffuse attualmente (costruzione del corpo del rilevato stradale e riempimenti); per incentivare le imprese ad investire nella demolizione selettiva è necessario creare canali di recupero, e quindi un ritorno economico per le aziende, anche per quei materiali che ad oggi vengono miscelati (come già avviene per i metalli ferrosi e non ferrosi).
4. Per migliorare le prestazioni ambientali associate alla gestione dei rifiuti C&D a livello regionale si potrebbe incentivare la creazione di una filiera di recupero specifica anche per il cemento (CER 170101) che, se separato in cantiere e non miscelato ai rifiuti misti, potrebbe essere impiegato nella produzione di calcestruzzi a bassa resistenza andando a sostituire materie prime vergini; se in molte realtà europee questo tipo di recupero è già implementato, in Italia non è ancora diffuso ma rappresenta un'applicazione di nicchia.
5. Incentivare l'utilizzo del gesso riciclato in applicazioni alternative rispetto al solo impiego nei gessi di defecazione, che attualmente rappresenta l'unico destino di utilizzo in regione, in modo da ottenere maggiori benefici ambientali ed energetici e ridurre l'impiego di gesso vergine estratto da cava.

Rimangono alcuni aspetti di interesse che non sono stati affrontati nel corso della presente ricerca e che potrebbero essere oggetto di approfondimenti futuri. In particolare, la ricerca potrebbe essere allargata ai seguenti temi:

- Analisi di dettaglio delle tecniche di riciclo a freddo del fresato, che permettono di recuperare il rifiuto bituminoso anche direttamente in situ durante la manutenzione delle pavimentazioni stradali. In particolare sarebbe interessante capire quale sia la reale composizione degli additivi chimici che sono impiegati nella lavorazione a freddo (ovvero emulsioni bituminose o bitumi schiumati) per aumentarne la lavorabilità e se esistono esperienze sperimentali o già su scala industriale relative all'impiego di additivi chimici meno impattanti a livello ambientale. Inoltre, sarebbe interessante confrontare, in termini di LCA, le diverse tecnologie di produzione dei conglomerati bituminosi (a caldo, a tiepido e a freddo) assumendo, come unità funzionale, una tonnellata di prodotto finito (CB a caldo, CB a tiepido, eco-base o misto cementato ad alta duttilità; ciò permetterebbe anche di

apprezzare i benefici ambientali che derivano dalla diverse percentuali di utilizzo del fresato nelle miscele finali.

- Approfondimento delle tecniche di riciclo a tiepido del fresato (Warm Mix Asphalt), che si stanno diffondendo in diversi paesi Europei in quanto permettono di ridurre le temperature di lavorazione del CB a caldo e di ottenere un conseguente risparmio energetico nel ciclo produttivo, nonché una riduzione delle emissioni in atmosfera del processo e dei fumi prodotti durante la stesa del conglomerato in sito; per confrontare gli impatti ambientali ed energetici di questa tecnica di recupero del fresato a caldo con quella tradizionale analizzata nello scenario SR1 bisognerebbe allargare i confini del sistema LCA includendo anche la fase di stesa del conglomerato bituminoso.
- Analisi del ciclo di vita applicata alla gestione delle terre e rocce da scavo in quanto questi rifiuti vengono prodotti in notevoli quantità; sarebbe quindi interessante capire qual è l'attuale tasso di riciclo di tali rifiuti, quali sono le tecniche di recupero praticate in regione ed i reali destini di utilizzo dei prodotti ottenuti a valle dei trattamenti.

## **Ringraziamenti**

Si ringraziano Regione Lombardia, ARPA Lombardia, ANPAR e ANCE per il supporto tecnico; i responsabili dell'ufficio cave di tutte le province per averci trasmesso i dati statistici dei siti estrattivi; i gestori degli impianti di recupero dei rifiuti e dei siti cave per la disponibilità e la collaborazione nel fornire informazioni e dati utili allo studio; le imprese stradali (Vezzola SPA e Autostrade Centro Padane SPA) contattate ai fini della valutazione degli utilizzi degli aggregati riciclati.

