

# ANALISI LCA A SUPPORTO DELLA PIANIFICAZIONE DELLA GESTIONE DEI RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE NON PERICOLOSI IN LOMBARDIA

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

<sup>1</sup> Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Milano.

<sup>2</sup> Centro Studi MatER c/o L.E.A.P. (Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza), Piacenza.

**Sommario** – I rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) sono stati identificati dalla Commissione Europea come un flusso di rifiuti prioritario, in ragione degli ingenti volumi che vengono annualmente prodotti e delle potenzialità di recupero di tali rifiuti, essendo costituiti prevalentemente da minerali inerti (cemento, mattoni e mattonelle, terre da scavo, fresato). Infatti, attraverso opportuni processi di valorizzazione, è possibile trasformare i rifiuti C&D in materie prime secondarie per l'edilizia e re-inserirli nel mercato, in totale o parziale sostituzione dei materiali vergini comunemente impiegati. Il riciclo dei C&D e l'utilizzo degli aggregati riciclati (AR) offrono dunque una possibilità concreta di raggiungere gli obiettivi dell'economia circolare, in cui il rifiuto diviene una nuova risorsa, permettendo al tempo stesso di minimizzare le quantità di rifiuti smaltiti in discarica, di risparmiare risorse minerali naturali non rinnovabili e di ridurre gli impatti ambientali connessi alla gestione dei rifiuti e all'attività estrattiva. Il presente lavoro di ricerca nasce da una collaborazione tra Regione Lombardia, il Laboratorio Energia Ambiente di Piacenza (LEAP) attraverso il Centro Studi MatER e il gruppo di ricerca AWARE (Assessment on WASTE and RESOURCES) del Politecnico di Milano e si pone come obiettivo la valutazione del sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi implementato in Regione tramite la metodologia dell'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA), nonché l'identificazione dei principali aspetti critici del sistema e delle possibili azioni di intervento che possono essere intraprese per il miglioramento delle sue prestazioni ambientali.

**Parole chiave:** Life Cycle Assessment (LCA), rifiuti inerti, aggregati riciclati, impatti ambientali.

## LIFE CYCLE ASSESSMENT AS A SUPPORTING TOOL FOR THE PLANNING OF THE INERT CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE MANAGEMENT IN LOMBARDY REGION

**Abstract** – Construction and demolition waste (CDW) has been identified as a priority waste stream by the European Union due to its significant generation level and its high recycling potential. Most of CDW, in fact, is a mineral inert waste that can be valorized, after proper treatments, and be reused in the construction sector as secondary materials (i.e. recycled aggregates (RA)), in total or partial substitution of mineral natural resources. Hence, encouraging CDW recycling and the

use of RA allow to reduce waste landfilling, to save non-renewable virgin materials and to minimize negative environmental impacts associated with the construction sector and waste management. The present research was based on a collaboration among the local government of Lombardy Region (Italy), the Energy and Environment Laboratory (LEAP) in Piacenza (Italy) through the MatER research center and the AWARE (Assessment on WASTE and RESOURCES) research group of Politecnico di Milano. It consists in the application of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to evaluate the environmental performance of the current regional management of CDW and to identify critical aspects and possible improving actions.

**Keywords:** Life Cycle Assessment (LCA), inert waste, recycled aggregates, environmental impacts.

Ricevuto il 22-6-2017. Correzioni richieste il 29-8-2017. Accettazione il 19-9-2017.

## 1. INTRODUZIONE

I rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) rappresentano uno dei flussi più ingenti prodotti nell'Unione Europea, pari al 34,8% del quantitativo totale di rifiuti prodotti in Europa nel 2014 (dati Eurostat). A questa categoria appartengono diverse tipologie di materiali come calcestruzzo, gesso, legno, vetro, metalli, plastica, mattoni, solventi, materiali isolanti, amianto e terre da scavo. I C&D sono rifiuti speciali individuati nel Catalogo Europeo dei Rifiuti (Decisione della Commissione 2000/532/CE) con il codice del Capitolo 17.

Dato l'elevato tasso di produzione dei C&D non pericolosi in Europa ed il loro notevole potenziale di riuso e riciclo, la Direttiva Quadro sui rifiuti (2008/98/CE) ha imposto che "entro il 2020 la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali, di rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi, escluso il materiale allo stato naturale definito alla voce 17 05 04 dell'elenco dei rifiuti, deve essere aumentata almeno al 70% in termini di peso". Questo perché, attraverso l'implementazione di una corretta gestione dei

\* Via Golgi 39, 20133 Milano (Italia). Tel. 02.23994216.  
E-mail: giulia2.borghi@mail.polimi.it.

C&D e opportuni processi di valorizzazione è possibile trasformare questi rifiuti in materie prime secondarie per l'edilizia e re-inserirli nel mercato contribuendo, in tal modo, a chiudere il ciclo delle risorse minerali naturali. Gli aggregati riciclati (AR), infatti, se in possesso delle caratteristiche tecniche e prestazionali idonee per la destinazione d'uso prevista (costruzioni stradali, sottofondi industriali/aeroportuali, colmatazioni, reinterri, produzione di calcestruzzi) possono essere impiegati in sostituzione parziale o totale dei materiali vergini abitualmente utilizzati. Il riciclo e l'utilizzo delle materie secondarie nel settore delle costruzioni offrono dunque una possibilità concreta di raggiungere gli obiettivi dell'economia circolare, in cui il rifiuto diviene nuova risorsa, permettendo al tempo stesso la minimizzazione delle quantità di rifiuti smaltite in discarica, il risparmio di risorse minerali naturali e la riduzione degli impatti ambientali connessi all'attività estrattiva nonché alla gestione dei rifiuti.

Per questo motivo, l'interesse delle pubbliche amministrazioni verso l'implementazione di una gestione sostenibile dei rifiuti C&D è cresciuto negli ultimi anni; in quest'ottica rientra il presente progetto di ricerca, commissionato dalla Regione Lombardia, che si pone come obiettivo la valutazione ambientale del sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi a livello regionale tramite la metodologia dell'analisi del ciclo di vita (LCA) e l'identificazione di strategie di pianificazione che possano migliorarne le prestazioni. In dettaglio, la ricerca è finalizzata al raggiungimento dei seguenti obiettivi: *i*) quantificazione dei rifiuti C&D prodotti alla scala regionale ed il rispettivo livello di riciclo attualmente raggiunto; *ii*) indagine degli aspetti inerenti il riciclo dei C&D, per comprendere quali sono le modalità di lavorazione, il livello delle tecnologie adottate e la tipologia di AR attualmente prodotti, con focus sulla qualità e l'effettivo utilizzo di tali materiali; *iii*) valutazione della tipologia e dei quantitativi di risorsa minerale naturale che può essere risparmiata utilizzando gli AR a seconda degli specifici utilizzi; *iv*) valutazione degli impatti ambientali associati all'attuale sistema di gestione dei rifiuti C&D tramite l'analisi del ciclo di vita; *v*) individuazione ed analisi di scenari alternativi di gestione per l'identificazione di possibili misure atte a garantire il miglioramento delle prestazioni ambientali ed energetiche del sistema. In particolare, il focus di questo studio è il rifiuto C&D non pericoloso trattato in impianti di riciclo per la produzione di AR misti, in quanto questi rap-

presentano la tipologia di aggregati maggiormente prodotta a livello nazionale e regionale (ANPAR, 2007). In Italia, infatti, essendo ancora poco diffuse le pratiche di demolizione selettiva in cantiere, il rifiuto C&D conferito in maggiore quantità agli impianti di recupero è quello misto (CER 17 09 04), che viene trattato in miscelazione agli altri flussi minori, come le miscele bituminose (CER 17 03 02), i rifiuti a base gesso (CER 17 08 02) e i rifiuti contenenti cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche (CER 17 01) per produrre AR misti (ANPAR, 2007). Con l'aiuto delle amministrazioni locali (Regione, Province e ARPA Lombardia), attraverso indagini dirette agli impianti di trattamento dei rifiuti e dei siti estrattivi delle materie prime vergini e coinvolgendo anche alcune imprese che utilizzano AR misti nel settore delle costruzioni, è stato possibile reperire le informazioni e i dati primari necessari per creare un set di dati di inventario specifici per il contesto territoriale in esame, da utilizzare per la successiva fase di analisi di LCA. Dai risultati si ottiene una fotografia delle prestazioni attuali del sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi in Lombardia da cui è possibile evidenziare sia quali sono i benefici ambientali che comportano le azioni di recupero attualmente implementate sia quali sono le carenze del sistema, per comprendere dove e come è più opportuno agire per rendere il sistema ambientalmente più sostenibile.

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1 Descrizione del contesto analizzato

In Italia nel 2014, anno di riferimento dell'analisi LCA, sono state prodotte circa 51 milioni di tonnellate di rifiuti C&D (dati ISPRA 2016), di cui il 98,7% costituito da rifiuti non pericolosi. La Lombardia è la regione italiana che produce la maggiore quantità di rifiuti C&D: nel 2014 ne sono state prodotte circa 12 milioni di tonnellate che corrispondono al 23,4% dell'intera produzione nazionale. Significativo è anche il tasso di produzione di rifiuti C&D pro capite lombardo, pari a circa 1.212 kg/ab, che, se confrontato con la media nazionale di circa 850 kg/ab, evidenzia il fatto che questo settore è molto più attivo in Lombardia rispetto ad altre regioni.

Bisogna sottolineare che in Italia i dati ufficiali di produzione dei rifiuti C&D provengono dalle elaborazioni delle banche dati MUD (Modello Unico di Dichiarazione Ambientale), contenenti le dichiarazioni che sono annualmente presentate alla

camera di commercio da parte dei produttori di rifiuti e dei diversi soggetti coinvolti nella gestione dei rifiuti. A differenza di quanto accade per altre tipologie di rifiuti, come i rifiuti urbani o i rifiuti pericolosi, i dati di produzione relativi ai C&D non pericolosi derivano quindi da stime e non sono rilevati direttamente alla fonte, a causa delle esenzioni previste dalla normativa italiana. Infatti, mentre tutti i produttori di rifiuti speciali pericolosi sono tenuti annualmente alla presentazione del MUD, non tutti i produttori di rifiuti speciali non pericolosi sono obbligati a presentare la dichiarazione ambientale: tale esenzione riguarda le aziende produttrici di rifiuti C&D non pericolosi con meno di 10 dipendenti (Decreto del Presidente del Consiglio del 27/12/2014). Questo rende la stima della produzione totale di C&D abbastanza complessa, per via dell'impossibilità di tracciare direttamente i flussi prodotti dato che in Italia i produttori di C&D sono essenzialmente proprio rappresentati da aziende medio-piccole. Per tale ragione, il dato basato sulle dichiarazioni dei soli produttori obbligati è estremamente sottostimato e del tutto irrealistico. Per ovviare a questo problema, poiché sono obbligati alla presentazione del MUD tutti gli impianti che gestiscono rifiuti, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) quantifica la produzione a ritroso, cioè sulla base dei quantitativi di rifiuti gestiti nei diversi impianti di trattamento e smaltimento. I dati elaborati da ISPRA si basano sulle stime effettuate dalle singole ARPA regionali: tuttavia, poiché le indicazioni fornite da ISPRA sono di carattere generale e non specificano il dettaglio delle operazioni di gestione da escludere dal computo (soprattutto in relazione alle operazioni intermedie di gestione, ovvero la messa in riserva R13 e il deposito preliminare dei rifiuti D15<sup>1</sup>), le modalità con cui sono effettuate tali stime possono variare da regione a regione. Questa disomogeneità nelle metodologie di calcolo delle quantità di rifiuti C&D prodotti rende le stime non sempre confrontabili e può sfociare in incongruenze anche significative a livello nazionale.

Per il presente lavoro di ricerca, la stima dei flussi di rifiuti C&D non pericolosi prodotti e gestiti in regione è stata effettuata direttamente dal gruppo di ricerca AWARE del Politecnico di Milano.

<sup>1</sup> Come riportato nell'Allegato B del D. lgs 205/2010 l'operazione R13 rappresenta la messa in riserva dei rifiuti preliminari al recupero, mentre l'operazione D15 è il deposito preliminare allo smaltimento.

Tabella 1 – *Quantità di rifiuti C&D gestiti nel sistema impiantistico regionale nel 2014*

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
Totale	6.999.986	420.365	6.352.361	227.259

L'elaborazione si è basata sui dati contenuti nelle dichiarazioni MUD degli impianti che hanno trattato nel 2014 i codici CER in esame (17 01, 17 03 02, 17 08 02 e 17 09 04), che sono stati classificati in quattro categorie: impianti di stoccaggio (operazione R13 o giacenza a recupero), impianti di recupero (tutte le operazioni R diverse da R13), impianti di discarica (operazione D1) e impianti di altro smaltimento (tutte le altre operazioni D); in un secondo momento i flussi conferiti ad "altro smaltimento" sono stati uniti allo smaltimento in discarica creando un unico flusso, essendo il deposito temporaneo (D15) prima dell'invio a discarica l'operazione prevalente. Siccome l'ambito di applicazione dell'analisi LCA è il contesto regionale, sono stati quantificati sia i rifiuti prodotti fuori regione e importati sia quelli prodotti in regione e in seguito esportati, al fine di eliminarli dal computo complessivo dei flussi e determinare l'effettivo quantitativo prodotto e gestito in Lombardia. In Tabella 1 sono riportate le stime relative alla quantità di rifiuti gestiti in regione, suddivisi per singoli codici CER considerati e per tipologia di trattamento; il gestito è il risultato di un bilancio di massa tra i flussi entranti ad ogni categoria di impianto ed i flussi uscenti. Nel 2014 sono state gestite circa 7 Mt di rifiuti C&D non pericolosi trattati in impianti per la produzione di ARMISTI ed il rifiuto misto (17 09 04) è il flusso principale, in quanto rappresenta circa l'80% del totale gestito. In particolare, i rifiuti misti denominati con il codice CER 17 09 04 sono un miscuglio di rifiuti C&D non pericolosi, cioè un insieme di rifiuti appartenenti alle diverse categorie CER dei C&D non pericolosi; dalle visite tecniche effettuate presso alcuni impianti di recupero della regione il rifiuto misto risulta essere composto prevalentemente da cemento armato, terre, mattoni, mattonelle e ceramiche. I C&D in esame sono stati inviati principalmente ad impianti di riciclo (90,7%) e solo una piccola parte (3,3%) è stato smaltito in discarica.

## 2.2. La valutazione LCA

### 2.2.1. Scopo ed obiettivi

Come già introdotto precedentemente, l'analisi LCA è stata effettuata con l'obiettivo di valutare le prestazioni ambientali del sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi in Regione Lombardia. L'unità funzionale adottata è rappresentata dalla gestione di una tonnellata di miscela di rifiuto C&D non pericoloso gestito in Regione, dal cui trattamento di recupero vengono prodotti AR misti. La composizione della miscela è calcolata rispetto ai quantitativi gestiti mostrati in Tabella 1 e risulta la seguente:

- 10,9% di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche (17 01);
- 8,4% di miscele bituminose non pericolose (17 03 02);
- 0,3% di rifiuti a base di gesso (17 08 02);
- 80,4% di rifiuti misti da attività di costruzione e demolizione (17 09 04).

Oltre a quantificare i rifiuti avviati alle diverse modalità di trattamento, è stato necessario anche ricostruire come si ripartiscono i flussi all'interno del sistema impiantistico regionale. Tali flussi comprendono sia i flussi diretti (ovvero i rifiuti direttamente conferiti agli impianti dai produttori iniziali) sia quelli secondari, derivanti cioè dalle operazioni intermedie di gestione (ovvero i rifiuti che escono da un impianto per essere avviati ad un impianto di trattamento successivo), associati a ciascuna tipologia di impianto. Il risultato delle elaborazioni è riportato in Figura 1, 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.

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, come si può vedere dalla Tabella 1) sono state ripartite tra recupero e smaltimento; questo perché lo stoccaggio rappresenta un'operazione temporanea, infatti il rifiuto può stazionare al massimo un anno prima di essere inviato a recupero o smaltimento (D.lgs 152/2006), 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 stoccaggio 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).

I confini del sistema includono tutti i processi di trattamento da quando i rifiuti entrano nel sistema di gestione fino alla loro fuoriuscita dal sistema come emissione (solida, liquida o gassosa) o come materia prima secondaria, mentre sono esclusi gli impatti associati alla produzione dei rifiuti. Per risolvere i casi di multi-funzionalità (il sistema ha come funzione principale la gestione dei rifiuti ma nello stesso tempo produce nuovi materiali utili) l'approccio utilizzato consiste nell'espansione dei confini del sistema, per cui sono state incluse nell'analisi LCA anche le produzioni di materie prime evitate grazie al recupero e all'utilizzo delle risorse secondarie. I processi inclusi nei confini del sistema sono quindi:

- lo stoccaggio (operazione R13) e i consumi associati alla movimentazione interna dei rifiuti;
- il recupero di materia in impianti di riciclo (operazione R5) per la produzione di AR; contestualmente viene considerato anche il quantitativo di

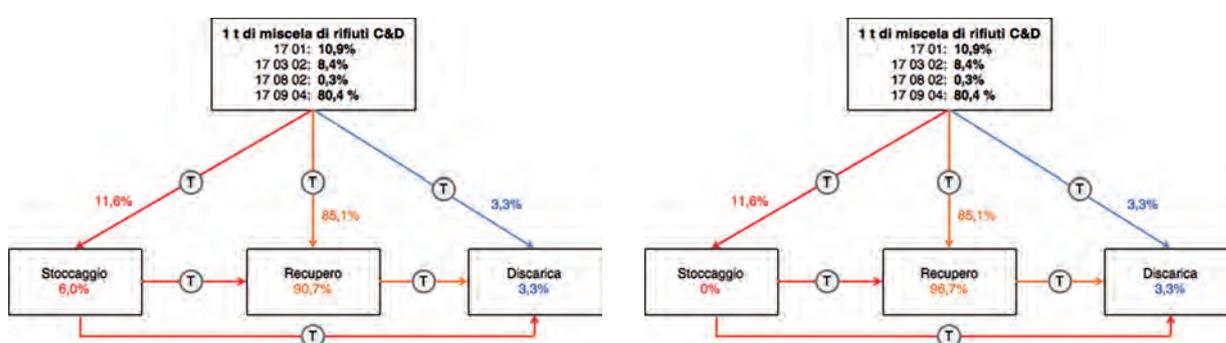


Figura 1 – Gestione di una tonnellata di miscela di rifiuti C&D inerte non pericoloso in Regione Lombardia nel 2014: sulla sinistra è riportato il bilancio di massa che emerge dalle elaborazioni delle dichiarazioni MUD, mentre a destra il bilancio tiene conto della ripartizione del rifiuto stoccato tra recupero e discarica (sistema di riferimento per l'analisi LCA). Il simbolo "T" sulle frecce indica il trasporto dei rifiuti

metalli ferrosi separati e inviati alla rispettiva filiera di recupero;

- lo smaltimento in discarica dei rifiuti C&D e dei residui del trattamento non recuperabili;
- 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.