## Bibliografia

- AITEC (Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento). Disponibile su: <http://www.aitecweb.com/>
- AITEC, Relazione annuale (2014). Disponibile su: [http://www.aitecweb.com/Portals/0/pub/Repository/Area%20Economica/Pubblicazioni%20AITEC/Relazione\\_Annuale\\_2014.pdf](http://www.aitecweb.com/Portals/0/pub/Repository/Area%20Economica/Pubblicazioni%20AITEC/Relazione_Annuale_2014.pdf)
- Barbudo A., Galvìn A. P., Agrela F., Ayuso J., Jiménez J. R. (2012) Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste Management* (32): 1229-1235.
- Barbudo A., Agrela F., Ayuso J., Jiménez J. R., Poon C. S. (2012) Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials* (28): 129-138.
- Biganzoli L., Falbo A., Forte F., Grosso M., Rigamonti L. (2015) Mass balance and life cycle assessment of the waste electrical and electronic equipment management system implemented in Lombardia Region (Italy). *Science of the Total Environment* (524-525): 361-375.
- Blengini G., Garbarino E. (2010) Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production* (18):1021- 1030.
- Capitão S.D., Picado-Santos L.G., Martinho F. (2012) Pavement engineering materials: review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials* (36): 1016 - 1024.
- DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali) Report 2010: Uso del Suolo in Regione Lombardia. Disponibile su: [http://www.ersaf.lombardia.it/upload/ersaf/pubblicazioni/1%20dati%20Dusaf%20ed.%202010\\_13383\\_392.pdf](http://www.ersaf.lombardia.it/upload/ersaf/pubblicazioni/1%20dati%20Dusaf%20ed.%202010_13383_392.pdf).
- Eurogypsum, GtoG project LIFE11 ENV/BE/001039 (2013) DA1: Report inventory of current practices. Disponibile su: <http://gypsumtogypsum.org/documents/deliverable-a1-report-on-current-practices.pdf>
- Eurogypsum, GtoG project LIFE11 ENV/BE/001039 (2015) DC2: Report Quality criteria for recycled gypsum; technical and toxicological parameters. Disponibile su: <http://gypsumtogypsum.org/documents/quality-criteria-for-recycled-gypsum-technical-andtoxicological-parameters.pdf>
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). Disponibile su: [www.eapa.org](http://www.eapa.org)

- European Commission, JRC (2010) ILCD Handbook. Disponibile su: [http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page\\_id=86](http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86).
- European Commission, JRC (2011) Recommendation for Life Cycle Impact Assessment in the European context.
- Eurostat 2014. Disponibile su: <http://ec.europa.eu/eurostat>
- Giani M., Dotelli G., Brandini N., Zampori L. (2015) Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resources, Conservation and Recycling* (104): 224-238.
- Holcim, 2017. Disponibile su: <http://www.holcim.it/uploads/IT/> (accesso: marzo 2017)
- Noferini, L. (2016) Performances and durability of asphalt mixtures made with reclaimed asphalt pavement. Università di Bologna. Tesi di Dottorato, XXVII Ciclo, in Ingegneria civile, ambientale e dei materiali.
- Regione Lombardia, Piani Cave Provinciali. Disponibile su: [www.regione.lombardia.it](http://www.regione.lombardia.it).
- Rigamonti L., Falbo A., Grosso M. (2013) Improvement actions in waste management system at the provincial scale based on a life cycle assessment evaluation (GERLA). *Waste Management* (33): 2568-2578.
- 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.
- Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. (2014) Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials* (65): 201-217.
- SITEB – Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade. Disponibile su: [www.siteb.it](http://www.siteb.it)
- Vidal R., Moliner E., Martinez G., Rubio M. (2013) Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling* (74): 101-114.