L'analisi LCA è stata effettuata utilizzando il software SimaPro 8.3 ed il database ecoinvent 3.3 (modello *allocation, recycling content*), combinando due diversi metodi di caratterizzazione presenti di default all'interno del software e un indicatore costruito *ad hoc* per la presente analisi, di seguito presentati:

- Il metodo ILCD 2011 Midpoint (EC, JRC, 2011) per la valutazione degli impatti ambientali; le categorie di impatto considerate nell'analisi sono il cambiamento climatico, la riduzione dello strato d'ozono, la tossicità per l'uomo (effetti cancerogeni e non cancerogeni), l'assunzione di materiale particolato, la formazione fotochimica di ozono, l'acidificazione, l'eutrofizzazione terrestre, l'eutrofizzazione in acqua dolce, l'eutrofizzazione marina, l'ecotossicità in acqua dolce, l'impoverimento delle risorse idriche e l'impoverimento delle risorse minerali e fossili.
- Il metodo CED (Cumulative Energy Demand, Frischknecht et al., 2007) per la valutazione degli impatti energetici legati al sistema di gestione, che si focalizza sull'analisi dell'impiego di risorse energetiche.
- L'indicatore costruito *ad hoc* che permette di stimare il consumo di risorsa minerale naturale (non rinnovabile), espresso in kg di sabbia e ghiaia consumati o risparmiati per tonnellata di rifiuto C&D gestito in regione, in quanto ritenuto particolarmente significativo per il sistema in esame. I valori di questo indicatore sono stati ottenuti attraverso l'analisi di inventario disponibile nei risultati del software SimaPro; infatti, i flussi di sabbia e ghiaia 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.

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 AR (imprese edili e stradali). I relativi metodi di raccolta ed elaborazione saranno approfonditi nei paragrafi successivi. 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) per 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 Biganzoli et al., (2015) dove è stato analizzato il recupero dei metalli dai RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) in Regione Lombardia.

#### 2.2.2. Analisi di inventario: riciclo dei rifiuti C&D

Negli impianti che trattano rifiuti inerti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione, i rifiuti conferiti vengono sottoposti ad una serie di processi fisici e meccanici di selezione, macinazione e vagliatura da cui si producono AR di diverse classi dimensionali. Dall'indagine condotta, a livello regionale gli impianti di riciclo dei C&D sono di due tipologie: impianti fissi alimentati ad energia elettrica ed impianti mobili, su mezzi cingolati, con motori a gasolio. Gli impianti alimentati a gasolio presentano un layout più semplice rispetto a quelli alimentati ad energia elettrica (solo separazione di metalli ferrosi e riduzione volumetrica delle macerie) e solitamente producono AR in frazione unica (generalmente in classi 0/80 o 0/60); l'eliminazione dei materiali indesiderati è generalmente effettuata tramite cernita manuale. Gli impianti alimentati ad energia elettrica presentano di solito una configurazione più articolata, che include la frantumazione del materiale, l'eliminazione delle frazioni leggere indesiderate (carta, plastica, legno) tramite dispositivi come i classificatori ad aria, l'eliminazione dei metalli tramite deferrizzatori e una vagliatura finale del prodotto nelle diverse classi granulometriche. La lavorazione in

questi impianti permette in genere di ottenere AR di medio/alta qualità.

Per l'accettazione in cantiere ed il successivo impiego degli AR è necessario che essi rispettino specifici requisiti tecnici e ambientali (contenuti negli allegati C della Circolare Ministeriale n. 5205/2005 e nel DM del 5/2/1998) e siano idonei all'utilizzo previsto, siano cioè marcati CE, secondo le norme UNI di riferimento. In particolare, all'interno degli allegati C della Circolare Ministeriale n. 5205/2005 sono riportati tutti i parametri da determinare, la modalità di prova a cui sottoporre i campioni ed il limite imposto per le diverse caratteristiche dei materiali: i limiti sono più o meno stringenti a seconda dell'uso previsto e delle caratteristiche prestazionali che devono raggiungere gli AR.

Riferendosi a quanto indicato nella normativa vigente, è possibile classificare gli AR misti in tre categorie:

- AR di alta qualità conformi alla norma armonizzata UNI EN 12620 e all'allegato C3 della Circolare n. 5205/2005 rispettivamente per il confezionamento di calcestruzzi non strutturali e la realizzazione di strati di fondazione;
- AR di media qualità conformi agli allegati C1 e C2 della Circolare n. 5205/2005 per la realizzazione del corpo del rilevato di opere in terra dell'ingegneria civile e dei sottofondi stradali, ferroviari, aeroportuali e di piazzali civili e industriali;
- AR di bassa qualità, conformi all'allegato C4 della Circolare n. 5205/2005 per la realizzazione di recuperi ambientali, riempimenti e colmate.

L'esperienza dimostra che la natura e le caratteristiche del rifiuto in ingresso agli impianti di recupero dei C&D influenzano in modo significativo le caratteristiche prestazionali degli AR prodotti a valle del trattamento; quindi, per ottenere AR di buona qualità che possano essere più appetibili sul mercato bisogna cercare di migliorare le caratteristiche del rifiuto C&D tramite tecniche di demolizione selettiva in cantiere.

Il dataset sito-specifico inerente le operazioni di riciclo dei rifiuti C&D è stato creato tramite visite tecniche presso 9 impianti di trattamento, i maggiori della regione, che insieme hanno trattato circa il 20% del rifiuto inerte gestito complessivamente nel 2014: tali impianti comprendono due impianti alimentati ad energia elettrica e 7 impianti alimentati a gasolio.

Dai dati raccolti emerge che la tecnologia di trattamento più diffusa sul territorio regionale è rappresentata dagli impianti alimentati a gasolio, dove viene conferito l'86,1% dei rifiuti, mentre la restante

parte è inviata presso impianti alimentati ad energia elettrica. Tutti gli AR misti prodotti dagli impianti visitati sono marcati CE e risultano conformi agli allegati C della Circolare Ministeriale n. 5205/2005; il bilancio di massa complessivo del sistema di recupero dei C&D con i rispettivi consumi associati al trattamento sono riportati in Figura 2. Sia gli impianti alimentati ad energia elettrica che quelli alimentati a gasolio presentano efficienze di trattamento elevate (rapporto tra AR misti prodotti e rifiuto C&D conferito), maggiori del 99%. Gli AR prodotti risultano però prevalentemente di medio-basso livello, conformi all'utilizzo nella costruzione dei corpi del rilevato (Allegato C1), nella realizzazione di sottofondi stradali o di piazzali (Allegato C2) e in ripristini ambientali, come i riempimenti (Allegato C4); utilizzi più nobili per gli AR, che comprendono l'uso in strati di fondazione o nel confezionamento di calcestruzzi a bassa resistenza, risultano ad oggi quasi del tutto assenti sul territorio regionale. Il fatto che gli AR ottenuti dal trattamento dei C&D siano impiegati prevalentemente nella costruzione del corpo del rilevato, dei sottofondi e in ripristini ambientali è dovuto a due aspetti: il primo è legato alla qualità degli aggregati, che potrebbe non consentirne l'utilizzo in applicazioni che impongono limiti più restrittivi sulle proprietà tecniche; il secondo aspetto riguarda le caratteristiche locali del mercato e della domanda di AR, in quanto, in mancanza di un mercato solido, i gestori degli impianti non sono incentivati ad incrementare l'intensità della lavorazione se non è certo il ritorno economico derivante dalla vendita dei materiali e quindi tendono a produrre aggregati in frazione unica che hanno mercato e utilizzi più limitati.

Oltre agli AR, negli impianti di recupero C&D vengono prodotti anche altri flussi di rifiuti e scarti della lavorazione, le cui percentuali di produzione sono riportate nel bilancio di massa dello schema in Figura 2, ed aventi diversi destini finali.

I metalli ferrosi (0,13%), 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 di selezione ed in seguito all'acciaieria per la produzione di acciaio secondario.

Il legno, la plastica ed altri rifiuti recuperabili misti (ad esempio pezzi di tappezzeria, gomma e cavi) sono separati dalle macerie 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. Nell'attuale LCA i destini di questi flussi non sono stati modellizzati, in quanto dalle schede MUD non è possibile conoscere con preciso quale sia il loro destino all'interno della filiera di recupero; inoltre, rappresentano meno dello 0,3% del rifiuto trattato; infine, dal punto di vista metodologico, si è ritenuto più corretto escluderli in quanto questi materiali sono presenti impropriamente nelle macerie inviate a riciclo (dovrebbero infatti essere separate direttamente in cantiere).

Gli scarti del trattamento (non recuperabili) (0,17%) sono smaltiti in discariche per inerti.

### 2.2.3. Analisi di inventario: prodotti evitati

Uno dei vantaggi dell'utilizzo di AR nel settore delle costruzioni è il risparmio di risorse naturali non rinnovabili, ovvero di aggregati naturali prodotti dalla lavorazione di sabbia e ghiaia estratta da cave.

L'attività di produzione degli aggregati naturali si svolge in due fasi distinte: l'estrazione del materiale (mistone) dai giacimenti e la successiva lavorazione in impianti per la produzione di diverse tipologie di aggregato richieste dal mercato. La lavorazione si compone solitamente da una linea di vagliatura e trattamento per la produzione delle varie granulometrie tondeggianti (utilizzate prevalentemente nella produzione di calcestruzzi) e da una linea parallela di triturazione e vagliatura delle frazioni più grossolane per la produzione dei cosiddetti "spaccati" (impiegati prevalentemente nella produzione di conglomerati bituminosi). Inoltre le sabbie sono di solito sottoposte a cicli di lavaggio e ciclonatura con l'obiettivo di separare le sostanze ultrafini e limose ( $d < 0,065$  mm) che attecchiscono sulla sua superficie e che interferiscono con le lavorazioni successive.

In Lombardia il settore estrattivo risulta molto sviluppato, sia perché strettamente correlato al settore delle costruzioni ed in particolare alla produzione di cemento, attività ben consolidate a livello regionale, sia perché la litologia del territorio ben si presta all'estrazione di sabbia e ghiaia; nel 2015 sono stati estratti circa 19,5 milioni di m<sup>3</sup> di sabbia e ghiaia, pari a circa il 14% del totale di sabbia e ghiaia estratte a livello nazionale (Rapporto Cave di LegaAmbiente, 2017).

Per effettuare la modellizzazione del processo di produzione dell'aggregato naturale, attraverso la quale quantificare gli impatti ambientali evitati grazie all'utilizzo degli AR, sono stati analizzati i documenti statistici provinciali, detti Statistiche Ca-

ve, inerenti l'attività di estrazione di sabbia e ghiaia nel 2014. Ogni cava, infatti, ha l'obbligo di presentare annualmente questa dichiarazione alla provincia di riferimento, comunicando informazioni inerenti la quantità di materiale estratto, i consumi di combustibili ed energia elettrica, il materiale commercializzato ed i rispettivi destini. Per comprendere appieno cosa rappresentano, come interpretare e come utilizzare i dati presenti nelle Statistiche Cave, è stato utile anche effettuare dei sopralluoghi tecnici presso alcuni siti estrattivi della regione, in cui sono presenti anche gli impianti di lavorazione della materia prima vergine.

In totale, i dati raccolti dalle statistiche cave si riferiscono a 198 siti estrattivi: 22 siti hanno effettuato nel 2014 solo estrazione di mistone naturale, senza quindi sottoporre il materiale alla successiva fase di lavorazione, mentre i restanti 176 hanno prodotto aggregati naturali, effettuando attività di estrazione e lavorazione del materiale vergine in sito. In Tabella 2 sono riassunti i risultati dell'elaborazione, ovvero i consumi specifici associati alla produzione di mistone e di aggregati naturali nel 2014 a livello regionale ed i rispettivi intervalli di variazione. I consumi specifici sono riferiti alle tonnellate di materiale vergine complessivamente commercializzato (e non al cavato), in quanto gli AR impiegati nel settore delle costruzioni vanno a sostituire l'aggregato naturale immesso nel mercato nell'anno di riferimento.

In seguito, per comprendere quali sono le materie prime vergini sostituite dagli AR nel settore delle costruzioni civili e stradali e quali sono le prestazioni degli AR in confronto con quelli naturali, tramite ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili) sono state contattate alcune imprese stradali che utilizzano materiali riciclati nei loro cantieri e sono stati consultati Capitolati Speciali d'Appalto di grandi imprese di costruzioni. Dalle ricerche è

*Tabella 2 – Dati di inventario per la produzione di mistone naturale e di aggregati naturali in Regione Lombardia nel 2014; i consumi specifici sono espressi per tonnellata di mistone/aggregato commercializzato*

<b>Estrazione mistone naturale</b>	<b>Valore assunto</b>	<b>Intervallo di variazione</b>
Consumo gasolio (l/t)	0,39	0,3-1,16
<b>Produzione aggregati naturali</b>	<b>Valore assunto</b>	<b>Intervallo di variazione</b>
Consumo energia elettrica (kWh/t)	1,83	0,64-8,38
Consumo gasolio (l/t)	0,46	0,16-1,52
Consumo acqua (l/t)	0,46	0,018-0,90

emerso che, per la costruzione del corpo del rilevato, dei sottofondi e per i riempimenti la materia prima vergine utilizzata è il mistone naturale (non lavorato), mentre gli aggregati naturali sono impiegati per il confezionamento di calcestruzzo e per gli strati di fondazione. Siccome negli impianti di riciclo visitati gli AR prodotti risultano conformi ai soli allegati C1 (realizzazione del corpo del rilevato), C2 (realizzazione di sottofondi stradali) e C4 (ripristini ambientali) della Circolare Ministeriale n. 5205/2005, la materia prima vergine che essi vanno a sostituire è il mistone naturale; per questo motivo, come mostrato nel bilancio di massa in Figura 2, la produzione degli AR consente di risparmiare solamente i consumi di gasolio associati alla sola fase di estrazione di mistone vergine.

Per calcolare il quantitativo di mistone naturale sostituito dagli AR è stato introdotto un rapporto di sostituzione (S) tra AR e mistone naturale. Questo è stato stimato prendendo in considerazione la qualità e le prestazioni tecniche, ma anche il mercato degli AR, applicando il metodo presentato da Rigamonti et al. (2017):

$$S = Q_1 \cdot Q_2 \cdot M$$

$Q_1$  rappresenta le caratteristiche qualitative dell'AR intese come presenza di impurezze: terra, legno, plastiche etc. riducono il grado di qualità dell'aggregato e comportano quindi un valore di  $Q_1$  minore di 1. Il coefficiente  $Q_1$  è stato stimato grazie alle informazioni ricevute dai gestori degli impianti durante i sopralluoghi: solo due impianti hanno dichiarato di ricevere un rifiuto contenente molta terra e/o mattonelle e ceramiche, per i quali il valore di  $Q_1$  è stato ridotto da 1 a 0,9, valore ipotizzato tenendo conto del fatto che gli AR devono rispettare comunque i limiti imposti dagli Allegati C1/C2 della Circolare Ministeriale n. 5205/2005 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 AR prodotta è risultato un valore complessivo di 0,97, assunto rappresentativo per il contesto regionale (per approfondimento si rimanda alla Tabella S1 contenuta nel materiale supplementare).

Il coefficiente  $Q_2$  tiene conto delle prestazioni tecniche del materiale riciclato riferite all'uso specifico a confronto con quelle del mistone naturale. In particolare, quando gli AR sono impiegati per la costruzione del corpo del rilevato e nei sottofondi,  $Q_2$  è assunto pari a 1 in quanto, come confermato da alcune imprese stradali, le prestazioni tecniche dei

materiali riciclati sono del tutto confrontabili con quelle del rispettivo materiale vergine (mistone) in termini di resistenza meccanica raggiunta dallo strato finito. Quando invece gli AR sono utilizzati in ripristini ambientali (come i riempimenti),  $Q_2$  è determinato come rapporto tra la massa volumica media del mistone naturale (2 t/m<sup>3</sup>, fonte Statistiche Cave provinciali e visite tecniche) e quella degli AR (2,255 t/m<sup>3</sup>, fonte ANPAR). Il coefficiente M tiene conto dell'esistenza di un mercato ed è stimato come rapporto tra la quantità di AR venduta e quella prodotta dall'impianto. Questo parametro è stato introdotto per tener conto di quelle situazioni in cui il mercato degli AR diventa il fattore limitante, per cui anche se il materiale riciclato è di buona qualità e potrebbe essere utilizzato al posto di quello naturale, rimane invenduto a causa dell'assenza o di una limitata domanda sul territorio. Sono diversi i fattori che ad oggi ostacolano un uso diffuso degli AR, come la diffidenza delle imprese di costruzioni nei confronti dei materiali riciclati a causa della loro origine dai rifiuti, una scarsa conoscenza delle reali caratteristiche prestazionali dei riciclati da parte degli addetti ai lavori, ma anche il basso costo e l'ampia disponibilità sul territorio di materiali naturali vergini. Il coefficiente M è stato stimato per ogni impianto di riciclo visitato sulla base delle informazioni ricevute dai gestori ed in seguito pesato sulla quantità di AR prodotta da ciascun impianto per ottenere un valore rappresentativo del contesto regionale (per approfondimento si rimanda alla Tabella S1 contenuta nel materiale supplementare). È necessario evidenziare che la domanda di mercato per gli AR varia molto sul territorio a seconda del periodo e della zona considerati. Si evidenziano due casi limite: il caso in cui l'impianto riesce a vendere interamente gli aggregati riciclati prodotti (M=1) ed il caso in cui gli aggregati riciclati prodotti risultano totalmente invenduti (M=0). In Tabella 3 sono riportati i rapporti di sostituzione stimati per le due differenti applicazioni degli

**Tabella 3 – Rapporto di sostituzione tra aggregati riciclati e mistone naturale e rispettivo intervallo di variazione per l'utilizzo nella costruzione di corpi di rilevati, sottofondi e in ripristini ambientali**

Utilizzo aggregato riciclato	$Q_1$	$Q_2$	M	S
Corpo del rilevato e sottofondi	0,97	1	0,67	0,65 (0-0,97)
Ripristini ambientali (riempimenti)	0,97	0,89	0,67	0,58 (0-0,86)

AR nel settore delle costruzioni ed i rispettivi intervalli di variazione. Facendo riferimento al bilancio mostrato in Figura 2, è possibile concludere che 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 AR prodotti dagli 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).

#### 2.2.4. Analisi di inventario: i trasporti

Il conferimento dei rifiuti C&D ai rispettivi impianti di trattamento comprende sia i flussi diretti

(distanza tra produttore ed impianto) sia i flussi secondari (distanza tra gli impianti). La distanza media per entrambi i flussi è stata calcolata analizzando i MUD degli impianti e risulta variabile tra 35 km, se si considera la superficie della provincia, e 20 km se si considera quella del comune di riferimento. Nello scenario base si è assunta una distanza media pari a 27,5 km; un'analisi di sensibilità è stata poi condotta facendo variare la distanza all'interno dell'intervallo individuato. Dai colloqui con i gestori degli impianti sono state raccolte informazioni per quanto riguarda la tipologia di mezzi che solitamente effettuano il conferimento: il conferimento diretto avviene in parte (12%) con piccoli mezzi (3,5-7,5 tonnellate), per metà Euro3 e l'altra metà Euro5, e in parte (88%) con gran-

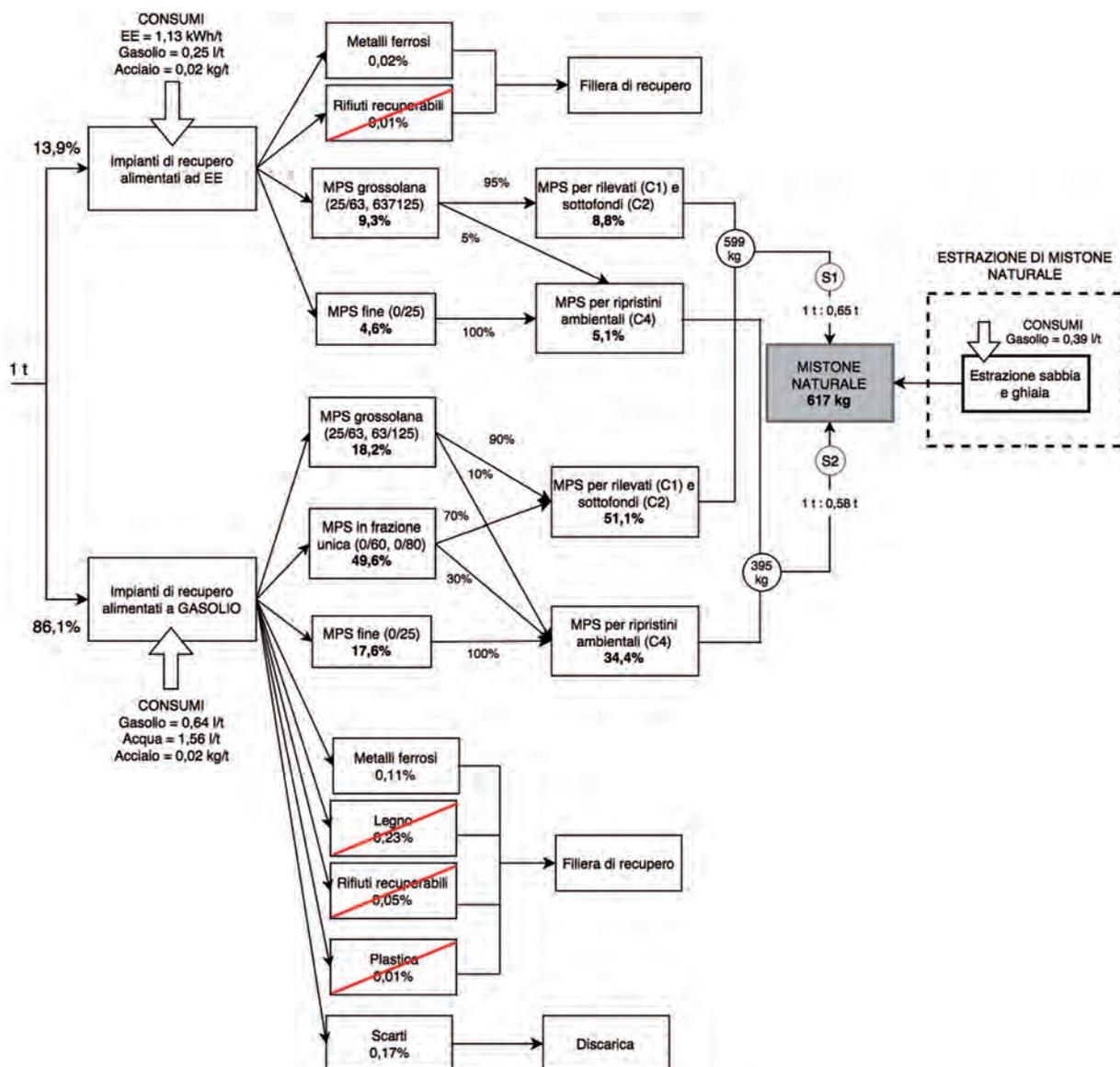


Figura 2 – Bilancio di massa di una tonnellata di rifiuto C&D che entra nel sistema di recupero regionale e consumi associati al trattamento; gli AR prodotti sostituiscono mistone naturale con rapporto di sostituzione diverso in base all'utilizzo. Nella presente analisi LCA non sono modellizzati i destini dei rifiuti recuperabili, del legno e della plastica, separati durante il trattamento.

di mezzi (>32 tonnellate) di classe Euro5. Il trasporto da un impianto all'altro (flussi secondari) avviene invece sempre con grandi mezzi (>32 tonnellate) di classe Euro5.

Come riferito dai gestori degli impianti di recupero, anche il trasporto degli AR avviene solo con mezzi di grandi dimensioni (>32 tonnellate) e la distanza media di percorrenza è di circa 15 km, al fine di contenere i costi dovuti al trasporto dei materiali; è stato fornito un intervallo indicativo di 10-30 km, assunto a riferimento per l'analisi di sensitività.

Infine, la distanza media di vendita del mistone naturale è stata ricavata dalle informazioni contenute all'interno delle Statistiche Cave provinciali, per quei siti estrattivi che hanno dichiarato i ragni di commercializzazione del materiale vergine; dall'analisi è risultata una distanza media pari a 40 km (con un intervallo di variazione tra i 30 e i 60 km).

#### 2.2.5. Analisi di inventario: stoccaggio

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 su 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.

#### 2.2.6. Analisi di inventario: moduli utilizzati

In Tabella 4 sono riportati i processi implementati all'interno del software SimaPro 8.3 per costruire lo scenario base dell'analisi LCA.

Tabella 4 – Processi del database ecoinvent 3.3 e processi costruiti ad hoc utilizzati per modellizzare lo scenario base dell'analisi LCA e corrispondenti valori espressi per una tonnellata di rifiuto C&D gestito in regione

Modulo	Descrizione	Origine del processo	Nome processo	Valore scenario base
Trasporto conferimento rifiuti all'impianto	Flussi diretti			1t*27,5km
	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry> 32 ton, EURO5 (RER)	88%
	Piccoli conferitori	ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 ton, EURO3 (RER)	0,5*12%
		ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 ton EURO5 (RER)	0,5*12%
	Flussi secondari			1t*27,5km*16,5% <sup>(1)</sup>
Stoccaggio	Grandi conferitori	ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry> 32 ton, EURO5 (RER)	100%
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	Diesel, burned in building machine (GLO)/processing	0,11l/t
Recupero C&D		ad hoc		1t*96,7%
	Impianti fissi	% trattata		13,9%
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	Diesel, burned in building machine (GLO)/processing	0,25l/t
	Consumo EE	ecoinvent 3.3	Electricity, medium voltage (IT) / market for	1,13 kWh/t
	Consumo acciaio	ecoinvent 3.3	Ferromanganese, high coal, 74,5% Mn (GLO)/market for	0,02kg/t
	Metalli Ferrosi	ad hoc	Recupero metalli ferrosi in Lombardia (Rigamonti et al., 2015)	0,02%
	Prodotto evitato	ad hoc	Estrazione mistone naturale (Tabella 4)	87kg
	Trasporto AR	ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry> 32 ton, EURO5 (RER)	15 km
	Impianti mobili	% trattata		86,1%
	Consumo gasolio	ecoinvent 3.3	Diesel, burned in building machine (GLO)/processing	0,64l/t
	Consumo acqua	ecoinvent 3.3	Water, unspecified natural origin, IT	1,56l/t
	Consumo acciaio	ecoinvent 3.3	Ferromanganese, high coal, 74,5% Mn (GLO)/market for	0,02kg/t
	Metalli Ferrosi	ad hoc	Recupero metalli ferrosi in Lombardia (Rigamonti et al., 2015)	0,11%
	Scarti	ecoinvent 3.3 mod.	Inert waste (Europe without Switzerland) treatment of inert waste, sanitary landfill	0,17%
	Trasporto scarti	ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry> 32 ton, EURO5 (RER)	27,5km <sup>(2)</sup>
Prodotto evitato	ad hoc	Produzione mistone naturale (Tabella 4)	530kg	
Trasporto AR	ecoinvent 3.3	Transport, freight, lorry> 32 ton, EURO5 (RER)	15km	
Smaltimento in discarica		ecoinvent 3.3 mod.	Inert waste (Europe without Switzerland) treatment of inert waste, sanitary landfill	1t*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).

Tabella 5 – 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>		
	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>	40 km

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

### 2.2.7. Analisi di sensitività

A partire dallo scenario base, sono state condotte alcune analisi di sensitività per comprendere in che misura i principali parametri del sistema influenzano i risultati finali dell'analisi LCA, in termini di impatti ambientali, consumo di risorse energetiche e di consumo di risorsa minerale naturale non rinnovabile. L'analisi dei risultati ha permesso di individuare le possibili azioni migliorative in grado di ridurre i carichi ambientali associati al sistema di gestione attuale.

Ogni scenario alternativo è stato creato modificando un parametro alla volta rispetto allo scenario base, come in seguito riportato:

- Nessun flusso di rifiuti inviato a stoccaggio (no consumo di gasolio associato alla movimentazione interna alle piazzole, eliminazione del trasporto secondario associato a questi impianti e riduzione dei flussi secondari dal 16,5% al 3,5%);
- 100% dei C&D smaltiti in discarica: dai risultati di questo scenario è possibile evidenziare i benefici derivanti dalle azioni di recupero che sono già implementate a livello regionale;
- 96,7% dei C&D inviati a recupero esclusivamente in impianti alimentati ad energia elettrica;
- 96,7% dei C&D inviati a recupero esclusivamente in impianti alimentati a gasolio;
- variazione della distanza di conferimento dei rifiuti (flussi diretti e flussi secondari) all'interno del rispettivo intervallo (20-35 km);
- variazione della distanza di vendita degli AR all'interno del rispettivo intervallo (10-30 km);
- variazione della distanza di vendita del mistone naturale all'interno del rispettivo intervallo (30-60 km);
- variazione del coefficiente di mercato M tra 0 e 1;
- produzione di aggregati riciclati di alta qualità impiegati per il confezionamento di calcestruzzi a bassa resistenza, strati di fondazione o strati accessori; in questo caso la risorsa minerale risparmiata è l'aggregato naturale di sabbia

e ghiaia con rispettivo fattore di sostituzione pari a 1. In questo scenario è stato assunto infatti che le prestazioni di AR e naturali siano del tutto comparabili ( $Q_1$  e  $Q_2$  pari a 1) e che il mercato degli AR di elevata qualità sia ben sviluppato ( $M=1$ ).

Infine è stato creato uno scenario ottimale, nell'ottica di comprendere quali sono le migliori prestazioni che il sistema in esame può raggiungere qualora vengano ottimizzate tutte le fasi di gestione, riciclo e utilizzo degli AR. In particolare, nello scenario ottimale sono stati eliminati lo stoccaggio dei rifiuti e lo smaltimento diretto dei C&D in discarica; si è ipotizzato che gli impianti di riciclo dei C&D siano tutti alimentati ad energia elettrica; le distanze di trasporto sono state ridotte assegnando il minor valore del rispettivo intervallo di variazione, ad eccezione della distanza di vendita del materiale vergine che è stata mantenuta invariata; il rapporto di sostituzione è stato ottimizzato assumendo  $M=1$ ; il 90% degli AR prodotti dagli impianti è stato considerato di alta qualità, conforme quindi all'utilizzo nel settore delle costruzioni in sostituzione di aggregati naturali di sabbia e ghiaia.

## 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati dell'analisi LCA (Tabella 6) mostrano i carichi ambientali e i benefici associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto C&D all'interno dell'attuale sistema impiantistico lombardo (anno 2014), confrontati con i rispettivi impatti dello scenario ottimale e dello scenario di gestione peggiore, in cui i rifiuti vengono interamente smaltiti in discarica (scenario discarica).

### 3.1. Risultati: scenario base

Nei risultati dello scenario attuale di gestione dei rifiuti C&D si nota come, per la maggior parte delle

categorie di impatto, i benefici associati alle azioni di riciclo dei rifiuti (associati alla sostituzione di mistone naturale quale materiale vergine) non riescono a compensare gli impatti sull'ambiente derivanti dalle altre fasi della gestione e dal trattamento. Infatti, solo la categoria di impatto dell'eutrofizzazione in acqua dolce ( $-1,38E-03$  kgP<sub>eq</sub>/t) ed il consumo di risorsa naturale ( $-611,4$  kg/t) presentano valori in segno negativo, indice del fatto che in questi due casi il beneficio del riciclo è maggiore rispetto ai carichi ambientali. Bisogna però sottolineare che gli impatti netti dello scenario base sono, in ogni caso, minori rispetto agli impatti che deriverebbero dal sistema se il rifiuto C&D fosse interamente smaltito in discarica (ultima colonna della Tabella 6): ad esempio, per la categoria riscaldamento globale, l'impatto da  $11,5$  kgCO<sub>2,eq</sub>/t che verrebbero emesse nello scenario discarica passa a  $3,4$  kgCO<sub>2,eq</sub>/t nello scenario base (riduzione del 70% dell'impatto). L'effetto è ancora più marcato nel caso dell'indicatore di consumo di sabbia e ghiaia, che passa da un valore di  $+175,3$  kg/t (dovuto alla costruzione della discarica e della rete infrastrutturale dei trasporti) ad un valore di  $-611,4$  kg/t, evidenziando un risparmio di risorsa naturale non rinnovabile.

Lo scenario discarica 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 evitata" venisse conteggiata come impatto negativo al-

l'interno dei processi di recupero, i benefici del riciclo aumenterebbero molto, riuscendo a bilanciare gli impatti in segno positivo che gravano sul sistema per la maggior parte delle categorie di impatto. Effettuando quindi la differenza tra gli impatti dello scenario base e quelli dello scenario discarica è possibile quantificare gli impatti che si avrebbero considerando la discarica evitata; ad esempio, per il riscaldamento globale si otterrebbe un valore di  $-8,1$  kgCO<sub>2,eq</sub>/t (rispetto alle  $3,4$  kg CO<sub>2,eq</sub>/t dello scenario base).

In Figura 3 sono mostrati in forma grafica i contributi delle diverse fasi della gestione nello scenario base (che non tiene conto dell'evitato smaltimento in discarica dei C&D) rispetto agli impatti complessivi del sistema per alcune categorie di impatto ambientale ritenute significative (riscaldamento globale, assunzione di materiale particolato, eutrofizzazione in acqua dolce e riduzione dello strato di ozono), per il consumo energetico e per il consumo di risorsa naturale non rinnovabile. Dai risultati emerge che i trasporti legati al conferimento dei rifiuti (barra blu e rossa) hanno un peso determinante per la maggior parte delle categorie di impatto (ad es. Figura 3 grafici a, b, d ed e), mentre per l'eutrofizzazione in acqua dolce e per il consumo di sabbia e ghiaia (Figura 3 grafici c ed f) si osserva un beneficio netto (segno negativo dell'indicatore), in quanto le azioni di riciclo riescono a bilanciare gli impatti aggiunti nell'ambiente. In generale, dall'analisi LCA emergono alcuni limiti legati al si-

**Tabella 6 – Confronto tra scenario base, scenario ottimale e scenario discarica (rifiuti C&D interamente smaltiti in discarica) in termini di impatti ambientali, impatto energetico e consumo di risorsa naturale associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto C&D non pericoloso in regione**

	Unità di misura	Scenario base	Scenario ottimale	Scenario discarica
<b>Categoria di impatto ambientale (ILCD)</b>				
Riscaldamento globale	kgCO <sub>2</sub> eq/t	3,4	-1,78	11,5
Riduzione dello strato d'ozono	kgCFC-11 eq/t	9,3E-07	-5,1E-08	3,1E-06
Tossicità per l'uomo (effetti non canc.)	CTUh/t	7,3E-06	1,0E-07	1,9E-04
Tossicità per l'uomo (effetti canc.)	CTUh/t	5,0E-06	4,6E-06	3,4E-06
Assunzione di particolato	kgPM <sub>2,5</sub> eq/t	2,9E-03	-1,3E-03	9,2E-03
Formazione fotochimica di ozono	kgNMVOC eq/t	0,03	-0,01	0,08
Acidificazione	moliH <sup>+</sup> eq/t	0,02	-0,01	0,08
Eutrofizzazione terrestre	moliN eq/t	0,10	-0,03	0,27
Eutrofizzazione (acqua dolce)	kgP eq/t	-1,4E-03	-1,8E-03	3,0E-03
Eutrofizzazione (acqua marina)	kgN eq/t	0,01	-3,1E-03	0,02
Ecotossicità (acqua dolce)	CTUe/t	226,1	65,5	4.031,7
Impoverimento delle risorse idriche	m <sup>3</sup> water eq/t	0,02	0,01	0,04
Impoverimento delle risorse minerali e fossili	kgSb eq/t	2,8E-04	9,1E-05	5,8E-04
<b>Impatto energetico (CED)</b>	MJ eq/t	65,0	-24,1	304,5
<b>Consumo di risorsa naturale (sabbia e ghiaia)</b>	kg/t	-611,4	-1.025,4	175,3

stema di recupero regionale, carenze che impediscono di ottenere dei benefici netti per l'ambiente a seguito dell'impiego di AR nel settore delle costruzioni: *i*) gli impianti di riciclo sono per la maggior parte alimentati a gasolio e l'utilizzo di questo combustibile impatta maggiormente rispetto al consumo di energia elettrica; *ii*) gli impianti producono aggregati riciclati di medio-bassa qualità, quindi la risorsa naturale risparmiata è solo mistone, la cui produzione impatta meno rispetto a quella degli aggregati naturali; *iii*) il fattore di sostituzione tra aggregati riciclati e mistone naturale è limitato dal fattore di mercato (assunto pari a 0,67).

### 3.2. Risultati: scenario ottimale

Nella seconda colonna della Tabella 6 sono mostrati gli impatti associati alla gestione di una ton-

nellata di rifiuto C&D nello scenario ottimale, in cui tutti i parametri principali del sistema sono stati ottimizzati. In questo scenario si nota come la maggior parte delle categorie di impatto ambientale, l'impatto energetico ed il consumo di risorsa naturale presentano un beneficio netto (segno negativo dell'indicatore): i vantaggi associati alle operazioni di riciclo riescono infatti a bilanciare gli impatti in segno positivo dei trasporti. Le differenze in termini di impatti tra lo scenario base e quello ottimale risultano significative: ad esempio il riscaldamento globale si riduce del 152% rispetto allo scenario base, passando dal valore di +3,4 kgCO<sub>2,eq</sub>/t del sistema attuale a -1,78 kgCO<sub>2,eq</sub>/t dello scenario ottimale. Anche il consumo evitato di sabbia e ghiaia estratta passa da -611,4 kg/t a -1.025,4 kg/t, ottenendo un risparmio aggiuntivo del 67,7% di risorsa naturale nello scenario ottimale.

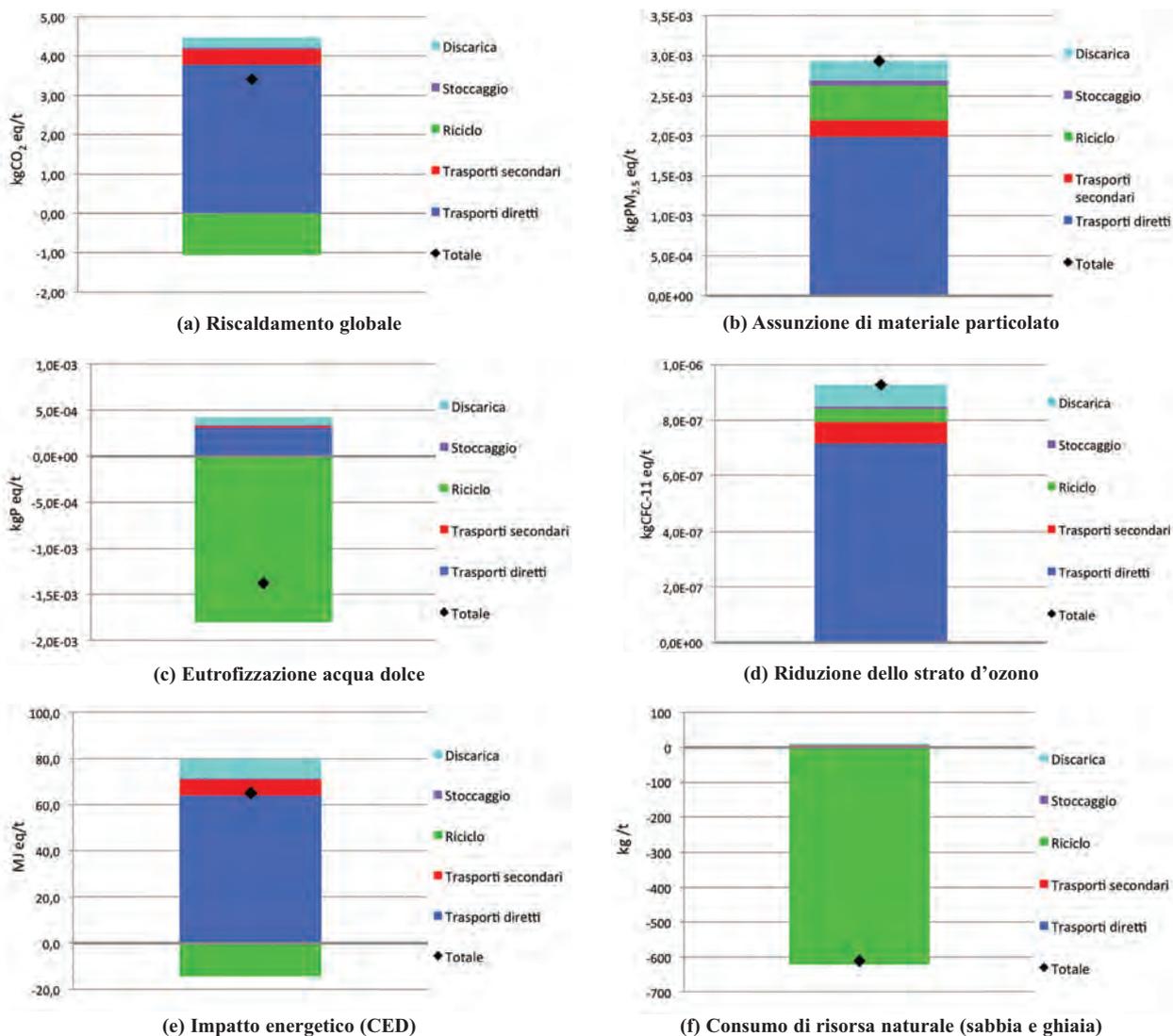


Figura 3 – Analisi dei contributi ad alcuni degli impatti ambientali, all'impatto energetico e al consumo di risorsa naturale non rinnovabile (sabbia e ghiaia) associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto C&D nello scenario base

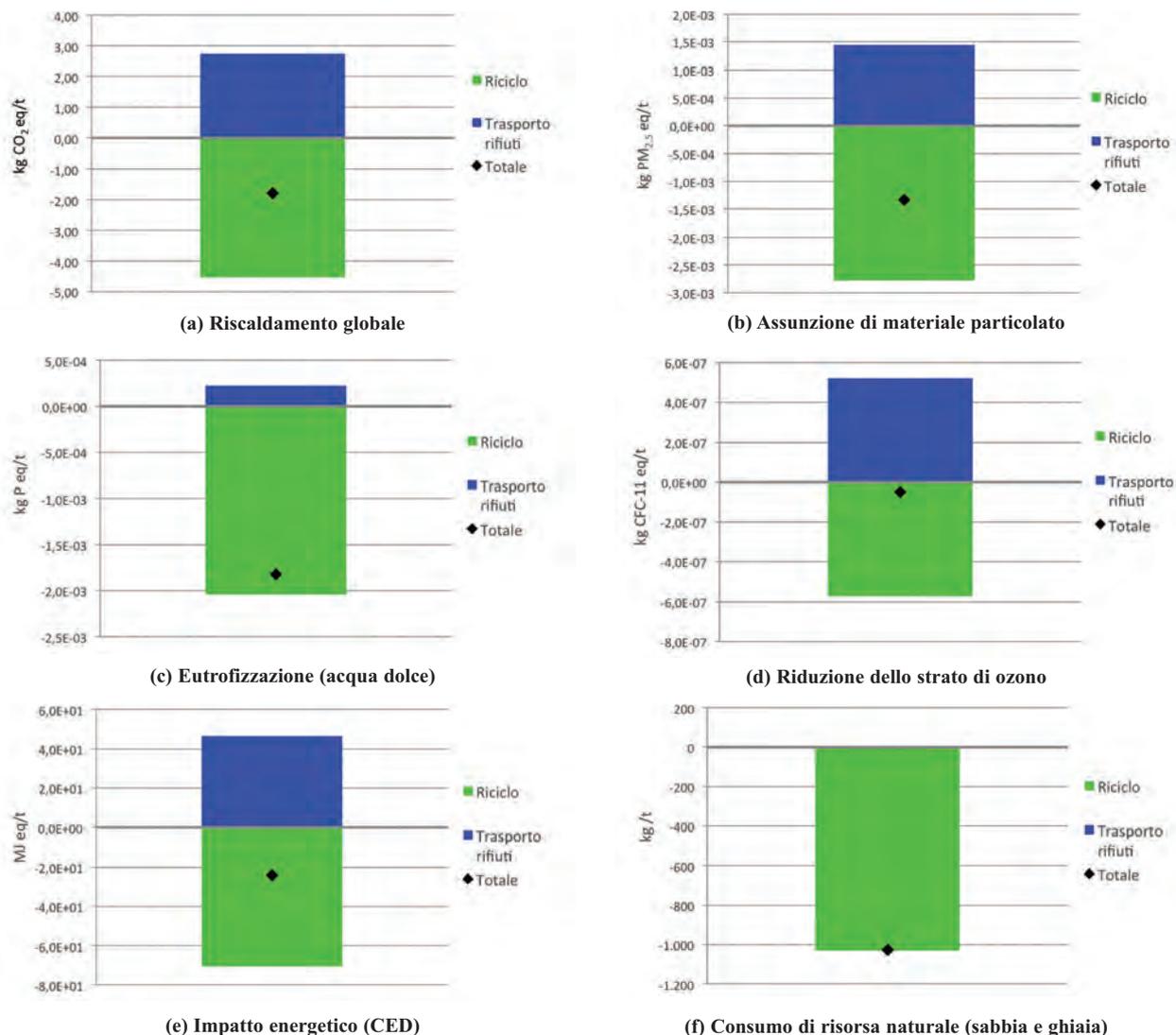


Figura 4 – Analisi dei contributi ad alcuni degli impatti ambientali, all’impatto energetico e al consumo di risorsa naturale non rinnovabile (sabbia e ghiaia) associati alla gestione di una tonnellata di rifiuto C&D nello scenario ottimale

In Figura 4 sono mostrati in forma grafica i contributi delle diverse fasi della gestione rispetto agli impatti complessivi per le stesse categorie di impatto ambientale mostrate nell’analisi dello scenario base, per il consumo energetico e per il consumo di risorsa naturale non rinnovabile. In virtù delle assunzioni fatte, nello scenario ottimale le uniche fasi della gestione che appaiono sono il conferimento dei rifiuti agli impianti di riciclo (barra blu) e le operazioni di riciclo stesse (barra verde), avendo eliminato le operazioni intermedie di stoccaggio e lo smaltimento diretto in discarica e di conseguenza i trasporti secondari tra gli impianti. Per tutte le categorie di impatto mostrate nei grafici si può notare come i benefici del riciclo siano maggiori rispetto agli impatti associati ai trasporti, portando ad avere un complessivo vantaggio per l’ambiente.

#### 4. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

L’obiettivo della presente analisi LCA è stato quello di quantificare le prestazioni ambientali dell’attuale sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi in Lombardia, al fine di individuare azioni efficaci per renderlo più sostenibile.

Per il sistema attuale, considerando i benefici associati all’utilizzo di AR al posto dei rispettivi materiali vergini ma non quelli associati alla discarica evitata, i risultati evidenziano come gli impatti sull’ambiente siano maggiori rispetto ai benefici derivanti dal riciclo, per la maggior parte degli indicatori di impatto. Vantaggi per l’ambiente si evidenziano solo per la categoria di impatto dell’eutrofizzazione in acqua dolce e per l’indicatore relativo al consumo di risorsa minerale naturale (sabbia e ghiaia). Il carico ambientale maggiore deriva

dal trasporto dei rifiuti agli impianti, carico che non riesce ad essere bilanciato dagli impatti evitati grazie all'utilizzo degli AR nel settore delle costruzioni in quanto, essendo le applicazioni attuali di medio/basso livello, si sostituisce solo il mistone naturale ed in misura parziale non essendo il mercato degli AR ancora ben sviluppato. Il sistema attuale risulta comunque avere prestazioni ambientali migliori se confrontato con uno scenario in cui tutti i rifiuti vengono inviati a discarica; inoltre, se si includono nel sistema attuale gli impatti della discarica evitata, i benefici ambientali del sistema riescono a compensare gli impatti in segno positivo per la maggior parte delle categorie di impatto. Partendo dalle ipotesi dello scenario base e dai risultati emersi, sono state effettuate alcune simulazioni volte ad individuare i principali parametri del sistema che ne influenzano maggiormente il bilancio ambientale, con l'obiettivo di comprendere dove e come è maggiormente efficace agire per rendere il sistema più sostenibile. Infine, sulla base dei risultati degli scenari alternativi, è stato creato uno scenario ottimale nell'ottica di valutare quali siano le migliori prestazioni che il sistema in esame può raggiungere qualora vengano ottimizzate tutte le operazioni coinvolte nelle diverse fasi di gestione dei rifiuti e di utilizzo degli aggregati riciclati. I risultati evidenziano un ampio miglioramento passando dallo scenario attuale a quello ottimale: ad esempio, per il riscaldamento globale, nello scenario base si evidenzia un impatto specifico pari a 3,4 kgCO<sub>2,eq</sub>/t, che diventa un beneficio (-1,78 kgCO<sub>2,eq</sub>/t) con l'ottimizzazione di tutti i processi del sistema (scenario ottimale) mentre per l'indicatore che quantifica il consumo di sabbia e ghiaia si passa da un risparmio di risorsa di 611,4 kg/t dello scenario attuale ad un valore di -1.025,4 kg/t nello scenario ottimale, da ricondurre alla produzione di AR di maggiore qualità che sostituiscono l'impiego di aggregati naturali. Riferendosi alle quasi 7 Mt di rifiuti C&D non pericolosi gestiti in Regione Lombardia nel 2014, dal cui trattamento di recupero sono stati prodotti AR misti, è possibile quantificare gli impatti totali associati alla gestione dei rifiuti nello scenario attuale e confrontarli con i rispettivi impatti dello scenario ideale. Per il riscaldamento globale risulta un'emissione pari a circa 23.800 tonnellate di CO<sub>2,eq</sub> nello scenario base, mentre si ottiene un beneficio netto nello scenario ottimale di circa -12.500 tonnellate di CO<sub>2,eq</sub>; nello scenario base, inoltre, grazie alle operazioni di recupero si ottiene un risparmio di risorsa naturale pari a circa 4.300.000 tonnellate di sabbia e ghiaia, beneficio che diventa

più ingente (circa -7.200.000 tonnellate) passando allo scenario ottimale.

Dai confronti tra lo scenario attuale e quello ottimale sono state individuate una serie di azioni che si possono intraprendere per migliorare le attuali prestazioni del sistema, definendo anche l'entità dei benefici derivanti dagli interventi proposti, per fornire raccomandazioni utili a supporto delle politiche regionali:

- Uno degli obiettivi prioritari è sicuramente quello di promuovere l'utilizzo dei materiali riciclati nel settore delle costruzioni. Infatti, la principale criticità che è emersa dall'analisi è l'assenza di un mercato solido per gli AR: spesso tali materiali, sebbene in possesso dei requisiti tecnico-prestazionali, non raggiungono il destino di utilizzo finale a causa di una domanda limitata e si accumulano all'interno degli impianti di riciclo. Ciò porta ad una crisi del settore in quanto i gestori sono costretti a svendere i loro prodotti o a destinarli ad applicazioni di scarso livello (come i ripristini delle cave esaurite) per liberare le piazzole di stoccaggio, ad aumentare al tempo stesso la tasso di conferimento dei rifiuti a causa della mancata vendita ed effettuare un trattamento più blando per contenere i costi. Per riuscire ad ovviare questo problema è necessario incentivare l'utilizzo degli AR rendendo operativi gli strumenti normativi ad oggi disponibili, come il DM 203/2003, che impone una quota minima pari al 30% di materiali riciclati nella realizzazione di opere pubbliche, e la legge n. 211 del 28/12/2015 che introduce l'applicazione dei CAM (Criteri Minimi Ambientali) per favorire gli "acquisti sostenibili" nel campo dell'edilizia (costruzioni e ristrutturazioni di edifici, costruzione e manutenzione delle strade). È importante anche far conoscere alle imprese del settore le reali caratteristiche tecniche e prestazionali degli AR: molto spesso infatti i costruttori edili sono poco informati e pertanto diffidenti nei confronti dell'utilizzo di materiali derivanti dal trattamento dei rifiuti, giudicandolo "rischioso", e preferendo impiegare i materiali vergini che sono largamente disponibili e spesso a prezzi ribassati a causa della forte concorrenza sul territorio. Per favorire il mercato degli AR è necessario rendere economicamente conveniente il loro utilizzo; in quest'ottica, il prezzo degli aggregati naturali rappresenta un fattore chiave su cui intervenire per rendere gli AR più appetibili. In questa direzione si potrebbe agire con una pianificazione del settore estrattivo più strategica, che tenga conto anche della disponibilità sul mercato delle ri-

sorse secondarie, prevedendo una limitazione dell'attività estrattiva ed una maggiore tassazione sui quantitativi di sabbia e ghiaia cavati; in Lombardia il canone regionale per l'estrazione è di 0,70 €/m<sup>3</sup> (dati LegaAmbiente, 2017), motivo per cui si assiste ad un ribasso dei prezzi dei materiali vergini e ad un'esclusione degli AR dal mercato.

- Per diffondere l'utilizzo degli AR è necessario parallelamente incrementarne la qualità: a tal fine, è necessario incentivare le operazioni di demolizione selettiva in cantiere in quanto questo permetterebbe di avere in ingresso agli impianti di riciclo un rifiuto già ben selezionato, omogeneo e privo di impurezze (mattoni, mattonelle, ceramiche, terra, etc.), il trattamento di recupero risulterebbe più efficace e si otterrebbero AR con migliori caratteristiche tecniche e prestazionali, idonei anche ad altri utilizzi (ad oggi preclusi) per i quali sono richiesti limiti più restrittivi. In questo modo potrebbero aprirsi nuovi mercati; ad esempio, i materiali riciclati potrebbero essere impiegati per il confezionamento di calcestruzzi non strutturali o per la costruzione di strati di fondazioni stradali, così da ridurre il consumo di aggregati naturali lavorati (sabbia o ghiaia di varie granulometrie). La qualità degli AR può essere incrementata anche migliorando il livello tecnologico degli impianti di riciclo: ad oggi, la tipologia impiantistica più diffusa sul territorio regionale è rappresentata da impianti alimentati a gasolio, che spesso implementano tecnologie semplici e trattamenti semplificati (vagliatura opzionale). Una possibile azione di pianificazione territoriale potrebbe essere quella di favorire o incentivare l'autorizzazione e realizzazione di impianti fissi alimentati ad energia elettrica, che, oltre a generare minori impatti sull'ambiente rispetto a quelli alimentati a gasolio, permettono di avere un trattamento più articolato e di utilizzare tecnologie più avanzate e performanti.
- Il sistema di gestione può essere ulteriormente migliorato, riducendo il quantitativo di C&D smaltiti in discarica, attraverso l'introduzione di tasse più elevate o il divieto di smaltimento per quelle frazioni di rifiuto valorizzabili. Altre azioni che porterebbero ad un beneficio ambientale complessivo sul sistema dovrebbero essere intraprese per minimizzare il trasporto dei rifiuti ed i passaggi intermedi di gestione, attraverso una localizzazione strategica degli impianti sul territorio e iniziative/misure che favoriscano il contatto e la comunicazione tra riciclatori ed utilizzatori finali di aggregati riciclati.

Per ottimizzare il sistema di gestione dei rifiuti C&D non pericolosi in regione e ridurre gli impatti ambientali che ne derivano, è necessario quindi agire su più aspetti in modo congiunto. La priorità a breve termine dovrebbe essere quella di potenziare il mercato degli AR prodotti attualmente sul territorio, azione che, a sua volta, può sostenere le condizioni per l'introduzione sul mercato di AR di maggiore qualità. Il raggiungimento di questi due obiettivi, come emerge dai risultati dell'analisi LCA, può aumentare in modo consistente i benefici ambientali associati alle azioni di recupero dei C&D e di conseguenza le prestazioni dell'intero sistema, in termini di impatti ambientali, energetici e di consumo delle risorse naturali.

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ANPAR (2007) La produzione di aggregati riciclati in Italia.
- 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.
- Biganzoli L., Falbo A., Forte F., Grosso M., Rigamonti L. 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.
- European Commission, JRC (2011) Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context.
- Eurostat (2014) Waste Statistics. Disponibile su: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics) (accesso effettuato in aprile 2017).
- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Doka G., Dones R., Hirschler R., et al. (2007) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3, Swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- ISPRA (2016) Rapporto Rifiuti Speciali. Disponibile su: <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-speciali-edizione-2016>.
- LegaAmbiente (2017) Rapporto Cave.
- Rigamonti L., Niero M., Haupt M., Grosso M., Judi J., Mannien K., Zampori L. (2017) Advancing the knowledge on the modelling of primary material substitution in waste-management-oriented LCA. Submitted to *Waste Management*.

## RINGRAZIAMENTI

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

Si ringraziano ANPAR (Associazione Nazionale Produttori Aggregati Riciclati), ANCE (Associazione Nazionale Costruttori Edili), ARPA Lombardia, i gestori degli impianti di riciclo e dei siti estrattivi e i referenti delle imprese edili contattate, per il supporto tecnico e per aver fornito dati primari e informazioni utili per l'analisi LCA.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2017 è sostenuta da:

**STADLER**<sup>®</sup>  
STADLER ITALIA S.r.l.



 **VEOLIA**  
Veolia Water Technologies Italia S.p.A.

**SOLV**ir<sup>®</sup> Solutions

 **INGEGNERIA  
DELL'AMBIENTE**



N. 4/2017

Ledizioni 



**CiAl** Consorzio  
Imballaggi  
Alluminio

  
**UNICALCE**  
*Innoviamo la tradizione*

  
**ecopneus**  
il futuro dei pneumatici fuori uso, oggi

  
**iren**

**VOMM**

 **RICREA** 20<sup>1997</sup>  
CONSORZIO NAZIONALE RICICLO  
E RECUPERO IMBALLAGGI ACCIAIO 2017

**ALLEGRI**  
ecologia  
trattamento acque

**KSB** 

**PASSAVANT**  
IMPIANTI   
progettazione e costruzione impianti trattamento acque, fanghi e rifiuti

 **comieco**  
Consorzio Nazionale Recupero e Riciclo  
degli Imballaggi a base Cellulosica

**conTec**

 **SEAM**  
engineering  
l'acqua e l'ambiente